

Barbu BRAUN, Ciprian OLTEANU, Cătălin COBLIȘ

Mășini de măsurare în
coordonate

Vol. III



Editura Universității TRANSILVANIA Brașov

2022

ISBN 978-686-19-1539-2

Barbu BRAUN, Ciprian OLTEANU, Cătălin COBLIȘ

Mașini de măsurare în coordonate

vol III

*Mașini de măsurare în coordonate bazate pe
principiul emisiei de radiație LASER*

Brasov 2022



EDITURA
UNIVERSITĂȚII
TRANSILVANIA
DIN BRAȘOV

Adresa: 500030 Brașov,
B-dul Eroilor, nr. 9
Tel./Fax: 0268/475348
E-mail: editura@unitbv.ro

Referent științific: Prof. dr. ing. Mihaela Ioana BARITZ

Coordonator lucrare: Prof. dr. ing. Ciprian OLTEANU

Tehnoredactare și corectură: autorii

Descriere CIP a Bibliotecii Naționale a României

Mașini de măsurare în coordonate / Barbu BRAUN, Ciprian OLTEANU, Cătălin COBLIȘ – Brașov: Editura Universității „TRANSILVANIA”, 2022

3 vol.

ISBN 978-973-598-646-9

Vol. 3. – 2022 – ISBN 978-686-19-1539-2

- I Braun, Barbu
- II Ciprian, Olteanu
- III Cătălin, Cobliș

Prefață

Volumul III al cărții Mașini de măsurare în coordonate, Mașini de măsurare în coordonate bazate pe principiul emisiei de radiație LASER are un rol preponderent educațional, adresându-se cu precădere studenților din anul IV, specializările Mecatronică, Optometrie, Inginerie medicală, Design industrial sau Sisteme de energii regenerabile. În acest sens, scopul principal al acestui manuscris este acela de a fixa cunoștințele teoretice și practice specifice măsurării și scanării cu mașini și sisteme în coordonate ce au în componență capete de măsurare/scanare pe principiul emisiei radiației LASER.

Volumul prezintă aspecte teoretice dar și practice privind construcția, tipologia, principiul de funcționare și procedura de lucru în cazul acestor tipuri de mașini de măsurare în coordonate. Principalul scop este nu doar de a cunoaște evoluția tehnologiilor clasice și moderne de măsurare și scanare 3D, ci și de a forma cunoștințele și competențele de a utiliza astfel de sisteme, în perspectiva creșterii șanselor studenților absolvenți de a se putea angaja în domeniul de pregătire.

Volumul se adresează studenților din anii terminali cu specializări diferite, având în vedere faptul că sunt prezentate și descrise aplicații ale mașinilor de măsurare în coordonate bazate pe emisia LASER în domenii foarte variate, precum: industrie, robotică, biomecanică, inginerie medicală și optometrie, construcții etc.

Pentru a răspunde acestor două deziderate, formarea cunoștințelor teoretice și practice ale studenților absolvenți, acest al treilea volum al cărții Mașini de măsurare în coordonate este structurat pe cinci capitole, în primul fiind prezentate aspecte generale privind principiul măsurării și al scanării cu sisteme bazate pe emisia LASER. Deoarece este cunoscut faptul că evoluția acestor tehnici de măsurare și scanare cunosc o dinamică foarte rapidă, în continuare, în capitolul al doilea sunt prezentate și explicate caracteristicile tehnice, constructive și cele funcționale pentru o gamă cât mai largă de sisteme de măsurare cu sursă LASER. Principalele aspecte ce vizează însușirea cunoștințelor teoretice și practice legate de tehnicile de scanare cu LASER sunt tratate în cel de-al treilea capitol, "Tehnici de măsurare prin radiația LASER". Pentru a se înțelege cât mai bine nu doar aspectele teoretice și practice ale procedurilor de scanare pe principiul LASER, în capitolul 4 sunt prezentate diverse aplicații, în domeniile sus-menționate, acestea fiind ilustrate și explicate detaliat. Trebuie menționat că o bună parte dintre acestea reprezintă chiar etape de cercetare specifice pregătirii doctorale și post-doctorale în cazul a doi dintre autorii manuscrisului. În ultimul capitol se pune accentul pe variante ultra moderne de sisteme de scanare, ce țin pasul cu evoluția tehnologiei, și anume sisteme portabile de scanare, ce se doresc a fi din ce în ce mai performante atât sub aspectul eficienței, cât și al preciziei de numerizare. Prin cele prezentate aici se urmărește în primul rând informarea studenților și absolvenților, dar și a cercetătorilor cu privire la soluțiile existente specifice obținerii unor modele 3D virtuale ale unor obiecte reale, scanate ultra – rapid cu astfel de sisteme. Informațiile pot fi de mare ajutor celor care au de proiectat și/sau de modelat un obiect sau un reper cu aplicații în domenii variate, utilizarea unor astfel de sisteme de scanare portabile putând fi una dintre cele mai convenabile soluții. Mai mult, în acest ultim capitol sunt prezentate exemple și informații concrete asupra modului în care astfel de sisteme de scanare pot fi utilizate cu succes nu doar în domeniul ingineriei, ci și al construcțiilor, al arhitecturii, al industriei auto etc. Acesta fapt se explică

prin faptul că astfel de sisteme permit scanarea unor piese/obiecte/repere fixe, de mari dimensiuni și/sau foarte greu transportabile.

În concluzie, volumul III se dorește a fi unul cu rol de formare a studenților și absolvenților cu profil tehnic, informația prezentată putând fi accesată pe viitor nu doar prin surse convenționale (sisteme de stocare în format electronic), ci și din surse on-line (prin accesarea rapidă a unor site-uri sau baze de date ale Bibliotecii și Eduturii Universității TRANSILVANIA din Brașov.

Noiembrie 2022

Autorii.

Capitolul 1

Generalități privind măsurarea în coordonate cu ajutorul emisiei de radiație LASER

1.1 Generalități. Avantaje și dezavantaje ale măsurării cu sursă LASER

În ultimii ani, sistemele de măsurare bazate pe emisia de radiație LASER au cunoscut o dezvoltare foarte puternică, datorită unor avantaje mari, din punctul de vedere practic. Dintre acestea se pot aminti următoarele:

- creșterea eficienței în cazul scanării și numerizării unor suprafețe cu geometrii complexe ale unor reperi cu aplicații în industrie și medicină [1], [2], [3];
- scăderea drastică a duratei unui ciclu de scanare a unui reper, comparativ cu cazul utilizării sistemelor de măsurare și scanare prin contact, în componența MMC. Generarea modelului CAD scanat al profilului reperului se poate realiza integral, în doar câteva minute, în timp ce în cazul utilizării de sisteme de măsurare clasice, prin palpate, pentru aceeași operație ar fi necesare câteva ore sau chiar zile [1], [4];
- scanarea 3D cu sursă LASER permite o inspecție, dar și o modelare completă pentru conformații complexe ale reperelor, chiar și în cazul în care acestea se compun din mai multe accesorii [4], [5];
- scanarea cu radiație LASER permite inclusiv măsurarea de reperi confecționate din materiale fragile și/sau deformabile, fără a exista riscul deteriorării acestora [4], [6], [8];
- posibilitatea interschimbabilității sculelor de măsurare, prin trecerea rapidă de la un sistem de măsurare cu sursă LASER la un sistem de măsurare prin contact [7], [8];
- în cazul scanării reperelor prin utilizarea de MMC cu sursă LASER, modelele CAD, odată obținute, pot fi mai ușor și mai rapid prelucrate, analizate și/sau modelate [4].

În ciuda acestor mari avantaje, există unele situații când pentru măsurarea și/sau scanarea anumitor reperi, în cadrul MMC se preferă utilizarea de sisteme de măsurare clasice, prin contact, ca urmare a unor neajunsuri sau probleme care pot apărea:

- prețul de cost ridicat. Există situații când pentru scanarea unor reperi (nedeformabile) este mai rentabilă, nefiind necesară o productivitate ridicată și deci nu se justifică utilizarea unor astfel de sisteme cu costuri ridicate [5];
- influența strălucirii suprafeței reperului. Ca urmare a interferențelor dintre radiația emisă și cea reflectată, apare o variație parazită a intensității radiației, la nivelul senzorilor de detecție din cadrul sistemelor de măsurare. Acest lucru poate conduce la scăderea preciziei de măsurare și/sau de scanare a reperelor, putându-se ajunge chiar la erori de măsurare de ordinul zecimilor de milimetru [1], [8]. Pentru compensarea acestor erori, o soluție poate consta în utilizarea mai multor camere de achiziție a imaginilor (sub formă de niveluri de gri), dispuse în diferite unghiuri și poziții, pentru medierea nivelurilor de intensitate (de gri), corespunzătoare aceluiași zone măsurate / scanate de pe reper. Această soluție, însă prezintă dezavantajul unei creșteri mari a prețului sistemului de măsurare, prin interpunerea de sisteme optice și opto-electronice complexe de compensare.

1.2 Principii fundamentale ale măsurării în coordonate, utilizând sistemele cu sursă LASER

Pe parcursul dezvoltării tot mai accentuate a MMC cu sisteme de măsurare pe principiul emisiei LASER, s-au descoperit și perfecționat în mod continuu diferite metode și tehnici de măsurare a distanțelor, dintre care se pot aminti: tehnica Radar, tehnica triangulației, tehnica stereoviziunii,

tehnica Moire etc. Toate acestea, însă, din punctul de vedere al măsurării variației distanțelor pe principiul emisiei radiației LASER, au în comun faptul că în funcție de variația distanței de la obiectul măsurat la sursa de emisie-recepție, are loc o variație a intensității radiației reflectate. Astfel, cu cât distanța dintre reperul măsurat și sistemul de măsurare crește, cu atât intensitatea radiației reflectate va scădea [9]. Pornind de la acest considerent, s-a dezvoltat conceptul privind tehnica analizei de profunzime, nu doar în scopul detectării obiectelor aflate la distanță, sau a deplasării acestora, ci mai ales în scopul evaluării dimensiunii acestora, în scopul măsurării unor parametri geometrici. Analiza de profunzime se referă la captarea de imagini ale unor suprafețe, sub forma unor hărți în niveluri de gri, reprezentând hărțile de variație a intensității radiației LASER reflectată de pe suprafața obiectului. Nivelurile de gri mai închise corespund unor intensități mai mici ale radiației captate și, implicit la o distanță mai mare între sistemul de măsurare și punctul sau suprafața de corespondență, pe reper, iar cele mai deschise corespund unor intensități mai mari, deci unei distanțe mai mici față de reper.

Mai mult, cercetări ulterioare au condus la dezvoltarea unor tehnici privind analiza de profunzime chiar în scopul scanării și numerizării unor suprafețe ale unor repere cu geometrie simplă și complexă. Pentru aceasta, în ultimii ani, s-au descoperit și s-au dezvoltat mai multe tehnici pentru obținerea imaginii de profunzime, prezentate după cum urmează:

Tehnica Radar constă în iluminarea obiectului cu o sursă LASER și obținerea informației de profunzime în funcție de durata de emisie a energiei reflectate de obiect. Știut fiind faptul că radiația electromagnetică se propagă relativ cu viteză constantă, distanța până la un punct situat pe suprafața obiectului se poate determina prin dirijarea unei unde LASER către acel punct și măsurând perioada de timp necesară până când radiația LASER se întoarce la sistemul de emisie – recepție [1], [10], [11].

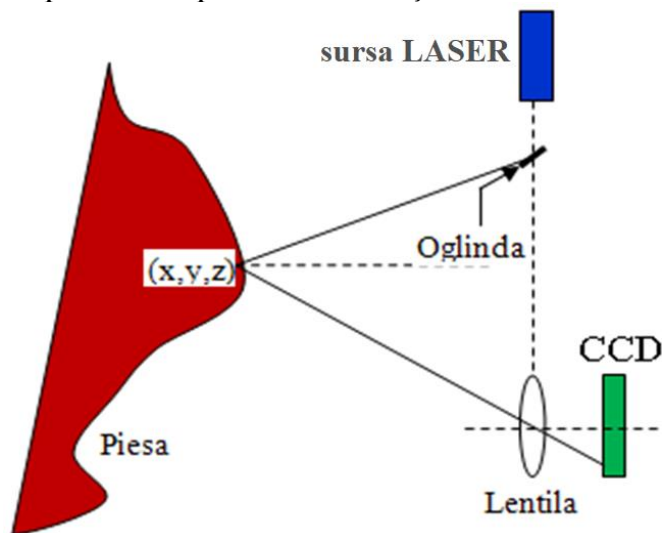


Fig. 1.2.1 Tehnica de scanare prin triangulație LASER [7], [8]

Triangulația optică presupune utilizarea de sisteme de scanare bazate formate dintr-o cameră CCD (Charged Coupled Device) și o sursă de radiație LASER (figura 1.2.1) [7], [8]. Principiul de funcționare constă în proiectarea unui fascicul luminos punctiform pe suprafața reperului de măsurat, studiindu-se interacțiunea fascicolului cu obiectul, în vederea calculării coordonatelor în punctul de intersecție dintre spotul luminos și suprafața obiectului studiat.

Cunoscându-se poziția sursei luminoase în raport cu camera CCD, se poate determina (prin metode trigonometrice) distanța de la sursă la punctul de proiecție al spotului până la suprafața reperului [12 ÷ 15]. Se recomandă ca unghiul de incidență dintre radiația emisă și direcția normalei la suprafața obiectului să fie cât mai mic (să tindă spre zero).

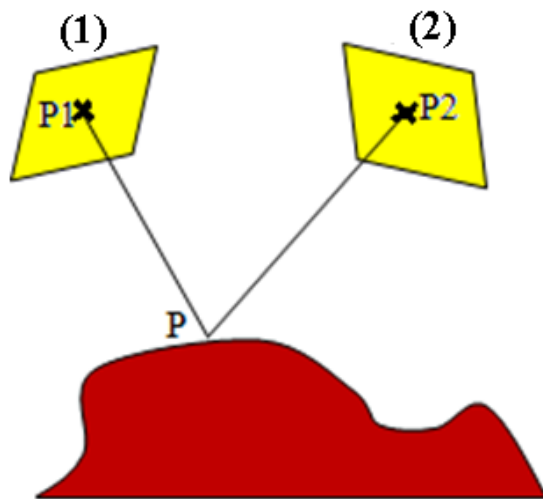


Fig. 1.2.2 Tehnica de stereoviziune [16]

Tehnica de stereoviziune (fotogrametria) (figura 1.2.2) determină distanța de la sursă la obiect cu ajutorul spațiului format între două sau mai multe camere foto [5], [16]. Fiecare punct P de pe suprafața obiectului (suprafață aflată în câmpul vizual al celor două camere) se proiectează în punctele P_1 și P_2 , în planele – imagine (1) și (2). Identificarea punctelor P_1 și P_2 din cele două imagini, ce corespund punctului P de pe obiect, permit calcularea coordonatelor carteziene ale punctului P . Principalul dezavantaj al acestei tehnici constă în dificultatea selectării caracteristicilor identice ale celor două imagini și deci stabilirea corespondențelor între acestea [17 ÷ 19].

În funcție de modul de obținere a imaginilor, tehnica de stereoviziune poate fi *statică*, cu utilizarea mai multor cadre, preluate din poziții diferite, în același timp sau *dinamică*, fiind utilizate mai multe cadre, dar la momente de timp diferite.

Proiecția unei grile de lumină structurată este o tehnică mai des utilizată în cadrul MMC, datorită eficienței de măsurare și/sau scanare, dar și a posibilității unei mai bune compensări a erorilor de măsurare. Principiul acestei tehnici constă în proiecția unei grile de dungi luminoase pe o suprafață tridimensională, a cărei distorsiune (în funcție de geometria acesteia) este vizualizată din mai multe ipostaze, informația privind distorsiunea fiind utilizată pentru reconstrucția virtuală a suprafeței. Deviația dungilor față de forma inițială permite o determinare precisă a coordonatelor 3D pentru fiecare detaliu de pe suprafața reperului măsurat. În practică, cel mai adesea sunt întâlnite proiecțiile de grile de benzi paralele sau cu dispunere radială [20 ÷ 22]. Principalele metode utilizate pentru generarea grilei de lumină structurată sunt interferența radiațiilor LASER și proiecția pe baza unui afișaj [23], [24].

1.3 Probleme întâlnite la scanarea prin utilizarea radiației LASER

Orice perturbare a energiei fascicolului LASER influențează calitatea imaginii obținute a suprafeței obiectului scanat, implicând exactitatea valorilor coordonatelor punctelor măsurate ale reperului să fie afectată [6], [25]. Perturbările la nivelul radiației luminoase reflectate apar în următoarele situații:

- în cazul reflexivității neuniforme a suprafeței reperului;
- dacă suprafața are un grad ridicat de reflexivitate;
- dacă geometria suprafeței prezintă discontinuități;
- dacă fascicolul luminos este parțial obturat;
- la apariția fenomenului de granularitate.

a) Reflexivitatea neuniformă a suprafeței

Acest fenomen se întâlnește cu precădere în cazul suprafețelor rugoase și/sau granulare, cum ar fi, de exemplu vopseaua sau hârtia mată [26]. Dacă se reprezintă direcția și cantitatea de lumină incidentă,

sub forma unui vector \vec{I} , atunci reflexivitatea unei suprafețe ideale, L este proporțională cu produsul dintre cantitatea de lumină și normala la suprafața \vec{n} :

$$L = \rho \cdot \vec{I} \cdot \vec{n} \quad (1.3.1)$$

unde $\rho > 0$ este o constantă caracteristică a materialului.

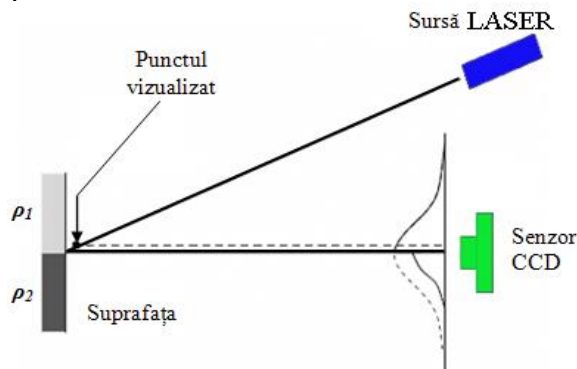


Fig. 1.3.1 Cazul suprafețelor cu grade diferite de reflexie [6], [25], [26]

b) Suprafețe cu grad înalt de reflexivitate

În cazul în care piesa are un grad înalt de reflexivitate, pot apărea erori chiar mari de măsurare / scanare [6], [26]. Un caz reprezentativ este acela în care reperul are o geometrie cu două sau mai multe suprafețe plane, dispuse la unghiuri diferite (Figura 1.3.2).

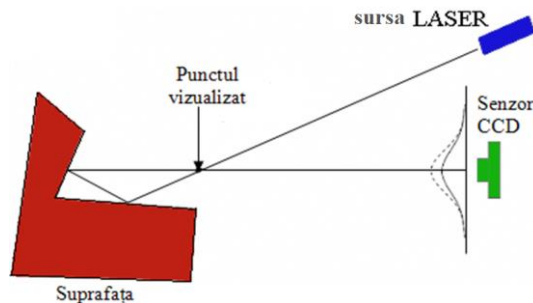


Fig. 1.3.2 Erorile ale punctului măsurat datorită unei suprafețe cu grad înalt de reflexie [19]

Ca urmare, se poate ajunge în situația în care un punct ce nu se află pe suprafața reperului să apară ca punct măsurat. Iată, deci că există anumite puncte de pe suprafața reperului care nu pot fi măsurate (fie apar în câmpul vizual al camerei, dar nu sunt direct baleiate de fasciculul LASER, fie sunt baleiate de radiația LASER, dar acestea nu apar în câmpul vizual al sistemului CCD) [28].

c) Discontinuități ale geometriei suprafeței

Dacă radiația LASER ajunge pe un colț sau o muchie a piesei (Figura 1.3.3), apare o modificare a imaginii punctului luminos la nivelul detectorului CCD, ceea ce, evident, conduce la o măsurare eronată.

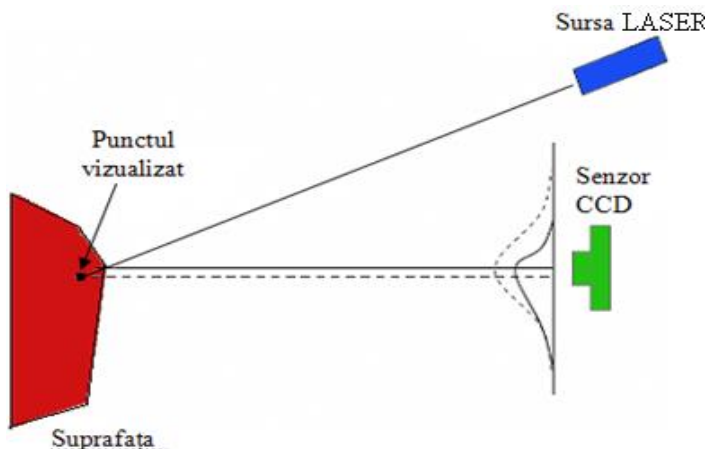


Fig. 1.3.3 Eroarea punctului de profunzime datorită discontinuității suprafeței [1], [19]

În acest caz problemele apar ca urmare a faptului că există o tendință în a considera fiecare punct la fel de luminos, din toate direcțiile de vedere. Figura 1.2.3 ilustrează cazul a două cu două caracteristici de diferite, ceea ce produce o schimbare în reflexivitatea suprafeței. Această variație a gradului de reflexie implică o schimbare a imaginii la nivelul camerelor CCD și, ca urmare apare o eroare în determinarea poziției punctului de proiecție pe suprafața obiectului [19], [27].

Dacă reperul având o asemenea geometrie prezintă suprafețe cu un grad mare de reflexivitate, fasciculul LASER cade pe o suprafață a piesei ce nu se află în câmpul vizual al camerei CCD, însă, ca urmare a fenomenului de reflexie, la nivelul primei suprafețe, radiația va ajunge pe o altă suprafață (adiacentă) ce se va afla în câmpul vizual al sistemului CCD.

Pentru alte forme geometrice, o parte din fasciculul LASER ce ajunge pe o muchie sau pe un colț al reperului poate „cădea” în afara suprafeței, dar o anumită cantitate a radiației reflectate totuși poate fi recepționată de către senzorul CCD. În acest caz se poate ajunge în situația în care un punct de profunzime poate fi găsit chiar și acolo unde nu se află nici o suprafață [19].

d) *Fasciculul luminos parțial sau complet obturat*

Există și situații în care, prin geometria suprafeței piesei scanate, o anumită cantitate din radiația reflectată se pierde, la nivelul senzorului CCD ajungând doar o parte din cantitatea de radiație reflectată inițial (Figura 1.3.4).

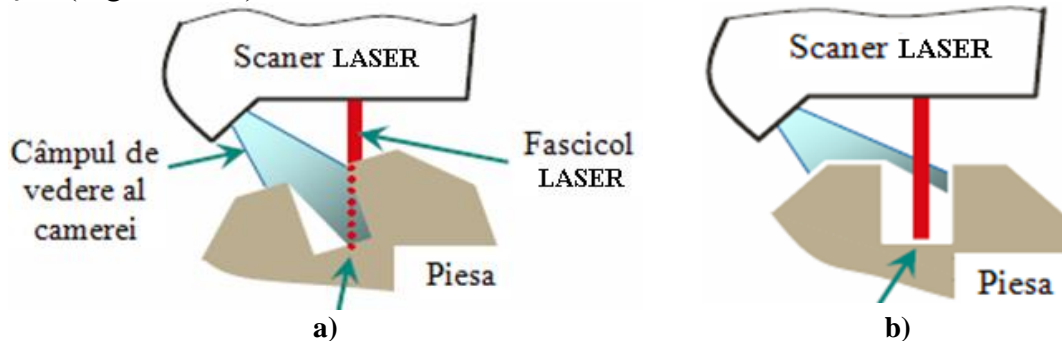


Fig. 1.3.4 Fenomenul de obturare a radiației reflectate: a) situația în care suprafața se află în câmpul vizual al camerei CCD, dar radiația LASER nu o baleiază complet; b) situația în care suprafața este baleiată, dar aceasta nu se află în câmpul vizual al camerei CCD [19], [29]

În ambele situații intervine fenomenul de ocluziune al fascicolului între suprafața reperului și camera de recepție CCD. O parte din radiația LASER reflectată de către suprafața reperului, este blocată înainte de a ajunge la senzorul CCD [19], [29]. Tot în cadrul fenomenului de ocluziune apare și fenomenul prin care radiația LASER ce cade pe suprafața de măsurat, poate fi obturată în totalitate. Ca urmare imaginea punctului de profunzime este generată în mod eronat [30].

e) *Fenomenul de granularitate*

Dacă radiația LASER cade pe o suprafață rugoasă, măsurătorile pot fi, de asemenea, considerabil influențate. Granularitatea suprafeței produce variații aleatoare ale lungimii drumului optic, determinând un fenomen de interferență variabilă și aleatorie în tot spațiul dintre suprafața reperului și senzorul CCD [31].

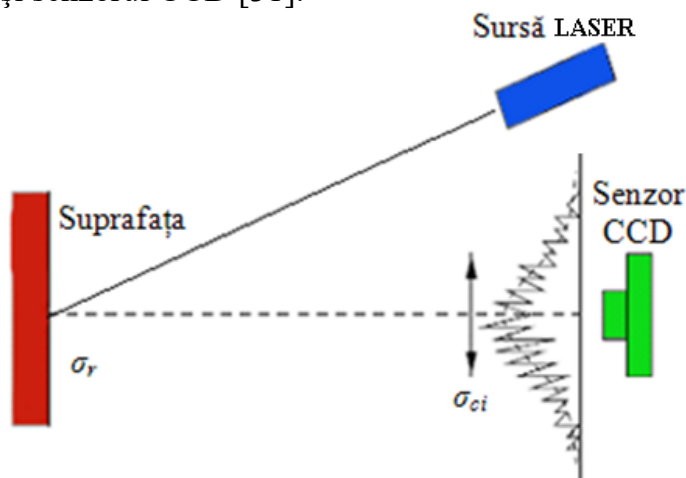


Fig. 1.3.5 Influența granularității asupra preciziei, în cazul sistemelor bazate pe principiul triangulației [31]

Influența granulației asupra preciziei de măsurare se manifestă cel mai mult în cazul sistemelor de măsurare cu sursă LASER, bazate pe principiul triangulației. În acest caz, din cauza suprafeței granulare a reperului scant se produce următorul fenomen: la baleierea unei zone finite a reperului de către spotul LASER, granularitatea pe acea zonă implică un număr mare de micro-neregularități, ceea ce produce o „împrăștiere” a componentelor radiației reflectate. Ca urmare apar impulsuri cu niveluri de „zgomot” ce pot afecta valoarea medie a impulsurilor detectate la nivelul sistemului CCD.

Aceasta cauzează erori ale coordonatelor punctelor de profunzime măsurată, chiar și în cazul unor suprafețe plane. Acest fenomen apărut în cazul suprafețelor cu granulație mare se poate explica și prin faptul că imaginea fascicolului LASER captată la nivelul detectorului CCD este „bruiată”, ceea ce înseamnă producerea unui decalaj aleatoriu în detectarea valorii medii a poziției punctului sau zonei măsurate. Aceasta se traduce printr-o incertitudine în stabilirea poziției medianei, adică o incertitudine a punctului sau a zonei de măsurare [31].

Cea mai mare problemă în cazul suprafețelor granulare este că, în acest caz, exactitatea măsurătorilor este limitată în cadrul sistemelor optice de triangulație ce utilizează lumina coerentă a LASER-ului, chiar și în condiții ideale de suprafață plană sau de suprafață fără variații de reflexivitate [31].

1.4 Soluții de remediere a problemelor întâlnite la scanarea prin utilizarea radiației LASER

Problemele în cazul măsurării cu ajutorul principiului emisiei de radiație LASER din cauza variației reflexivității suprafeței pot fi mult diminuate prin aplicarea unui strat subțire de vopsea pe toate suprafețele reperului ce urmează a fi măsurate sau scanate. În cazul reperelor cu suprafețe cu grad mare de reflexie, ce prezintă și muchii sau ocluziuni, se pot diminua prin controlul amplasării scannerului, pentru o mai corectă digitizare (pe baza nivelurilor de gri, date de variația intensității radiației LASER captate în urma reflexiei) a suprafețelor. Având în vedere acestea, se recomandă cunoașterea modelului CAD asociat piesei de scanat, nu doar cunoașterea caracteristicilor scannerului, în scopul determinării unei poziționări optime a acestuia. Acest lucru este deosebit de util pentru a se reduce cât mai mult situațiile în care apare fenomenul de ocluziune a radiației LASER între suprafața reperului și senzorul CCD [30], [31].

Capitolul 2

Sisteme și echipamente pentru măsurarea pe principiul optic, fără contact, din componența MMCO

2.1 Tipologia MMCO cu sisteme de numerizare cu sursă LASER

Ca și în cazul principiului de măsurare și scanare prin contact, în cazul utilizării surselor de emisie a radiației LASER, structura generală a unei MMCO este asemănătoare, incluzând elementele mobile (pentru deplasările de-a lungul celor trei axe), batiul mașinii și sistemul de măsurare (Figura 2.1.1) [32].

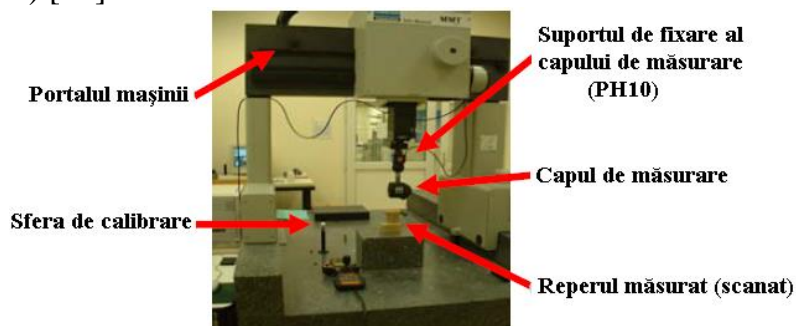


Fig. 2.1.1 Structura generală a unei MMCO cu sistem de măsurare bazat pe emisia de radiație LASER [32]

Ceea ce diferă fundamental în componență este sistemul (capul) de măsurare, care include sistemul opto-electronic pentru emisia și recepția radiației LASER, precum și captorul sau camera CCD pentru prelucrarea și interpretarea datelor sub formă de imagini pe niveluri de gri [32], [33].

Ca și în cazul sistemelor de măsurare prin contact, orientarea capetelor de măsurare cu sursă LASER se poate face după două axe, una în plan orizontal, cealaltă în plan vertical (Figura 2.1.2).

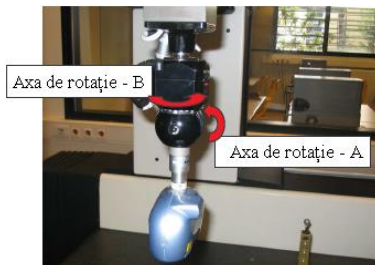


Fig. 2.1.2 Disponerea sursei de radiație LASER pe un cap de măsurare Renishaw [33]

Modalitatea prin care se poate face poziționarea capului de scanare, implicit definirea orientărilor acestuia este una similară cu cea în cazul sistemelor prin palpate. Și în acest caz, prin intermediul mediului software dedicat se procedează la stabilirea orientărilor, prin indicarea unghiurilor de poziționare în cele două plane. Coroborat cu alegerea configurării, din punctul de vedere al stabilirii tipului de sursă LASER, se procedează la calificarea sculelor de măsurare și scanare. Procedura este una foarte asemănătoare cu cea specifică pregătirii procesului de măsurare sau scanare prin contact [74].

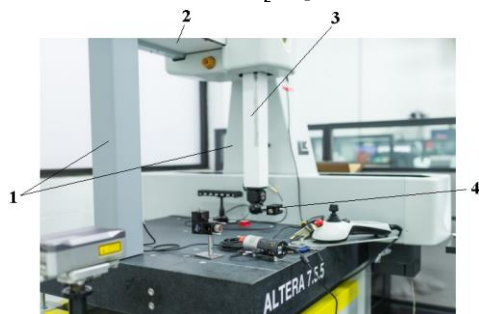


Fig. 2.1.3 Construcția clasică a unei MMCO cu sistem de măsurare și scanare cu sursă de emisie LASER:

1 – portalul; 2 – traversa; 3 – coloana; 4 – sistemul de măsurare [34]

Din punctul de vedere al construcției, cele mai întâlnite MMCO cu sursă LASER, ca și în cazul celor cu sistem de măsurare/scanare prin contact, sunt cele pe trei axe, cu batiu și masă fixă, elementele mobile fiind un portal, o traversă și coloana pe care este dispus sistemul de măsurare (Figura 2.1.3) [5], [34]. Ceea ce este însă de menționat este faptul că pentru o mașină de măsurare și scanare în coordonate prevăzută cu sistem de măsurare cu sursă LASER, volumul de lucru trebuie să fie suficient de mare. Acest lucru implică un volum acoperitor, încât să poată avea loc procesul de numerizare al reperelor cu geometrie simplă sau complexă [5], [50].

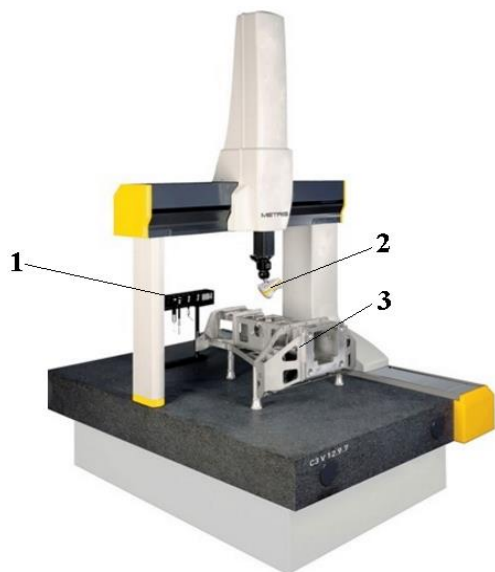


Fig. 2.1.4 MMCO cu magazii pentru schimbarea capetelor de măsurare: 1 – magazie; 2 – cap de măsurare cu sursă LASER; 3 – reperul scanat [34]

Din punctul de vedere al eficientizării procesului de scanare, există variante constructive de MMCO prevăzute cu magazii ce permit în mod automat sau semi-automat interschimbarea sistemelor de măsurare în timpul funcționării. Aceste magazii pot fi prevăzute atât pe masa mașinii, cât și pe un perete aflat în imediata vecinătate a zonei de lucru a mașinii. Principiul de funcționare al automatizării schimbării capului de scanare în timpul procesului este unul similar cu cel în cazul MMC bazate pe sisteme de scanare prin contact. Ceea ce diferă în mod clar față de sistemele clasice de scanare este arhitectura magazinelor, sub aspectul conformației locașurilor de depozitare a capetelor de scanare. Un mare avantaj este acela că astfel de magazii permit trecerea rapidă de la scanarea prin contact la cea fără contact, chiar în cadrul aceluiași ciclu de lucru [34], [50].

2.2 Tipuri de sisteme de măsurare cu sursă LASER

Este cunoscut faptul că în cadrul MMCO pe principiul utilizării radiației LASER, un rol esențial îl au *sistemele de măsurare*, în ultimii ani punându-se un accent deosebit pe dezvoltarea și optimizarea acestora. În cele ce urmează sunt tracute în revistă câteva dintre variantele cele mai moderne de sisteme de măsurare și scanare cu sursă LASER:

a) Sistemul G-Scan RX2 (Figura 2.1.1)



Fig. 2.2.1 Sistemul G-Scan RX2 – dispunerea capului de scanare [35]

Capul de scanare se dispune pe brațul de măsurare, după același procedeu ca și în cazul unui cap de măsurare prin contact. Acesta utilizează o axă rotativă integrată având o conexiune de tip firewire. Avantajul acestui sistem de măsurare este acela că procedura de măsurare este simplă de efectuat, nefiind necesară o recalibrare în prealabil. Această variantă este disponibilă în special pentru brațele de măsurare portabile, cu mai multe grade de libertate (Capitolul 2.3). Sistemul oferă posibilitatea stocării și transmiterii datelor în formate ASCII, STL, DXF, IGES [35].

b) Sistemul Perceptron V4



Fig. 2.2.2 Dispunerea captoarelor Perceptron V4 [36]

Acest sistem permite o dispunere rapidă și ușoară a capului de măsurare, permițând măsurători de înaltă precizie și achiziții în timp real a minim 23.000 de puncte pe secundă. Modul de dispunere al capului de măsurare este prezentat în figura 2.2.2, aceste sisteme fiind utilizate, de asemenea cu precădere pentru brațele portabile cu 6 sau 7 grade de libertate (Capitolul 2.3) [36]. Numărul mare al gradelor de libertate permite obținerea unui număr suficient de mare de orientări ale capului, astfel încât, într-un singur ciclu să poată fi numerizată o cât mai mare parte a suprafeței reperului cu geometrie complexă. Mai mult, în anumite dispuneri ale reperului pe masa

mașinii se poate asigura chiar scanarea în integralitate a reperului respectiv, crescându-se considerabil eficiența procesului [36], [50].

c) *Sistemul Metris LC15*

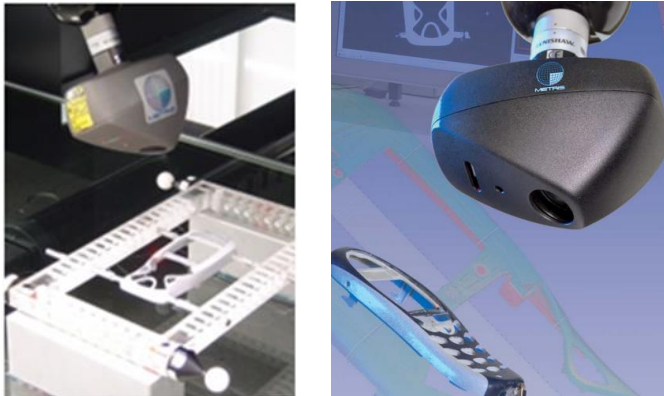


Fig. 2.2.3 Captorul Metris LC 15 [37]

Utilizarea acestor variante de traductoare în componența capetelor de scanare se înscrie în tendința tot mai acută de a scana și/sau inspecta obiecte de dimensiuni din ce în ce mai mici, dar cu o acuratețe și precizie tot mai ridicate. Acest tip de captor permite scanări cu densități de puncte ridicate chiar și pentru repere de mici dimensiuni, cu geometrii complexe.

Printre avantajele acestui tip de traductor se pot enumera:

- rezoluție și acuratețe înalte ale radiației de tip LASER;
- greutate redusă;
- compatibil cu capetele de măsurare *Renishaw PH10* (cele mai des utilizate);
- este ușor de programat;
- poate fi adaptat cu ușurință pe majoritatea MMC [37].

Aceste tipuri de traductoare pot fi utilizate cu succes la:

- scanarea reperelor cu geometrie complexă, de mici dimensiuni, de exemplu telefoane mobile, palete de turbine [3], [5], [6];
- ingineria inversă, în scopul unei precizii ridicate.

Principalele caracteristici tehnice ale acestor categorii de captoare sunt următoarele:

- distanța optimă de scanare: 65 mm;
- precizia: 8 μm ;
- viteza de scanare: 19.200 puncte / secundă;
- greutate: 302g [37].

d) *Sistemul Metris LC50* este unul de uz general în cadrul sistemelor de scanare pe principiul radiației LASER, având și acesta o viteză de scanare de până la 19.200 puncte / secundă, fiind, de asemenea compatibil cu capul de măsurare PH10M (figura 2.2.4).

Avantajele acestui tip de captor sunt:

- viteza de scanare relativ ridicată (până la 19.200 puncte / secundă);
- compatibilitate cu capetele de măsurare PH10M și MQ ale companiei Renishaw;
- greutate redusă;
- calitate ridicată a imaginilor pentru diferite tipuri de suprafețe, în medii diferite;
- ușurință în programare;
- posibilitatea unor proceduri de scanare automată în cazul unor cicluri de măsurare repetitivă, pentru serii medii și mari de repere de același tip și dimensiuni [5], [38].



Fig. 2.2.4 Utilizarea captorului Metris LC50 [38]

Principalele aplicații ale acestui tip de captor:

- inspecția și scanarea unor repere având în componență foite metalice: caroserii, panouri etc.;
- în domeniul automobilelor: inspecția motoarelor, a cutiilor de viteză, a paletelor de turbine, a parbrizelor [3], [5];
- în multimedia: - scanarea carcaselor de telefon.

Caracteristicile tehnice ale captoarelor din seria *Metris LC50* sunt:

- distanța optimă de scanare: 70 mm;
- precizia: 15 μm ;
- viteza de scanare: 19.200 puncte / secundă;
- greutate: 290g [38].

e) *Sistemul Metris XC 50* (figura 2.2.5) este un model revoluționar, utilizat pentru măsurarea diferitor parametri geometrici ai reperelor. Sistemul prezintă un scanner în cruce care conferă o viteză mare de scanare, pe 3 linii de emisie a radiației LASER, oferind o eficiență sporită în numerizarea tridimensională a suprafețelor complexe și foarte complexe [39].

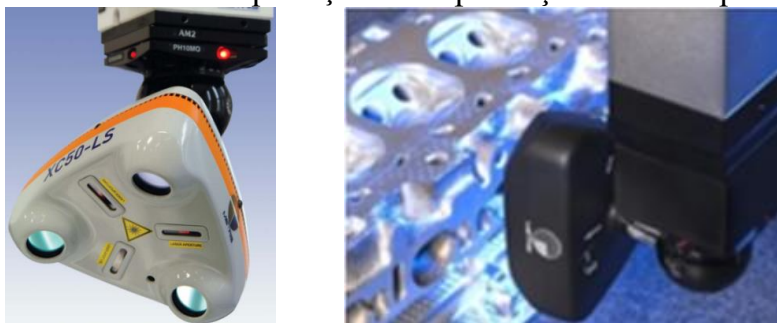


Fig. 2.2.5 Utilizarea sistemului de scanare *Metris XC50* [39]

Principalele avantaje ale acestui sistem sunt:

- scanarea pe 3 linii de emisie a radiației LASER, pe 3 unghiuri diferite – eficiență ridicată;
- compatibilitate cu capetele de măsurare Renishaw PH10;
- ușurință în programare etc.

Printre aplicațiile în care aceste sisteme sunt cu succes utilizate se pot aminti:

- inspecția reperelor confecționate din foite metalice;
- inspecția reperelor confecționate din plastic turnat etc [39].

Caracteristicile tehnice ale captoarelor din seria *Metris LC50* sunt:

- distanța optimă de scanare: 70 mm;
- precizia: 15 μm ;
- viteza de scanare: 3 x 6400 puncte / secundă;
- greutate: 510g;
- dimensiuni: 148 mm x 86 mm x 136 mm [39].

Tot în această categorie se încadrează și sistemul *Metris XC 50 LS* (figura 2.2.6) este un sistem de scanare bazat pe radiația LASER, având în componență 3 camere. Principalul avantaj este acela că acesta permite scanarea reperelor situate și la distanțe mai mari, chiar și până la 180 – 200 mm, ceea ce este foarte util, de exemplu în cazul scanării caroseriilor auto [39].



Fig. 2.2.6 Utilizarea captoarelor din seria *XC 50 LS* pentru scanarea caroseriilor auto [37]

Sistemul se bazează pe tehnologia de scanare în cruce, cu ajutorul a 3 raze LASER, ceea ce permite o măsurare și/sau scanare eficientă a zonelor speciale, cum ar fi degajări, nervure etc., fără a fi necesară o reorientare a sa [39].

Printre avantajele acestui sistem se pot enumera următoarele:

- viteză mare de scanare, de până la 19.200 puncte / secundă;
- permite distanțe mai mari de scanare pentru numerizarea unor suprafețe complexe, cu degajări și nervuri având cote mari de profunzime;

- permite o scanare eficientă, datorită celor 3 raze LASER, fără a mai fi necesară o rotire suplimentară a traductorului în timpul procesului;
- are greutate și dimensiuni reduse.

Printre aplicațiile în care acest sistem poate fi folosit eficient se pot aminti:

- scanarea de componente auto;
- reperi confecționate din foițe metalice etc.

Caracteristicile tehnice ale captoarelor din seria Metris LC50 sunt:

- distanța optimă de scanare: 195 mm;
- precizia: 20 μm ;
- viteza de scanare: 13 x 6400 puncte / secundă;
- dimensiuni: 145 x 103 x 135 mm;
- greutate: 560g [39].

f) *Sistemul Kreon Zephyr KZ 25* (figura 2.2.7)

Acestea sunt printre cele mai performante scannere 3D cu linie LASER, fiind flexibile și eficiente atât pe MMC, cât și pe brațele de măsurare portabile, pretându-se la un domeniu larg de aplicații [1], [5], [40].

Avantajele acestor sisteme sunt:

- viteză și acuratețe de scanare ridicate;
- rezoluție înaltă;
- compatibile cu capetele de măsurare *Renishaw PH10*;
- oferă un grad de flexibilitate mult mai mare decât sistemele clasice de scanare prin contact;
- tehnologie digitală avansată;
- posibilitatea reglării parametrilor camerelor video ai fascicolului LASER și indicatorul de scanare la distanța optimă [40].



Fig. 2.2.7 Sistemul de scanare Kreon Zephyr KZ25 [40]

Aplicațiile acestor sisteme de scanare se referă la ingineria inversă și inspecția calității pentru:

- matrițe și piese turnate;
- suprafețe regulate și neregulate cu geometrii complexe;
- piese realizate din material plastic, injectat;
- piese confecționate din foi metalice;
- pale și aripi de turbine etc [40].

Principalele caracteristici tehnice ale acestor sisteme sunt:

- viteza de scanare: 30.000 puncte pe secundă;
- clasa 2 de siguranță LASER;
- rezoluție de scanare: 3 μm ;
- reproductibilitate cuprinsă între 9 și 15 μm [40].

g) *Sistemul Hexagon CMS 106* (figura 2.2.8) este foarte întâlnit în aplicații de metrologie, cum ar fi inspecția suprafețelor cu geometrii complexe și în procesele de inginerie inversă. Ceea ce deosebește acest sistem de scanare față de celelalte, din punctul de vedere al caracteristicilor, este faptul că acesta

permite o rezoluție variabilă prin posibilitatea utilizării a 3 lungimi pentru linia de scanare [3], [5], [41].

Avantajele utilizării unor astfel de sisteme derivă și din faptul că rezoluția de scanare este variabilă, prin faptul că:

- o linie de scanare poate un număr mare de puncte, acest lucru fiind foarte util pentru numerizarea unei suprafețe mari de măsurare sau a unei zone izolate a acesteia;
- adaptare automată, în timp real, a intensității fascicolului LASER;
- repetabilitate a rezultatelor obținute;
- unghi maxim de măsurare mare (de până la $\pm 60^\circ$) chiar și în cazul suprafețelor prelucrate;
- echipament complet automatizat;
- nu necesită setări complexe;
- compatibil cu diferite dispozitive pentru schimbarea sistemului de măsurare [41].



Fig. 2.2.8 Sistemul de scanare CMS 106 [41]

Caracteristicile tehnice ale acestor sisteme sunt:

- variație a linie de scanare: 60 mm / 80 mm / 120 mm;
- numărul de puncte pe linia de scanare: 1000;
- precizia de scanare: 20 μm .

Printre aplicațiile la care sistemele CMS 106 sunt utilizate pot fi menționate repere confecționate din diferite materiale:

- materiale prelucrate, semifinisate, ștanțate, turnate, forjate;
- metale vopsite;
- miezuri de nisip;
- fibră de carbon, lut, cauciuc, lemn, ceramică, materiale plastice [41], [50].

h) Scannerul Nikon XC65D (figura 2.2.9) este un scanner multilinie și are ca principală caracteristică posibilitatea numerizării tuturor detaliilor geometrice ale reperelor simple, complexe printr-o singură scanare [1], [42].



Fig. 2.2.9 Sistemul de scanare Nikon XC65D [42]

Avantajele principale ale acestor sisteme de scanare sunt:

- eficiență sporită în procesele de scanare, datorită posibilității de digitizare rapidă a suprafețelor complexe;
- adaptare inteligentă a intensității fascicolului, ceea ce face posibilă scanarea oricărei suprafețe, fără intervenția utilizatorului;

- prin pozițiile și orientările fascicolelor se elimină necesitatea reorientării scannerului la numerizarea unor geometrii complexe;
- viteză de scanare net superioară comparativ cu alte sisteme de scanare bazate pe principiul LASER;
- adaptare ușoară la majoritatea CMM [42], [43].

Caracteristicile principale ale acestui tip de scanner sunt:

- tehnologie digitală de mare viteză;
- tehnologie de scanare cu LASER, multi-linie, ce permite numerizarea reperului din 3 direcții;

- varianta XC65D-LS are o distanță de scanare mai mare, optimă pentru numerizarea alezajelor adânci sau a canelurilor;
- posibilitatea adaptării intensității fascicolului LASER, pentru fiecare punct în parte al suprafeței numerizate;
- viteza de scanare: 3 x 25.000 puncte/secundă, pentru modul de scanare în cruce și 75.000 puncte/secundă pentru modul de scanare în linie;
- distanța de scanare: 75 mm;
- precizia de scanare: 15 μm;
- clasa de siguranță LASER: 2;
- compatibilitate cu gama capetelor de măsurare Renishaw PH10M(Q) [42], [44].

Principalele aplicații ale acestui sistem sunt:

- inspecția caroseriilor de automobile;
- inspecția pieselor turnate;
- inspecția pieselor din material plastic;
- verificarea dimensională a unor reperi cu geometrii complexe (de exemplu blocuri motoare cu alezaje adânci) [42].

i) Sistemul Nikon LC15 (figura 2.2.10)

Deoarece în multe procese de inspecție dimensională există nevoia crescândă de a inspecta obiecte cu dimensiuni mici și foarte mici, dar cu o precizie ridicată. Pentru aceasta s-a dezvoltat scannerul din seria Nikon LC15, care, datorită câmpului de vedere mic asigură o acuratețe și densitate de puncte ridicate, necesare scanării reperelor mici și cu geometrie complexă cu câmpuri de toleranțe mici [1], [5], [6], [45].

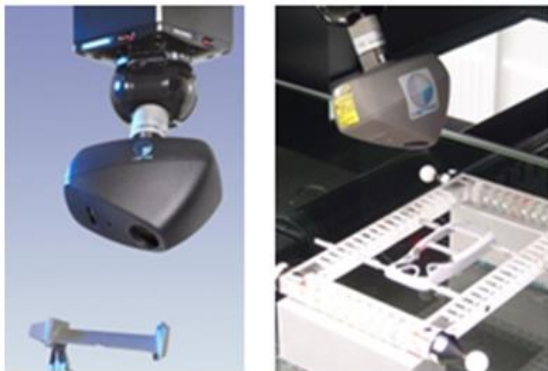


Fig. 2.2.10 Sistemul de scanare Nikon LC 15 [45], [46]

Avantajele acestui sistem de scanare sunt următoarele:

- posibilitatea inspectării de reperi mici, cu precizie ridicată;
- scanare eficientă, datorită densității ridicate de puncte și a vitezei de scanare;
- rezoluție și acuratețe ridicate ale razei LASER;
- robustețe;
- greutate redusă;
- compatibilitate cu capetele de măsurare Renishaw;
- calibrare automată a orientărilor;
- adaptabil cu ușurință pe majoritatea MMC [45].

Principalele caracteristici ale acestor sisteme sunt următoarele:

- viteza de scanare: 19.200 puncte/secundă;
- câmp de vedere: 15 x 15 mm;
- distanța de scanare: 65 mm;
- clasa de siguranță LASER: 2 [45], [46].

Printre aplicațiile acestui sistem se pot enumera:

- obiecte mici și complexe: telefoane mobile, pale de turbină;
- ingineria inversă.

2.3 Sisteme portabile pentru scanarea în coordonate a suprafețelor tridimensionale complexe

Un aspect deosebit de important se referă și la numerizarea rapidă a reperelor amplasate în zone în care nu pot fi transportate mașinile în coordonate, cum ar fi conducte, țevi, elemente din

compența instalațiilor. O serie de aplicații ale acestor sisteme de scanare portabile se regăsesc și în ortopedie, cum ar fi: măsurarea și/sau scanarea unor orteze sau proteze de picior, scanarea conformației picioarelor etc.) [47], [48]. Printre sistemele portabile de ultimă oră se pot aminti:

a) *Artec Eva 3D Scanner* (Figura 2.3.1)



Fig. 2.3.1 Sistemul de scanare portabil *Artec Eva 3D Scanner* [49]

Aceste sisteme de scanare se bazează pe o cameră video care achiziționează imagini 3D, cu posibilitatea alinierii imaginilor în timp real, ceea ce asigură o scanare rapidă și ușoară. Achiziția imaginilor este posibilă datorită fenomenului de reflexie a radiației ce ajunge pe suprafața elementului supus scanării.

Avantajele utilizării acestui mijloc de măsurare sunt:

- posibilitatea scanării în timp real;
- reperatele scanate nu necesită elemente de marcaj speciale;
- ușurință în utilizare;
- posibilitatea scanării chiar și a obiectelor aflate în mișcare;

- sistemul este ușor de manevrat și de transportat;
- datorită vitezei de scanare foarte ridicate, acest sistem să devine de câteva ori mai rapid decât sistemele clasice de scanare cu sursă LASER;
- se pretează pentru un domeniu larg de aplicații, inclusiv pentru captarea de imagini ale obiectelor aflate în mișcare, de diferite texturi și cromatici [49].

Printre principalele caracteristici tehnice și funcționale ale acestui sistem se pot aminti:

- posibilitatea achiziționării de până la 16 cadre / secundă;
- viteze de scanare de până la 500.000 de puncte / secundă.

Printre aplicațiile acestui sistem se pot enumera:

- domeniul medicinei – reconstituirea prin scanare a modelelor faciale, dentare etc.;
- domeniul biomecanicii – scanarea și modelarea diferitor forme și texturi de proteze și orteze;
- domeniul industrial – scanarea și-sau modelarea unor componente de mici dimensiuni, din domeniul auto;
- domeniul construcțiilor – scanarea conductelor, a țevilor de instalații etc [47], [48], [50].

b) *Artec Spider 3D Scanner* (Figura 2.3.2). Bazat tot pe achiziția de imagici în timp real, cu ajutorul mai multor micro-camere video încorporate, acesta este un sistem de scanare destinat utilizatorilor CAD și pentru reconstituirea modelelor prin tehnica ingineriei inverse [51].



Fig. 2.3.2 Sistemul de scanare portabil *Artec Spider 3D Scanner* [51]

Specificațiile tehnice, din care rezultă avantajele utilizării acestor sisteme de scanare sunt menționate după cum urmează:

- rezoluție de scanare înaltă, de până la 0,15 mm;
- acuratețe de măsurare ridicată (0,03 ÷ 0,05 mm);
- greutate redusă, ușurință în manevrare;
- capacitate de a detecta muchii ascuțite și pereți subțiri;
- autonomie a bateriei de ordinul orelor;
- scanare ultra-rapidă (sistemul poate scana de până la de 10 ori mai rapid decât sistemele clasice cu sursă LASER);
- scanează și reproduce modelul CAD al piesei în timp real [51].

Printre aplicațiile principale ale acestui sistem de scanare se pot enumera:

- domeniul industrial: - designul de produs și controlul calității produselor, în cadrul producției de masă; prototipare rapidă;
- domeniul biomecanic: - scanarea și prototiparea rapidă a unor proteze, orteze externe [47], [48];
- domeniul bio-medical - reproducerea modelelor faciale, dentare etc [47], [51].

c) *Rexcan 4 3D Scanner* (figura 2.3.3) este un sistem de digitizare 3D de talie mondială, bazat pe tehnologia emisiei de radiație albă compusă, conducând spre o nouă eră a digitizării 3D, cu precizie ridicată, flexibilitate și comoditate în utilizare.



Fig. 2.3.3 Sistemul de scanare portabil
Rexcan 4 3D Scanner [52]

Caracteristicile tehnico-funcționale și avantajele, care derivă din acestea, sunt:

- precizie ridicată: - sistemul se bazează pe fenomenul de triangulație optică, prin deplasare în 4 faze, utilizând o serie de camere CCD similare, dispuse vectorial sau matriceal, cu rezoluție fină, pentru achiziția datelor de înaltă acuratețe; se asigură astfel o eroare de cel mult 10 μm la scanarea suprafețelor; prin acesata se garantează fiabilitate în măsurări și scanări de înaltă precizie și acuratețe, în toate aplicațiile la care sistemul poate fi utilizat [52];

- flexibilitate crescută: sistemul *Rexcan 4* poate realiza scanări de micro-suprafețe de adâncime și de apropiere ale diferitor obiecte cu geometrii complexe, datorită unui unghi de triangulație de 10°, pentru adâncimea de penetrare multă mărită în raport cu diametrului spotului luminos. Sistemul generează 24 de volume de scanare, adaptabile pentru dimensiuni variabile ale obiectelor, fiind capabil să realizeze inclusiv numerizări de obiecte de mari dimensiuni, cu lungimea diagonalei de până la 1,5 metri. Cu ajutorul unui set de lentile (cu care sistemul este livrat) se pot obține instantaneu 4 volume de scanare, prin utilizarea diferitor locașuri de dispunere a camerelor de achiziție [50], [52];

- ușurința în exploatare derivă din faptul că procesul este rapid și ușor de realizat. În ceea ce privește durata de scanare este necesară doar o secundă pentru o singură etapă de numerizare (a unei zone finite din suprafața reperului scanat). Obținerea rapidă a unor modele continue, fără întreruperi, fără nivel mare de zgomot, este posibilă datorită modului de expunere ridicată pentru suprafețele întunecate. Din punctul de vedere al ușurinței de manevrare, sistemul este dotat și cu o telecomandă specială. Referitor la procedeul de numerizare, sistemul are capacitatea de a procesa rapid datele, prin integrarea de funcții de automatizare a etapelor de lucru specifice preluării și interpretării datelor în timpul procesului de numerizare. Un alt avantaj derivă din faptul că sistemul software specific permite prelucrarea datelor de tip coordonată a milioane de puncte de scanare. Procedura simplă și rapidă de calibrare a sistemului, ce durează doar aproximativ 5 minute este un alt aspect al ușurinței în cazul utilizării acestui sistem de scanare [3], [48], [50], [52].

Aplicațiile principale ale acestui sistem de scanare se regăsesc în:

- domeniul industrial: - designul de produs;
 - controlul calității produselor, în cadrul producției de masă;
 - prototipare rapidă [46], [63];
- domeniul biomecanic: - scanarea și prototiparea rapidă a unor proteze, orteze externe.

d) *Surveyor Space Arms* (figura 2.3.4) reprezintă acea categorie a sistemelor de scanare de tip braț mobil de scanare în coordonate, 3D, bazate pe sistemele de măsurare prin emisie de radiație LASER.



Fig. 2.3.4 Sistemul de scanare cu sursă LASER, de tip brațe mobile, Surveyor Space Arms [53]

Specificațiile tehnice din care derivă avantajele ale acestui sistem de scanare sunt prezentate mai jos:

- braț mobil cu acuratețe înaltă;
- rapid, flexibil și ușor de utilizat;
- prezintă mai multe opțiuni de utilizare, în funcție de aplicațiile de măsurare / scanare la care este folosit;
- prezintă sistem electromagnetic de frânare (amortizare);
- domeniul de măsurare poate varia între 1,8 și 9 metri, cu acuratețe de scanare între 1 și 10 mm;
- prezintă sistem de compensare a variațiilor de temperatură;
- sistemul de scanare cu sursă LASER (SLP Laser Probe) asigură viteze de scanare de până la 50.000 de puncte de coordonate / secundă;

- kitul de scanare este livrat în 3 game de dimensiuni ale capetelor de scanare (de la 33 mm la 250 mm), ceea ce îi conferă sistemului capacitatea de a scana zone de suprafață foarte detaliate, precum și zone foarte întinse de suprafață, cu acuratețe de aproximativ $\pm 0,04 \div 0,05$ mm;
- sistemul de brațe mobile este disponibil în variante pe 5, 6 sau 7 axe de coordonate, ceea ce face ca aceste variante mobile să poată completa cu succes mașinile în coordonate fixe (cu costuri de aproximativ 2 ori mai mari);
- acuratețea de poziționare a brațelor mobile este de $\pm 0,002 \div \pm 0,008$ mm;
- sistemul software permite o procesare rapidă și ușoară a datelor de scanare 3D, atât pentru rapoarte privind inspecția calității produselor, cât și pentru aplicații privind ingineria inversă;
- sistemul permite o scanare directă în mediile software Geomagic, Rapidform și PolzWorks;
- sistemul software este compatibil cu diferite medii software pentru modelarea CAD: Geomagic Probe, Verisurf, TouchDMIS, DelcamPowerINSPECT, CMM Manager, Metrolog XG [53].

Aplicațiile de utilizare a brațelor de măsurare din seria *Surveyor Space Arms* se referă la:

- domeniul industrial – scanarea caroseriilor de autovehicule;
- domeniul construcțiilor – conducte de canalizare, țevi etc.

e) *Geomagic Capture Scanner* (figura 2.3.5) reprezintă un sistem portabil de scanare 3D pentru inspecția calității, respectiv pentru proiectarea CAD-CAM pe baza scanării modelelor [54].



Fig. 2.3.5 Sistemul portabil de scanare 3D, Geomagic Capture Scanner [54]

Caracteristicile tehnice și avantajele utilizării acestui sistem sunt:

- capul de măsurare este echipat cu un sistem de scanare de tip LED, în lumină de culoare albastră;
- sistem software ușor de utilizat în vederea reconstituirii modelului CAD al reperului scanat [54];
- sistemul software permite verificarea calității reperelor scanate, din punctul de vedere dimensional, putându-se măsura virtual cotele, direct pe modelul CAD generat prin scanare. Principalele aplicații ale utilizării acestor sisteme de scanare se regăsesc:

- în domeniul industriei (domeniul auto, al producției de serie, al producției de prototipuri etc.);
- în domeniul biomecanic – obținerea modelelor CAD a diferitor tipuri de proteze.

f) *Rexscan CS + 3D Scanner* (figura 2.3.6), ca și sistemul *Geomagic Capture Scanner*, reprezintă o soluție fiabilă pentru aplicațiile în domeniul ingineriei inverse [55].

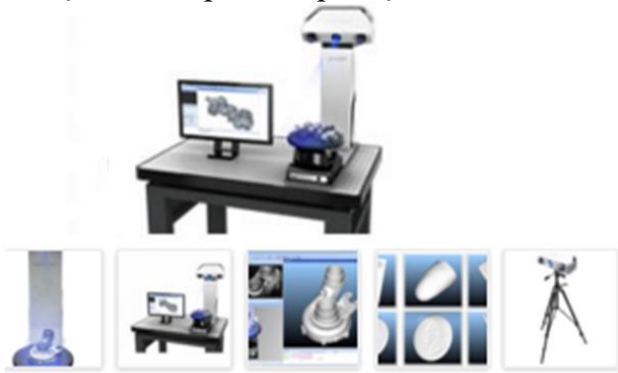


Fig. 2.3.6 Sistemul de scanare 3D, *Rexscan CS+3D Scanner* [55]

Principalele avantaje ale acestui sistem derivă din următoarele specificații tehnice:

- utilizează tehnologia LED-ului în lumină albastră, implicând un consum redus de energie;
 - integrează senzorică și controller-ul într-un singur sistem de măsurare;
 - include o gamă largă de variante de scanare, și anume la distanțe de: 100mm, 200 mm și 400 mm;
 - rezoluția camerei de captare a imaginilor este de 2 megapixeli;
 - sistemul este unul portabil, ușor de transportat, cu dimensiunile de gabarit de 400 x 110 x 210 mm;
- ideal pentru măsurarea, respectiv scanarea și reconstrucția modelelor CAD a reperelor simple și complexe de dimensiuni mici și medii;
 - precizia de măsurare: $\pm 0,02$ mm.
 - sub-sistemul de scanare automată și de sincronizare activă permite ca printr-o simplă comutare a unui buton se poate genera foarte rapid procesul de scanare; mai mult, prin aceasta se realizează o sincronizare aproape perfectă a procesului de scanare a modelului cu cel de generare a imaginii cu ajutorul camerelor; astfel, operatorul poate ușor să recunoască fiecare poziție de scanare, în parte și, după caz, poate să realizeze și să integreze mai multe scanări acolo unde este necesar (pentru o rezoluție și acuratețe mai bune);
 - nu este necesară o aliniere manuală, prealabilă a reperului scanat sau măsurat: prin utilizarea informațiilor privind calibrarea axelor, se efectuează o aliniere de mare precizie, în mod automat;
 - procesul de scanare este unul foarte simplu: pentru scanări complexe ce necesită procedul „Patch”, sistemul Rexcan oferă flexibilitatea generării automate a traiectoriei de scanare de tip „Patch”, permițându-i operatorului să creeze propria traiectorie de scanare, permițând repetarea în mod automat a algoritmului de preluare a datelor, în mod similar, pentru diferite dimensiuni și forme ale obiectelor [48], [55];
 - calibrarea în mod automat: dacă pentru versiunile mai vechi, procesul de calibrare a sculelor de măsurare era extrem de important, dar, totodată dificil de realizat, în noua versiune, prin instalarea accesoriului software specific procesului de calibrare automată, această problemă este mult simplificată: printr-o simplă accesare a pictogramei de calibrare, utilizatorul este ghidat foarte simplu și rapid în realizarea procesului de calibrare automată a sculelor de măsurare; prin acest sistem, procesul de calibrare automată a sculelor de măsurare devine unul accesibil și chiar atractiv pentru orice utilizator [48], [55].
 - opțiunea *Tripod – Rexcan CS*: în cazul în care este necesar să se scaneze obiecte mai mari sau mai grele decât cele specifice în mod obișnuit acestui sistem, se poate proceda la detașarea simplă și rapidă a capului de scanare de corpul întregului sistem; capul de scanare se poate instala pe un alt trepied sau stand de măsurare, mai mare;
 - poate fi instalat chiar la biroul utilizatorului: pentru sarcini regulate privind operații de scanare periodice, nu este necesară deplasarea scannerului 3D, respectiv nu este necesară deplasarea operatorului la standul de scanare (dispus în altă parte decât la birou). Prin aceasta, utilizatorul se va putea concentra și dedica și mai bine sarcinilor zilnice ce-i revin la serviciu [55].

g) *Rexscan DS3 Scanner* (figura 2.3.7) este un scanner 3D cu structură ușoară, dedicat reperelor de mici dimensiuni, specifice fiind viteza și precizia de scanare foarte ridicare [56].



Fig. 2.3.7 Sistemul DS3 Scanner [56]

Printre principalele avantaje rezultate din caracteristicile tehnice și funcționale ale scannerului 3D, DS3 se pot enumera următoarele:

- viteză sporită;
- flexibilitate;
- precizie;
- simplitate în ceea ce privește numerizarea pieselor de mici dimensiuni;
- camera dublă de achiziție a imaginilor oferă o precizie net superioară și o linie de scanare mai mare, în comparație cu o cameră simplă;
- scanarea rapidă permite o scanare completă în doar 3-4 minute a unui obiect, fără a fi afectată precizia de numerizare;
- compatibilitate cu majoritatea mediilor software de design; permite generarea de fișiere de tip .STL ale reperelor scanate, compatibile cu majoritatea mediilor CAD cele mai frecvent utilizate;
- prezintă 2 axe de deplasare (de basculare și de rotire);
- sistemul este disponibil în 2 versiuni:
 - DS3 SILVER, cu rezoluția de scanare de 1.3 megapixeli și linia de scanare de 100 mm;
 - DS3 GOLD, cu rezoluția de scanare de 5.0 megapixeli și linia de scanare de 100 mm, respectiv de 40 mm [56].

Principalele aplicații ale acestui sistem de scanare sunt următoarele:

- confecționarea bijuteriilor
- industrie (mecanică de precizie, robotică etc.);
- structuri dentare [56].

h) *Handy Scan 300 TM / 700 TM* (figura 2.3.8) este unul dintre sistemele cele mai eficiente din punctul de vedere al ingineriei inverse și/sau al design-ului [57].



a)

b)

Fig. 2.3.8 Sistemul Handy Scan: a) modelul 300TM;
b) modelul 700 TM [57]

Principalele caracteristici tehnice sunt specificate după cum urmează:

- greutate: 0,85 kg;
- dimensiuni de gabarit: 77 x 122 x 294 mm;
- rata de măsurare: modelul 300 TM: 205 măsurări/s; modelul 700 TM: 480 măsurări/s;
- aria de scanare: modelul 300 TM: 225 x 250 mm; modelul 700 TM: 275 x 250 mm;
- sursa de radiație: modelul 300 TM: 3 spoturi LASER în formă de cruce; modelul 700 TM: 7 spoturi LASER în formă de cruce;
- tipul radiației LASER: 2M;
- rezoluția de scanare: - modelul 300 TM: 0,1 mm;
- modelul 700 TM: 0,05 mm;
- precizia de scanare volumetrică: - modelul 300 TM: 0,02 ÷ 0,1 mm / m;
- modelul 700 TM: 0,02 ÷ 0,06 mm / m;
- precizia de scanare volumetrică (cu extensia MaxShot 3D): 0,02 ÷ 0,025 mm/m;
- distanța – limită de scanare: 300 mm;
- profunzimea câmpului de radiație LASER: 250 mm;

- gama de dimensiuni ale reperelor scanate (recomandat): 0,1 ÷ 4 m;
- mediul software: Vxelements;
- formatele fișierelor generate: .dae, .fbx, .ma, .obj, .ply, .stl, .txt, .wrl, .x3d, .x3dz, .zpr;
- sisteme software compatibile: 3D Systems (Geomagic R Solutions), InnovMetric (PolyWorks), Dassault (CATIA V5 și SolidWorks), PTC (ProEngineer), Siemens (NX și Solid Edge), Autodesk (Inventor, Alias, 3ds Max, Maya, Softimage);
- conexiuni standard: 1 x USB 3.0;
- domeniul temperaturii de lucru: 5 ÷ 40°C;
- domeniul umidității în zona de lucru (fără condens): 10 ÷ 90% [57].

Printre principalele aplicații ale acestui sistem se pot enumera:

- industria auto (caroserii, șasiuri etc.);
- construcții.

f) *Hexagon HP-L-20.8 Laser Scanner* (figura 2.3.9) [58]



Sistemul *HP-L-20.8* cu scanner LASER este o soluție pentru brațele mobile *ROMER Absolute Arm SE*, caracterizat prin următoarele avantaje și specificații tehnice:

- asigură o achiziționare rapidă a norului de puncte;
- sistem portabil, ușor de utilizat;
- prezintă 5 linii de scanare, ajustabile;
- rată de scanare de până la 150.000 puncte / s;
- distanța minimă între punctele de coordonate achiziționate: 0,013 mm;
- gamele de lățimi ale scannerului: 220 mm / 130 mm / 63 mm / 51 mm / 25 mm;
- controller-ul extern: nu este necesar;
- siguranța radiației LASER: clasa 2;
- temperatura de lucru: 5 ÷ 40°C [58].

Fig. 2.3.9 Sistemul *Hexagon HP-L-20.8* [58]

Printre principalele aplicații ale acestui sistem de scanare se pot aminti:

- inspecția reperelor în raport cu modelele CAD;
- inspecția suprafețelor neregulate, raportate la modelele CAD specifice;
- ingineria inversă;
- o gamă foarte mare de aplicații metrologice [58].

g) *Hexagon Absolute Arm – 6 Axis* (figura 2.3.10) [59]



Caracterizându-se printr-un mecanism foarte ergonomic de articulații ale brațelor, urmărind conturul și mișcările naturale, specifice mâinii operatorului, sistemul *Absolute Arm – 6 Axis*, prezintă o serie de alte avantaje:

- feed-back-ul senzorial permite utilizatorului să facă măsurători chiar și în încăperi cu cele mai dificile condiții de lucru (praf, vibrații, umiditate sporită, nivel mare de zgomot, variații mari de temperatură etc.);
- s-a dovedit a fi sistemul cel mai rapid și ușor de utilizat în industrie;

Fig. 2.3.10 Sistemul *Absolute Arm – 6 Axis* [59]

- sub-sistemul de schimbare rapidă și inteligentă a capetelor de scanare nu necesită scule speciale sau vreo recalibrare după schimbarea lor;
- datorită sistemelor de codificare a semnalelor, poziția brațelor poate fi monitorizată în permanență, eliminându-se procedura complexă de inițializare, prin revenirea în origine a brațelor de scanare;
- soluția dispunerii unui tub dublu din fibră de carbon (ce protejează senzorii de poziție) face ca modificările de temperatură să nu afecteze calitatea procesului de măsurare și scanare [59].

h) Hexagon RS3 Integrated Scanner (figura 2.3.11) [60]



Fig. 2.3.11 *RS3 Integrated Scanner* [60]

Datorită posibilității de a măsura și scana în mod selectiv (prin contact cu obiectul sau cu ajutorul radiației LASER), acest sistem devine unul dintre cele mai flexibile și practice pentru diferite aplicații și categorii de obiecte scanate.

Printre principalele avantaje de rezultă din caracteristicile tehnice, se pot menționa:

- rată de scanare dublă în comparație cu versiunea precedentă, RS2; ca urmare, utilizatorul poate scana aceleași tipuri de repere dar într-un timp înjumătățit;
- densitate crescută a norului de puncte, ceea ce conduce la o precizie mare de scanare.

Printre principalele aplicații se enumeră: digitizarea 3D, analiza comparativă a produselor de referință; asamblarea virtuală, ingineria inversă, prototiparea rapidă și posibilitatea unor prelucrări pe mașinile cu comandă numerică [60].

i) Perceptron Smart 3D (figura 2.3.12) [61]



Fig. 2.3.12 *Perceptron Smart 3D* [61]

Smart 3D reprezintă un sistem de scanare foarte accesibil, prevăzut cu o masă rotativă, permițând o scanare completă, fără a mai fi necesară vreo re poziționare, respectiv a reperului, respectiv aliniere a sistemului de scanare față de acesta. Caracteristicile tehnice și avantajele sunt prezentate mai jos:

- volumul de scanare: 200 x 225 x 225 mm;
- sistemul software, SCANWORKS STUDIO este unul intuitiv, permite o îmbunătățire a proiectelor ce se bazează pe ingineria inversă și pe design;

- prin utilizarea opțiunii "auto rescan" ce permite scanarea linie cu linie, prin suprapunere, se poate realiza totodată și imprimarea 3D, prin generarea de fișiere de tip .STL [48], [50], [61].

j) Proto 3000 3D Laser Scanning (figura 2.3.13)

Acesta se remarcă prin măsurări rapide și corecte, datorită celui mai precis scanner portabil 3D de pe piață, din prezent [62]. Principalele sale avantaje ce rezultă din caracteristicile tehnice și funcționale sunt prezentate după cum urmează:

- scannere pe principiul LASER portabile viabile pentru inovații tehnologice;
- accesorii 3D robuste și eficiente;
- scannerele 3D pe principiul LASER îi permit utilizatorului să detecteze proprietățile fizice ale unui obiect, în condițiile unei măsurări foarte eficiente și precise;

- linia de scanare 3D scoate în evidență portabilitatea acestei remarcabile tehnologii; chiar și reperele cele mai mari pot fi scanate datorită mobilității scannerelor HandyScan [50], [62];

Scannerele LASER 3D sunt utilizate în diferite industrii unde inspecția și analiza produselor sunt de o maximă importanță, ca urmare a următoarelor considerente [62]:

- aceste tipuri de scannere LASER sunt ușor de utilizat, mărind considerabil eficiența și productivitatea;

- alinierea scannerelor LASER 3D permite chiar realizarea de laboratoare metrologice, după necesitate;



Fig. 2.3.13 Sistemul Proto 3000 3D
LASER scanning [62]

- aceste sisteme de scanare folosesc optica specifică pentru transmiterea a trilioane de fotoni către un obiect, receptând înapoi doar un mic procent din fotonii emiși; datorită acestei tehnici, aceste scannere 3D sunt capabile să reproducă foarte rapid modele 3D ale diverselor obiecte, fără a mai fi necesare operații minuțioase de măsurare, care luau foarte mult timp, cum era în cazul utilizării aparatelor de măsurare clasice;

- scannerele 3D ilustrează și descriu informațiile unor puncte de referință specifice în raport cu obiectele selectate;

- mai mult, tehnologia înaltă a acestor capete de scanare permite ca fotonii emiși să verifice calitatea suprafețelor obiectelor, la viteza luminii [62], [63].

Printre principalele aplicații ale acestui sistem se pot aminti:

- modelarea reperelor tridimensionale;

- ingineria inversă în aplicații post-proces [62].

Sistemul FaroArm (figura 2.3.14) reprezintă o soluție inovativă pe plan mondial privind măsurările portabile [64].



Fig. 2.3.14 Sistemul portabil Faro Arm [64]

Caracteristicile tehnice și avantajele acestor sisteme sunt prezentate mai jos:

- prin dispunerea capului de scanare *FARO LASER Line Probe* la brațele portabile, se obțin performanțe foarte înalte în privința măsurării detaliate a formelor suprafețelor, făcând ca sistemul să devină o combinație perfectă între o MMC portabilă pe principiul măsurării prin contact și, totodată fără contact;

- volumul de lucru al acestor sisteme de scanare este prezentat în tabelul 2.1.

Faro Arm este o MMC portabilă permițând fabricanților verificări simple și rapide a calității produselor, cu ajutorul tehnologiei de inspecție 3D, printre principalele aplicații putându-se enumera:

- certificări ale sculelor pe prelucrare;

- comparare de modele CAD;

- analize dimensionale;

- inginerie inversă [64].

Tabelul 2.1 Volumul de lucru și repetabilitatea sistemelor de scanare portabile Faro Arm [64]

Volumul de lucru (m)						
	1,2	1,8	2,4	2,7	3	3,7
Repetabilitatea (mm)						
Versiunea Edge		0,024		0,029		0,064
Versiunea Prime	0,016	0,019	0,024		0,042	0,060
Versiunea Fusion		0,036	0,043		0,074	0,104

k) *Sistemul de scanare ExaScan* (figura 2.3.15) este dedicat scanării de repere de dimensiuni mici și medii, având avantajul achiziției de imagini în timp real, sistemul fiind unul foarte eficient din punctul de vedere al obținerii rapide a modelelor CAD; scanerul din seria *ExaScan* permit generarea și exportul de fișiere cu extensia .IGS și .STL, fiind ulterior relativ ușor de prelucrat [63], [65].



Fig. 2.3.15 Prezentarea sistemelor portabile de scanare din seria *ExaScan* [65]

Principiul de funcționare al acestora se bazează pe emisia de radiație LASER, pentru obținerea unei precizii mai bune de scanare fiind recomandat ca reperele să fie confecționate din materiale cu grad relativ redus de reflexie; mai mult, se recomandă ca pe obiectul scanat să se dispună marcatori (plasați echidistant), pe cât posibil în concordanță cu dispunerea acestora pe placa de calibrare, aceasta în scopul obținerii unei rezoluții cât mai bune a modelului CAD;

Caracteristicile tehnice și funcționale ale acestor tipuri de scannere sunt prezentate în tabelul 2.2:

Tabelul 2.2 Caracteristicile tehnico-funcționale ale sistemelor de scanare *ExaScan* [65]

Domeniul de măsurare [mm]	$\pm 22,5$
Rata de măsurare [nr cicluri de măsurare (emisie-recepție)/s]	25000
Rezoluția de măsurare [mm]	0,05
Distanța de scanare [mm]	300

Sistemele de scanare *ExaScan* sunt prevăzute cu interfețe software care permit deopotrivă calibrarea scannerului, înainte de începerea sesiunii de lucru, cosmetizarea modelului CAD obținut și exportul modelului CAD în fișiere compatibile cu medii consacrate precum CATIA, ProEngineer, SolidWorks, ANSYS etc (figura 2.3.16).

Aceste scannere au aplicații în domenii precum: industria auto (arbori, turbine, roți dințate), biomecanică (proteze, orteze), artă (transpunerea în format digital a picturilor, sculpturilor etc.) [1], [63]. Avantajul major al acestor sisteme manuale de scanare este acela că procedura este una ușoară, rapidă și foarte practică. Singurul aspect care necesită o atenție deosebită este cel referitor la etapa premergătoare numerizării, și anume procesul de calibrare a sistemului (figura 2.3.16, a).

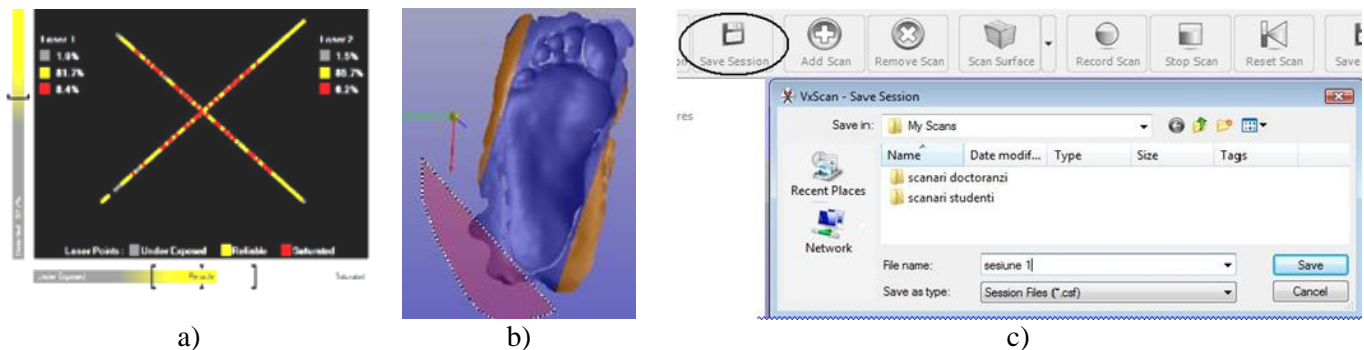


Fig. 2.3.16 Etape de lucru cu interfața software asociată modelelor ExaScan: a) etapa de calibrare a scannerului; b) etapa de cosmetizare a modelului scanat; c) Etapa de salvare în fișiere compatibile cu medii de modelare CAD-CAM [63], [65]

2.4 Companii producătoare de MMCO cu sisteme de numerizare cu sursă LASER

În ultimele decenii s-au dezvoltat o serie de companii și concerne internaționale specializate în echipamente de măsurare și control al calității produselor, printre care se disting mașinile de măsurare în coordonate, deosebit de utile și eficiente în acest scop. Mai mult, în ultimii ani, cercetările acestor companii în dezvoltarea și perfecționarea continuă a MMC cu sisteme de măsurare și scanare fără contact, pe principiul emisieii radiației LASER au cunoscut o continuă amploare [5], [6].

Printre companiile producătoare de MMC și sisteme de scanare pe principiul pe principiul radiației LASER, cele mai cunoscute pe plan mondial la ora actuală se pot menționa următoarele:

2.4.1 Nikon Metrology (Japonia)

Nikon Metrology reprezintă un brand de renume mondial, considerat ca fiind, la origine, lider domeniul instrumentației optice, specializată pe microscopie și sisteme optice și optometrice, ulterior specializat și în domeniul echipamentelor și sistemelor de măsurare în coordonate, având la bază principii optice (figura 2.4.1) [66].



Fig. 2.4.1 Prezentarea brandului companiei Nikon Metrology [66]

Compania japoneză *Nikon* s-a înființat în anul 1917, când trei fabricanți de componente optice s-au unit în vederea constituirii unei companii, cunoscută la acea vreme sub denumirea *Nikon Kogaku Japan Optics*, remarcându-se prin producerea de sticlă optică specială. În anul 1925 compania și-a extins activitatea în scopul producerii primului microscop având suportul obiectivelor rotativ și obiective interschimbabile, microscopul Joico. Următoarele câteva decade au adus o creștere puternică în domeniul perfecționării în domeniul microscopiei, dezvoltându-se microscopie inovative stereo, cu sisteme de polarizare. *Nikon* a introdus și a dezvoltat conceptul de sisteme pentru inspecția pe principiul optic cu aplicații industriale, cum ar fi: comparatoare optice, auto-colimatoare. În anii 1970 au dezvoltat microscopie Optiphot și Labphot, iar în anii '80 compania a lansat peste 80 de produse. Anii '90 au adus încă și mai multe inovații prin introducerea gamei de sisteme optice Eclipse Infinity. Începutul mileniului III a însemnat explozia imagisticii digitale ca soluție în domeniul microscopiei,

iar compania *Nikon* a condus încă o dată piața în promovarea camerelor digitale performante și fiabile în acest scop. Introducerea seriei de camere DS și Coolscope anunța un mare progres în ceea ce privește transferul imaginilor, pe plan mondial [66].



Fig. 2.4.2 Exemple de produse dezvoltate de compania internațională *Nikon Metrology* în ultimii ani [66]

În privința metrologiei tridimensionale, în ultimul deceniu, compania *Nikon* a dezvoltat o serie de sisteme performante, bazate, evident pe integrarea și utilizarea aparaturii optice de înaltă performanță, cu aplicații atât la MMC, cât și la sistemele de inspecție a calității, respectiv la brațele de măsurare și/sau scanare etc (figura 2.4.2) [66].

- MMC / brațe de măsurare portabile / MMC pe principii optic reprezintă echipamente și sisteme de primă clasă, oferind soluții metrologice pentru o gamă foarte largă de aplicații;
- scannere pe principiul LASER reprezintă următoarea generație digitală (sistemele *LC* și *XC LASER scanning*) permițând inspecții complete și precise ale suprafețelor cu geometrii simple și complexe;
- scannere digitale 3D - ideale pentru dispunerea pe brațele de măsurare articulate, fiind utile pentru diferite tipuri de inspecție a calității, dar și pentru aplicații privind ingineria inversă;
- sisteme multi-senzoriale HN-6060 - ideale pentru metrologia 3D, asigurând eficiență, precizie ridicată, inspecție pe principiul fără contact ale reperelor cu geometrii complexe;
- sisteme bazate pe emisia de raze X – acestea sunt utilizate în tomografia coputerizată; se remarcă prin analiza detaliată în interiorul structurilor reperelor scanate, furnizând imagini digitale de înaltă rezoluție; evident, acestea sunt folosite foarte frecvent și în defectoscopie, pentru depistarea și măsurarea defectelor din structura materialelor (fisuri, incluziuni, impurități etc.);
- sistemele Vision reprezintă mașini cu comandă numerică (CNC) prevăzute cu sisteme de măsurare pe principiu optic, cu posibilitatea generării de imagini digitale pentru inspecția calității suprafețelor pe principiul fără contact, având ca avantaje productivitate maximă și precizie ridicată;
- microscopie și sisteme de inspecție optică - specializate în domeniul măsurărilor industriale și analiza imaginilor, destinate pentru controlul digital complex și complet, cu acuratețe maximă de măsurare;
- microscopie industriale – utile pentru o gamă largă de aplicații privind inspecția vizuală; acestea s-au adăugat de curând la portofoliul microscopelor clasice, oferind utilizatorilor o manipulare simplă și rapidă a instrumentelor și permițând măsurări rapide și imagini cu rezoluție mare oriunde este necesar;
- comparatoare optice – robuste, folosite în vederea obținerii de imagini clare, luminoase pentru un domeniu extrem de larg de repere, datorită autocolimatoarelor care asigură o precizie de măsurare excelentă și o mare fiabilitate, în special în cazul măsurărilor de repere plane și/sau cu suprafețe cu geometrie simplă;

- radare LASER – utilizate și acestea la scară largă în aplicații industriale, permițând măsurători non-contact, în regim automat, prin inspecție, la distanțe de până la 60 de metri față de obiectele analizate;
- IGPS reprezintă sisteme modulare de urmărire, cu scanare în volume mari, utilizat în tehnologia fabricației și a montajului, cu posibilitatea localizării simultane a mai multor obiecte, cu maxim de precizie;
- *Nikon Metrology* furnizează de asemenea o gamă completă de interfețe software adaptate MMC, având la bază principiul scanării cu generarea modelelor CAD prin tehnica „norului” de puncte, mediile software fiind totodată utile ingineriei inverse [66].

2.4.2. Compania FARO

Compania *FARO*, la ora actuală, reprezintă cea mai credibilă sursă pe plan mondial privind tehnologia măsurărilor 3D. Aceasta dezvoltă și comercializează sisteme de măsurare asistată de calculator, precum și dispozitive pentru captarea imaginilor și interfețe software (figura 2.4.3).

Tehnologia dezvoltată de către compania *FARO* permite măsurări 3D de înaltă precizie, imagistică și compararea dimensională a componentelor și a structurilor complexe în timpul procesului de producție, asigurându-se verificarea și certificarea în permanență a calității produselor. Dispozitivele realizate de către această companie sunt dedicate inspecției elementelor și a structurilor, prototipării rapide, cu aplicații în industrie și în construcții, dar și în identificarea de circumstanțe în care s-au produs anumite accidente sau crime.

Marea majoritate a sediilor companiei *FARO*, la ora actuală se regăsește în Lake Mary (Florida, SUA). Compania, de asemenea are un nou centru tehnologic și de producție, de aproximativ 30.000 m², localizat în Extron, Pennsylvania, SUA, specific cercetării și dezvoltării, producției și operațiilor de servisie pentru sistemele de urmărire pe principiul LASER (Faro Laser Tracker TM) și sistemele de captare matriceală a imaginilor (Array 3D Imager). Cel mai important sediu al companiei din Uniunea Europeană este localizat în Stuttgart, Germania. Alte sedii ale acestei companii în Europa se găsesc în Marea Britanie, Franța, Spania, Italia, Polonia, Turcia, Olanda, Elveția. Pe continentul asiatic sediul cel mai important se află în Singapore, dar sedii ale companiei se află și în China, Vietnam, India, Korea de Sud, Thailanda, Japonia și Malaezia [67].

Compania *FARO* dezvoltă și produce MMC portabile și dispozitive de captare a imaginilor 3D, în scopul rezolvării problemelor privind metrologia dimensională. Tehnologia dezvoltată în cadrul companiei *FARO* permite măsurări 3D de mare precizie, imagistică și tehnologii comparative a componentelor și structurilor, în cadrul proceselor de fabricație, în contextul unui proces continuu de asigurare a calității. Dispozitivele sunt utilizate cu precădere pentru inspecția reperelor componente și a subansamblurilor, pentru procesele de planificare a producției [67]. Tehnologia de măsurare 3D permite o continuă îmbunătățire și eficientizare a acestor tipuri de procese industriale [60]. Printre cele mai des utilizate sisteme de scanare și măsurare 3D se pot aminti:



a)



Fig. 2.4.3. Sisteme de măsurare dezvoltate și comercializate de către compania FARO: a) portalul companiei; b) exemple de scannere LASER; c) exemplu de sistem matriceal de captare a imaginilor [67]

- sistemul de scannere cu sursă *LASER*, *HDR Laser Scanners*, cu sisteme software pentru interpretarea instantanee a imaginilor (figura 2.4.3, b) generează imagini extrem de detaliate cu rezoluție mare pentru o vastă gamă de nuanțe cromatice, în condiții de iluminare slabă și puternică; împreună cu sistemul software *SCENE*, dedicat, specializat pe tehnologia „norului de puncte”, aceste scannere permite o interpretare instantanee a datelor scanate și, prin aceasta, o simplificare considerabilă a fluxului de lucru;

- sistemul de captare matriceală a imaginilor, *Smart 3D imager arrays* reprezintă o nouă soluție ce asigură măsurări sofisticate în timpul procesului, minimizând costurile de integrare și de infrastructură; acest sistem este echipat cu procesoare „on-board” dedicate în primul rând aplicațiilor industriale; senzorică inteligentă permite o configurație matriceală unică pentru generarea și suprapunerea simultană a mai multor imagini preluate instantaneu, crescând astfel calitatea și rezoluția imaginii finale a reperului scanat; prin aceasta este asigurată creșterea semnificativă a productivității la un nivel care până în prezent nu putea fi posibil; imaginile instantanee 3D (într-un număr nelimitat) pot fi plasate într-o configurație matriceală, oriunde în cadrul procesului de producție, toate operațiile fiind simultan controlat printr-un singur calculator [67].

2.4.3 Compania KREON



Fig. 2.4.4 Portalul companiei KREON [68] 2.4.5, c), brațe de măsurare (figura 2.4.5, d) [68].

De peste 20 de ani, compania *KREON* a implementat tehnologii și sisteme de producție avansate, la standarde înalte de calitate (figura 2.4.4). Printre sistemele de măsurare dezvoltate și comercializate de către compania *KREON* se pot aminti: MMC (figura 2.4.5, a), roboți de măsurare (figura 2.4.5, b), mașini de lucru dedicate (figura 2.4.5, c), brațe de măsurare (figura 2.4.5, d) [68].

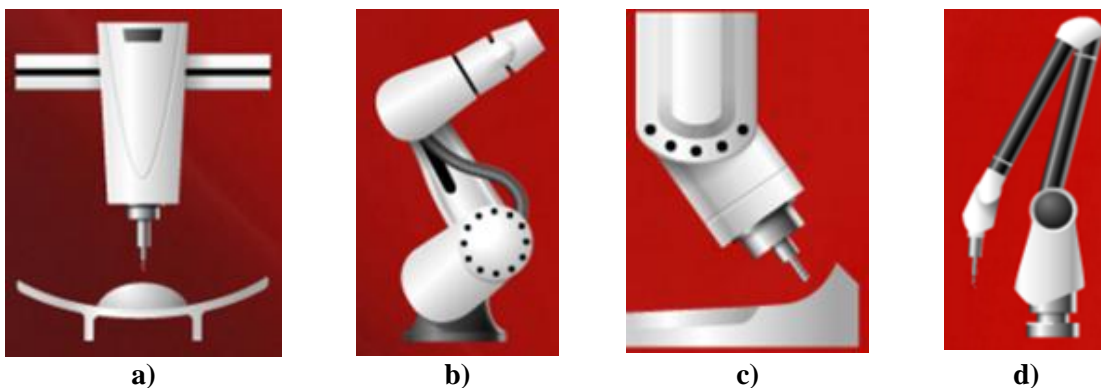


Fig. 2.4.5 Categoriile de sisteme de măsurare dezvoltate și comercializate de către compania *KREON*: a) MMC clasice; b) roboți de măsurare; c) mașini dedicate; d) brațe de măsurare [68]



Fig. 2.4.6 Capete de scanare pe principiul emisie radiatiei LASER, dezvoltate și comercializate de către compania KREON: a) Zaphyr II blue; b) Zaphyr II, c) Solano Blue; d) Solano; e) Solano CMM; f) Aquilon [68]

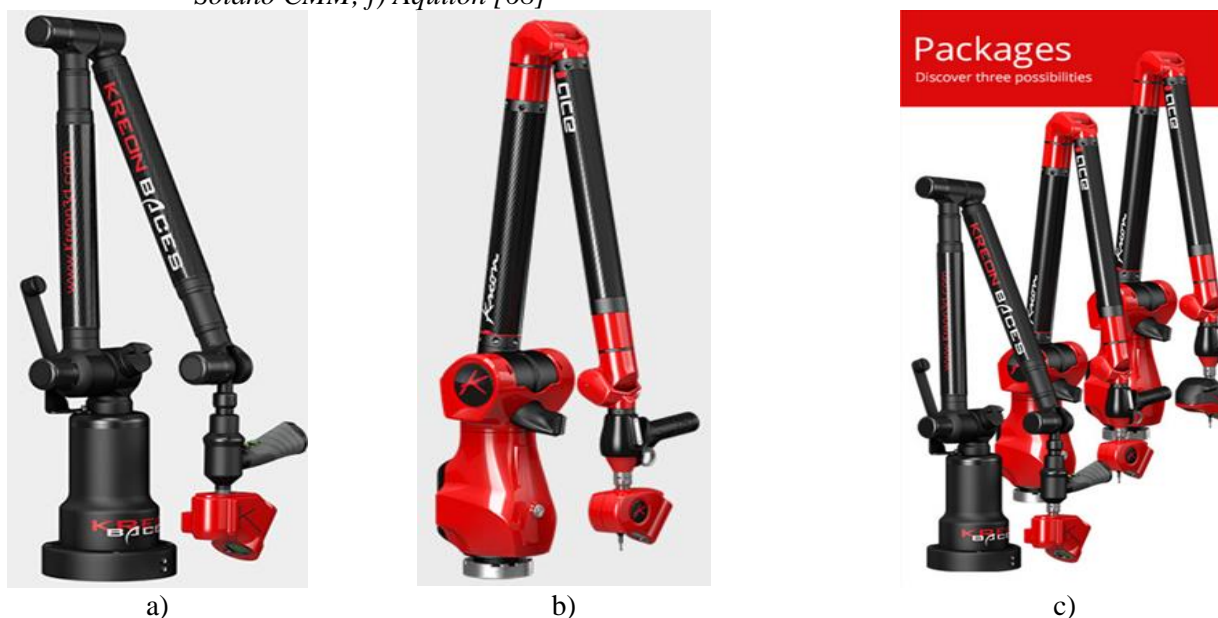


Fig. 2.4.7 Principalele tipuri de brațe de măsurare dezvoltate și comercializate de compania KREON: a) Kreon Baces Arm; b) Kreon Ace Arm; c) varianta asamblată a brațelor de măsurare [68]

Brațele Kreon Baces sunt utilizate în condiții de iluminare puternică, iar brațele Kreon Ace se caracterizează prin design inteligent și precizie de scanare ridicată [68].

2.4.4 Compania Perceptron

Compania *Perceptron* (figura 2.4.8) oferă un portofoliu valoros în privința standurilor de măsurare dimensională a produselor, standuri prevăzute cu sisteme de ghidare robotizată, cu soluții de măsurare de nivel și de decalaj dar și cu soluții de scanare 3D cu sisteme cu emisie LASER. Av'nd 30 de ani de experiență, compania Perceptron poate fi considerată o întreprindere parteneră în domeniul metrologiei [69].

Un rol aparte în construcția acestor sisteme de măsurare, bazate pe principiul emisie de radiație LASER, îl au capetele de scanare specifice, dintre care pot fi amintite: *Zaphyr II* (figura 2.4.6, a, b), *Solano* (figura 2.4.6, c, d, e), *Aquilon* (figura 2.4.6, f).

În privința brațelor de măsurare, principalele tipuri sunt prezentate în figura 2.4.7:



Fig. 2.4.8 Portalul companiei Perceptron [69]

Soluțiile metrologice oferite de compania *Perceptron* pot fi considerate ca referințe în domeniul manageriei proceselor complexe de fabricație, în vederea îmbunătățirii calității și, totodată pentru reducerea costurilor și a timpilor proceselor. La ora actuală, pe plan mondial se află în uz peste 900 de sisteme de măsurare și peste 3.000 de MMC, toate fiind dezvoltate și comercializate de către compania *Perceptron*. Această companie își are sediul central în Plymouth, Michigan, SUA, având mai multe sedii subsidiare în Brazilia, China, Cehia, Franța, Germania, India, Italia, Spania, Japonia, Singapore, Slovacia și Marea Britanie [69].

Principalul deziderat al companiei *Perceptron* este acela de a fi lider mondial în asigurarea tehnologiei metrologice avansate, venind în sprijinul utilizatorilor de a identifica și de a rezolva problemele privind asigurarea calității produselor cel puțin din punctul de vedere metrologic [69].

Compania *Perceptron* a fost înființată în anul 1981 de către absolvenții Institutului „General Motors” (în prezent Kettering University). Lucrând prin colaborate cu industria auto, absolvenții respectivi au analizat și au înțeles efectele dăunătoare ale variației proceselor în cadrul operațiilor de asamblare a produselor și au concluzionat că „un proces care nu poate fi măsurat nu va putea niciodată să fie efectiv controlat sau optimizat”. Prin viziunea revoluționară și a eforturilor de pionierat în domeniul ingineriei, aceștia au dezvoltat o soluție unică și inovativă, privind măsurarea care a condus rapid și eficient nu doar la o izolare a problemelor privind asigurarea calității, atunci când ele apar, dar și privind abilitatea de a identifica în mod proactiv aspectele care generează variații de regim ale proceselor industriale. Rezultatul final a fost unul revoluționar: prima soluție viabilă, privind măsurarea dimensională în timpul procesului de producție, soluție dezvoltată cu succes în cele mai grele condiții de producție. Pornind de la această soluție originală, compania *Perceptron* și-a continuat perioada de înflorire și de evoluție, în jurul dezideratului celor „5 aspecte de diamant”: Clientul, Produsul, Cercetarea, Organizarea și Procesul [69].

În ceea ce privește sistemele de măsurare dezvoltate și comercializate de către compania *Perceptron* se pot aminti:

- standuri pentru inspecția dimensională (figura 2.4.9, a) – acestea oferă măsurări fără contact de mare precizie, fiind foarte utile în cazul producției componentelor, dar și în cadrul proceselor de asamblare pe liniile tehnologice, asigurându-se un permanent controlul al calității în timpul producției;
- MMC pentru inspecția dimensională (figura 2.4.9, b) – acestea sunt prezentate în mai multe variante constructive: pod rulant, cu masă fixă, cu braț orizontal, cu fixare pe podea, toate fiind prevăzute cu sisteme senzoriale complexe, pe principiul optic, dar și cu sisteme software actualizate, asigurând soluții de metrologie în coordonate de ultimă oră;
- sisteme de scanare 3D (figura 2.4.9, c) – reprezintă sisteme senzoriale avansate de scanare pe principiul emisiei de radiație LASER, dispuse pe MMC, brațe de măsurare sau sisteme robotizate, cu aplicații în generarea și analiza modelelor CAD, dar și în domeniul ingineriei inverse;

- sisteme robotizate de ghidare (figura 2.4.9, d) – deosebit de utile din punctul de vedere al automatizării operațiilor de producție;
- sisteme pentru scanarea de repere mari, cu suprafețe plane și denivelate (figura 2.4.9, e), se bazează pe soluția de măsurare prin inspecția automatizată, non-contact, în scopul creșterea calității și optimizarea proceselor de producție; sistemele pot fi instalate și pe liniile de asamblare aflate în mișcare sau în imediata vecinătate a acestora;
- sisteme software metrologice (figura 2.4.9, f) sunt utile pentru colectarea și analiza datelor privind măsurătorile, cu semnalizarea automată a unor anomalii în cadrul procesului de producție [69].

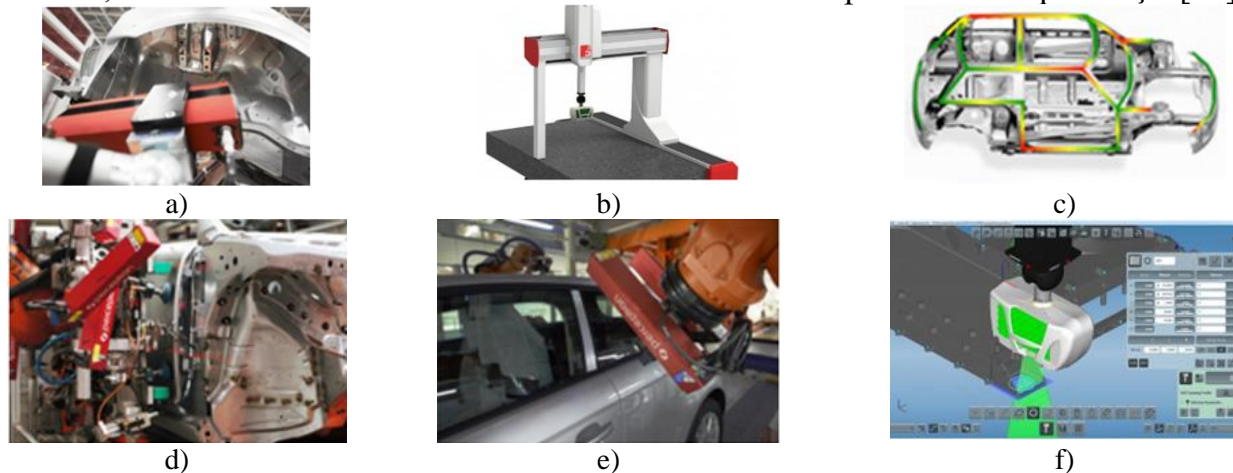


Fig. 2.4.9 Produse ale companiei *Perceptron*, cu aplicații în metrologie și inspecție 3D: a) standuri pentru inspecția dimensională; b) MMC pentru inspecția dimensională; c) sisteme de scanare 3D; d) sisteme robotizate de ghidare; e) sisteme pentru scanarea de repere mari; f) sisteme software metrologice [69]

2.4.5 Compania Renishaw (Marea Britanie)

Compania *Renishaw* reprezintă unul dintre leaderii în domeniul ingineriei și tehnologiei științifice, cu expertiză în măsurările de precizie și evaluarea stării de sănătate. Compania furnizează produse și servicii cu diferite aplicații, de la aplicații cum ar fi motoare cu jet, turbine eoliene, până la aplicații precum stomatologie și operații pe creier. Este de asemenea leader în domeniul operațiilor auxiliare în cadrul proceselor tehnologice de fabricație, cum ar fi prototiparea 3D prin depuneri de pulberi metalice.

La ora actuală, grupul *Renishaw* are peste 70 de oficii în 35 de țări, având aproximativ 4.000 de angajați. Aproximativ 2.600 de persoane sunt angajate în Marea Britanie, acolo unde compania își desfășoară marea majoritate a activităților de cercetare și dezvoltare, dar și de producție [70].

Principalul deziderat al grupului *Renishaw* este de a reduce considerabil timpii necesari necesari producției și inspecției componentelor, precum și de a păstra fiabilitatea mașinilor de măsurare în coordonate. În domeniul automatizărilor industriale, sistemele de măsurare și calibrare îi ajută pe utilizatori să realizeze produse fiabile și de înaltă precizie și calitate [70].

Printre principalele sisteme dezvoltate și comercializate de compania *Renishaw* se pot specifica următoarele:

- capete de măsurare atașabile la MMC (figura 2.4.10, a);
- standuri de măsurare mobile, de mici dimensiuni (figura 2.4.10, b);
- sisteme de fixare a reperelor pe masa MMC (figura 2.4.10, c);
- sisteme de calibrare și optimizare (figura 2.4.10, d);
- sisteme de palpare detașabile (figura 2.4.10, e);
- vârfuri de palpare pentru capetele de măsurare prin contact (figura 2.4.10, f) [70].

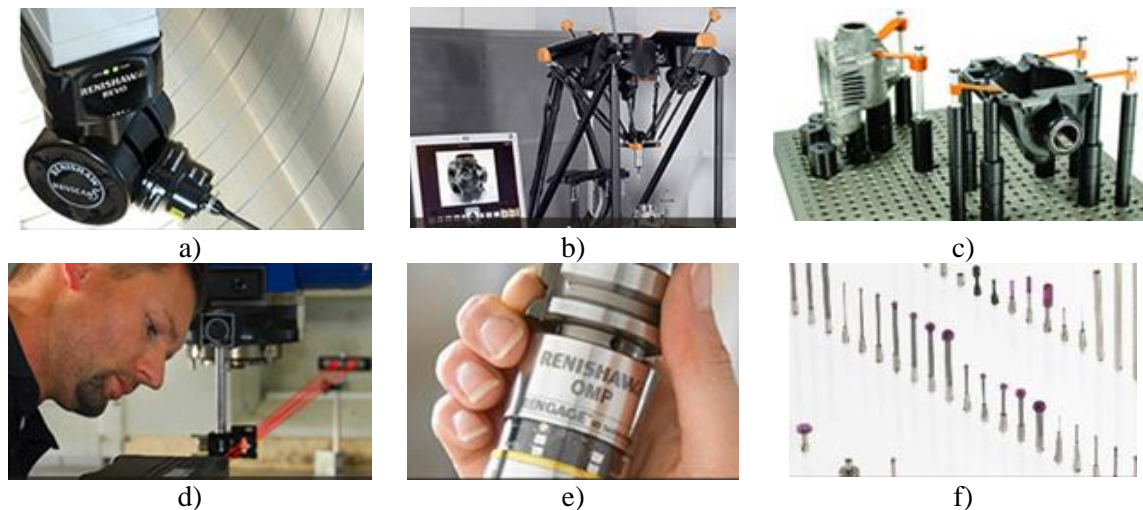


Fig. 2.4.10 Exemple de produse dezvoltate și comercializate de compania Renishaw în domeniul aplicațiilor industriale: a) capete de măsurare atașabile la MMC; b) standuri de măsurare mobile, de mici dimensiuni; c) sisteme de fixare a reperelor pe masa MMC; d) sisteme de calibrare și optimizare; e) sisteme de palpate detașabile; f) vârfuri de palpate [70]

În scopul măsurării parametrilor de poziție și mișcare (în cadrul proceselor tehnologice), compania *Renishaw* oferă o gamă largă de sisteme de codificare/decodificare liniare și rotative, în coordonate absolute și relative, de mare viteză, utilizate cu succes la automatizările industriale. Dintre acestea se pot aminti: codificatoare prin interferometrie LASER (figura 2.4.11, a), codificatoare magnetice (figura 2.4.11, b) și codificatoare optice (figura 2.4.11, c):

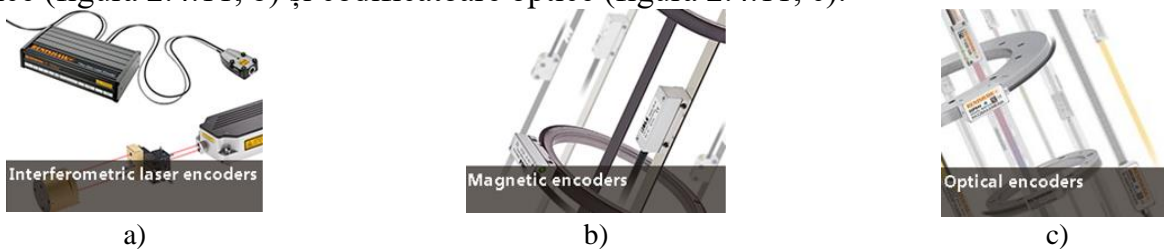


Fig. 2.4.11 Sisteme de codificare pe principiul radiației LASER, dezvoltate de compania Renishaw: a) prin interferența radiației LASER; b) pe principiul magnetic; c) pe principiul optic [70]

În medii de lucru ostile, cum ar fi spații expuse la intemperii, subsoluri, produsele *Renishaw* pentru măsurări spațiale ajută beneficiarii să obțină date exacte în privința determinării distanței, a poziției și a orientării obiectelor [70] (figura 2.4.12).



Fig. 2.4.12 Sisteme dedicate măsurărilor spațiale, pe principiul emisiai radiației LASER [70]

În domeniul sănătății, compania *Renishaw* își pune în aplicare tehnologia ingineriei de precizie, în scopul provocărilor privind aplicațiile în domeniul sănătății și al medicinei. În acest sens s-au dezvoltat o serie de echipamente și sisteme dedicate, după cum urmează:

- în scopul produselor dentare (figura 2.4.13, a);
- variante cu aplicații în diagnosticarea moleculară (figura 2.4.13, b);
- pentru produse neurologice și terapii (figura 2.4.13, c);
- în domeniul spectroscopiei (figura 2.4.13, d) [70].

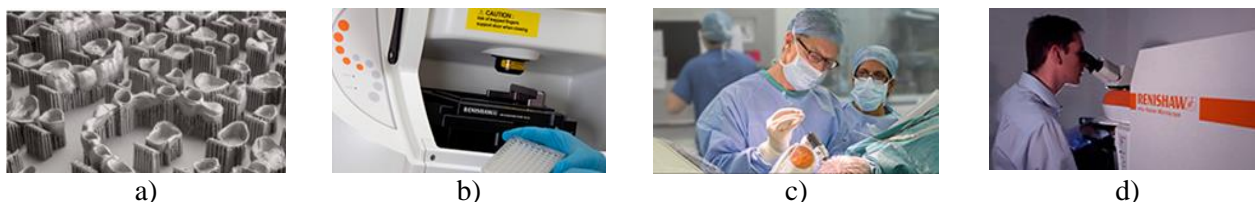


Fig. 2.4.13 Sisteme și aparatură dezvoltată de compania Renishaw, în domeniul aplicațiilor din medicină: a) pentru produse dentare; b) pentru diagnosticarea moleculară; c) pentru produse neurologice și terapii; d) pentru spectroscopie [70]

Compania *Renishaw* a dezvoltat o tehnologie de precizie cu utilizare în aplicații științifice de analiză și cercetare, cum ar fi: calibrarea și optimizarea mașinilor (figura 2.4.14) sau spectroscopia (figura 2.4.13, d) [70].



Fig. 2.4.14 Sisteme pentru calibrarea și optimizarea mașinilor și aparatelor optice și mecanice [70]

Produsele *Renishaw* se remarcă de asemenea în domeniul prototipării rapide, și anume în fabricarea prin depunere strat cu strat (cu imprimare 3D prin depunere succesivă de straturi formate din pulberi metalice sau din plastic special (de exemplu ABS)) (figura 2.4.15). Imprimarea 3D se realizează pornind de la un fișier CAD în format digital, realizându-se astfel prototiparea pas cu pas a unor componente tehnice și funcționale din cadrul produselor finale.

Avantajul este acela că prin această tehnologie se pot prototipa și modele complexe, care, prin metodele convenționale (turnare, forjare, prelucrare prin CNC) [70].

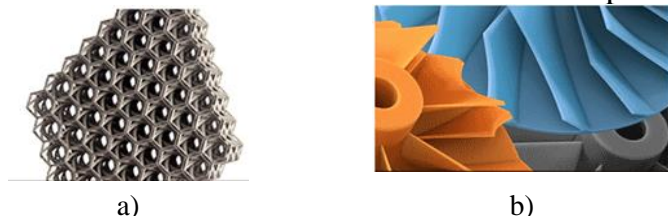


Fig. 2.4.15 Tehnologii de prototipare rapidă: a) prin depuneri de pulberi metalice; b) prin depuneri de plastic [70]

2.4.6 HEXAGON Metrology

Acest concern internațional are reprezentanțe în țări din toate continentele și include mai multe companii mai mici, dedicate echipamentelor specifice, cum ar fi, de exemplu:

- DEA GLOBAL – specializată în MMC pe 3 axe;
- ROMER – specializată pe brațe de măsurare, portabile etc.

Compania *HEXAGON Metrology* oferă o gamă largă de produse și operații de servizare pentru toate aplicațiile metrologice cu aplicații în domeniul auto, aerospațial, al energiei și în domeniul medical.

Cu peste 20 de facilități de producție și 70 de centre de precizie pentru servizare, compania are peste 100 de parteneri de distribuție, distribuite pe 5 continente, oferind posibilitatea unui control perfect și continuu a proceselor de producție, îmbunătățind calitatea produselor și crescând eficiența liniilor de producție, pe plan mondial [71].

Compania *HEXAGON Metrology* face parte din concernul *HEXAGON (HEXA B)*, fiind un lider global pe design, măsurători și viziune tehnologică, ajutând utilizatorii pe partea de design, măsurări și prelucrare și procesare de date. Având o cifră de afaceri de peste 13 milioane de lire sterline, compania furnizează o gamă largă de ateliere de servizare, destinate inclusiv MMC și instalării și depanării de sisteme software, operații de calibrare, dar și de inițiere (de exemplu National Physical Laboratory este acreditat în domeniul inițierii în domeniul inspecției dimensionale, metrologiei și sistemelor software dedicate proceselor de producție) [71].

În ceea ce privește produsele cele mai utilizate la ora actuală pe plan mondial, dezvoltate și comercializate de compania *HEXAGON Metrology*, dintre acestea se pot menționa următoarele:

- sisteme automatizate (figura 2.4.16):



Fig. 2.4.14 Exemplu de automatizare pentru inspecția caroseriilor auto [71]

Acestea sunt adaptate prezentului și viitorului, prin implementarea de soluții inteligente și a unui design futurist, dovedindu-și maximul de utilitate în proceselor de asamblare. Procesul de automatizare joacă un rol semnificativ în domeniul industrial, astfel încât *HEXAGON Metrology* oferă soluția cea mai potrivită pentru procesele de măsurare și control în regim complet automatizat, atât la nivelul liniilor de producție, cât și în vecinătatea acestora, cu sau fără contact [71];

- MMC de dimensiuni mici și medii (figura 2.4.17, a) – destinate măsurării 3D a unor componente cu dimensiuni mici și medii cu geometrii complexe, fără a fi afectată performanțele legate de precizia de măsurare; acestea permit crearea rapidă de rutine de program pentru preluarea și interpretarea datelor direct de la modelele CAD [71];



Fig. 2.4.17 CMM de dimensiuni mici și medii comercializate de compania *HEXAGON Metrology*: a) de dimensiuni mici și medii; b) de dimensiuni mari [71]

- MMC de dimensiuni mari (figura 2.4.17, b) sunt diferite în mai multe variante constructive (de tip pod rulant sau cu masă fixă); acestea se remarcă prin robustețe stabilitate dar, totodată și printr-o precizie ridicată de măsurare și/sau scanare [71];

- pentru o cât mai bună siguranță în exploatare, acestea se recomandă să fie amplasate la parterul instituțiilor de profil.

- MMC cu braț orizontal (figura 2.4.18): acestea se pretează cel mai bine în cazul inspecției componentelor din tablă, cum ar fi caroseriile auto sau a altor componente voluminoase, folosite, de exemplu în industria aeronautică, navală, sisteme de apărare, dar și în industria feroviară; structura deschisă a acestor tipologii de MMC permite accesul direct la reperul măsurat [71];



Fig. 2.4.18 MMC cu brațe orizontale, utilizate în industria auto [71]

- MMC cu dispunerea batiului pe podea (fig. 2.4.19) se remarcă prin precizie ridicată de măsurare, în ciuda dispunerii direct pe podea (sursă de vibrații) prin stabilitatea acestor variante constructive; acestea devin foarte eficiente și utile în mediile de producție, inspecția automatizată [71];



Fig. 2.4.19 MMC cu batiul dispus la podea [71]

- prin faptul că batiul mașinii este dispus direct pe podea, datorită stabilității, precizia de măsurare / numerizare crește prin eliminarea uneia dintre cauzele erorilor instrumentale.

- standuri și scule de măsurare manuale (șublere, micrometre etc.) (figura 2.4.20) – fac parte din seria instrumentelor de măsurare de precizie TESA, cu o înaltă reputație privind calitatea, fiabilitatea și durabilitatea;



Fig. 2.4.20 Șubler digital TESA [71]

De peste 70 de ani, brandul TESA s-a remarcat pe piață prin produsele sale de excelență, prin bogata expertiză în domeniul micro-mecanicii și a mecanicii de precizie și, în egală măsură, prin experiența vastă, dovedită în domeniul metrologiei dimensionale [6], [71].

- teodoliți industriali și stații cu sursă LASER (figura 2.4.21) – se remarcă prin faptul că asigură procese de măsurare eficiente din punctul de vedere al preciziei și al costurilor;



Fig. 2.4.21 Echipamente de tip teodoliți și stații cu sursă LASER, pentru optimizarea sistemelor de navigare și inspecția calității reperelor de foarte mari dimensiuni [71]

Prin eficiența ridicată, aceste echipamente se ridică la cele mai înalte standarde de calitate; volumul de măsurare extrem de peste 500 m³ face ca aceste stații să fie o alegere excelentă în ceea ce privește inspecția calității și asamblarea unor componente de dimensiuni mari și foarte mari; teodoliții industriali sunt de mult timp un etalon în privința compensării optice a sateliților și sistemelor de navigare [71]

- scannere LASER (figura 2.4.22) – acestea joacă un rol cheie în asigurarea calității; achiziția de imagini 3D a formelor și suprafețelor reperelor cu geometrii neregulate,

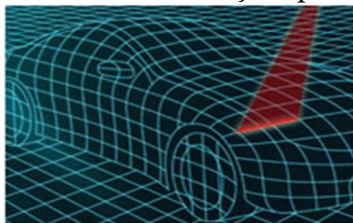


Fig. 2.4.22 Aplicație de scanare cu sisteme detașabile cu sursă LASER a unei caroserii auto [71]

prin utilizarea sistemelor de emisie LASER presupune un proces ce necesită eforturi mari pentru asigurarea preciziei necesare; pentru aceasta, în industrie, utilizarea scannerelor LASER se face în primul rând în scopul controlului calității privind geometria și suprafețele reperelor, dar, totodată și pentru ingineria inversă, pentru operații tehnologice de rectificare și finisare, în scopul asamblării unor componente funcționale;

- un sistem de scanare 3D poate fi simplu și rapid atașat la un braț de măsurare și poate furniza cea mai bună rezoluție și precizie de scanare [71], [75].



Fig. 4.2.23 Sisteme de urmărire cu sursă LASER, dezvoltate de compania HEXAGON Metrology [71]

- sistemele de urmărire cu sursă LASER (figura 2.4.23) reprezintă un standard pe termen lung în metrologia industrială; aceste sisteme s-au remarcat în privința preciziei, a fiabilității și a durabilității, fiind utilizate cu mare succes în cadrul MMC portabile; acestea se pretează pentru volume de lucru cu distribuție sferică, având un volum de până la 160 m³ [71].



Fig. 2.4.24 Sisteme de verificare a calității pieselor uzinate pe mașinile – unelte [71]

- sistemele pentru verificarea mașinilor-unelte (figura 2.4.24) – sunt folosite cu succes pentru verificarea pieselor uzinate pe mașinile-unelte; marele avantaj constă în faptul că ele pot asigura inspecția calității chiar în timpul procesului de uzinare, reducându-se într-un mod semnificativ nu doar timpii de producție, dar și costurile [71].

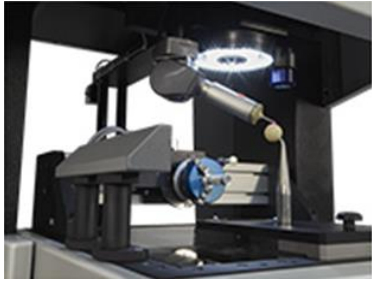


Fig. 2.4.25 Exemplu de sistemele selectiv de măsurare pentru inspecția reperelor funcționale [71]

- sisteme selective de măsurare (figura 2.4.25) se caracterizează prin flexibilitate, oferind posibilitatea de a alege între sistemele de măsurare pe principiul cu sau fără contact (pe principiul optic), utilizând un singur sistem de măsurare; acesta deci poate asigura fie selectiv, fie simultan atât măsurări prin contact, cât și pe principiul optic pentru inspecția calității unui reper cu geometrie simplă și/sau complexă; de exemplu pentru reperele confecționate din materiale sensibile la atingere, soluția este de măsurarea pe principiul optic [71].

- brațele de măsurare portabile (figura 2.4.26):



Fig. 2.4.26 Brațe de măsurare portabile [71]

- acestea permit realizarea de măsurători în mod direct în mediul de fabricație, în condițiile în care îmbunătățirile aduse procesului sunt cele mai eficiente și benefice; nu necesită timpi mari pentru instalare, simplitate în manipulare și măsurări 3D din ce în ce mai fiabile: brațele articulate pot fi echipate cu sisteme de palpate pe diferite principii, de diferite dimensiuni, permițându-se inclusiv scanarea unor zone greu accesibile prin metodele convenționale; se remarcă printr-un excelent raport calitate – preț [71].



Fig. 2.4.27 Sistem de inspecție dimensională de formă tubulară [71]

- sisteme inspecție de formă tubulară (figura 2.4.27): compania *HEXAGON Metrology* a găsit o soluție eficientă din punct de vedere al costurilor pentru măsurări de precizie pe principiul fără contact, constând într-un sistem de coturi tubulare cu unghiuri de până la 180°; tehnologiile radiației LASER și în infraroșu sunt compatibile cu toate brațele de măsurare realizate de compania *HEXAGON Metrology* [71].



Fig. 2.4.28 Sistem de scanare cu sursă LASER, în lumină albă [71]

- sistemele de scanare cu sursă LASER în lumină albă (figura 2.4.28) – acestea reprezintă o soluție pentru măsurările 3D pe principiul optic, având drept scop îmbunătățirea proceselor ingineresti și de producție în cadrul industriilor automatizate și nu numai; prin aceasta se asigură o accelerare a proceselor de fabricație și posibilitatea de a se atinge standarde mai înalte de calitate într-un timp mai scurt; mai mult sunt reduse și costurile de producție, aducând profituri considerabile pentru fiecare produs fabricat, în parte [63], [71].

- senzori folosiți la capetele de scanare (figura 2.4.29):



Fig. 2.4.29 Variante de capete de măsurare/scanare dezvoltate de compania HEXAGON Metrology [71]

- compania *HEXAGON Metrology* produce și comercializează o gamă largă de capete de palpare și accesorii pentru MMC, însemnând o evoluție de ultimă oră în domeniul capetelor de măsurare pentru MMC; această tehnologie modernă adresează o gamă largă de echipamente de precizie, destinate dezvoltării și asigurării unor măsurări cât mai rapide și precise; prin aceste produse, compania *HEXAGON Metrology* garantează o calitate la cele mai înalte standarde în ceea ce privește MMC [71].

- sisteme software: compania *HEXAGON Metrology* se află printre dezvoltatorii cei mai de renume în domeniul interfețelor software cu aplicații în domeniul metrologiei și a proceselor industriale și oferă o gamă largă de medii software dedicate și/sau personalizate, ce permit achiziții, analize, gestionări și statistici de înalt nivel ale datelor; compania *HEXAGON Metrology* produce interfețele software cele mai populare în domeniul metrologiei dimensionale, în special cele asociate MMC, dar nu numai [71];

- accesorii: exploatând la maximum potențialul instrumentelor de măsurare, accesoriile originale specifice *HEXAGON Metrology* optimizează eficiența și flexibilitatea echipamentelor de măsurare și chiar de fabricație; accesoriile pe principiul optic, dispozitivele de siguranță, caracteristicile de rețea, fac chiar posibilă comunicarea între echipamente, în cadrul mai multor linii de fabricație [64];

- sistemele de protecție ale sistemelor aflate în gestiune permit securizarea acestora, prin vânzarea și pregătirea de operații în acest scop [71];

- echipamentele de calibrare stau la baza standardelor de măsurare dimensională în cadrul laboratoarelor metrologice: produsele din această categorie se referă la: interferometre, sisteme cu emisie LASER cu frecvență stabilizată etc. [71].

2.4.7 ARTEC 3D (Luxemburg)

Încă de acum o decadă, compania *Artec 3D* s-a remarcat printre liderii mondiali în privința scannerelor manuale 3D, cu aplicații în industrie, fiind expert în domeniul tehnologiei 3D și având drept aplicații: procesele de fabricație și designul industrial, sănătatea publică, știința și educația, respectiv arta și designul. Compania – mamă își are sediul central în Luxemburg, acesta fiind nucleul produselor specifice acesteia. În afară de Luxemburg, compania are pionierate și echipe de specialiști și în Palo Alto, California (SUA), respectiv în Moscova [72].

Printre principalele variante de scannere produse și comercializate de către compania *Artec 3D* se remarcă următoarele:



Fig. 2.4.30 Scannerele portabile 3D din seria Artec Eva [72]

- sistemul Artec Eva (figura 2.4.30) face parte din seria de scannere portabile 3D, pentru profesioniști, fiind ideale pentru numerizarea rapidă și precisă a modelelor 3D, cu textură, asociate obiectelor de mărimi medii, cum ar fi busturi, jante din aliaj sau sisteme de evacuare ale motoarelor de motocicletă;

- aceste sisteme se caracterizează printr-o scanare rapidă, în condițiile unor măsurători precise, de înaltă rezoluție, cu aplicabilitate în aproape toate domeniile, fără a mai fi necesare echipamente suplimentare [72].

- ușoare, rapide și foarte flexibile, scannerile *Artec Eva* sunt cele mai populare, fiind un lider pe piață în domeniul scannerelor portabile 3D; bazându-se pe tehnologia utilizării în condiții de siguranță a radiației luminoase, *Artec Eva* reprezintă o soluție viabilă în orice situație pentru numerizarea obiectelor de aproape orice tip, inclusiv a obiectelor cu suprafețe foarte întunecate și foarte strălucitoare, totodată;

- aceste sisteme de scanare se mai remarcă prin viteză mare de lucru, precizie și ușurință în utilizare, aceste aspecte făcându-le să fie un produs esențial pentru o gamă largă de aplicații industriale: prototipare rapidă, controlul calității, conservarea patrimoniului, industria auto, criminalistică, medicină (în domeniul protezelor și ortezelor) și industria aeronautică; în acest scop, scannerile *Artec Eva* sunt utilizate pentru personalizare, inovare și fluidizarea proceselor industriale; sistemele de scanare *Artec Eva* au fost utilizate inclusiv pentru a-l scana pe președintele SUA, domnul Barack Obama, obținându-se primu portret 3D al unui președinte american [72].

- scannerile *Artec Space Spider* (figura 2.4.31) reprezintă un nou instrument de precizie, îmbunătățit pentru utilizatorii CAD și pentru ingineri; acestea se caracterizează printr-o rezoluție 3D înaltă, obținută pe principiul emisiei de radiație în lumină albastră; aceste scanere sunt ideale pentru numerizarea de obiecte mici, dar și pentru detalii complexe în cazul obiectelor industriale de mari dimensiuni, permițând reproducerea cu precizie și rezoluție ridicată a imaginilor obiectelor scanate, imaginile având culori clare, strălucitoare și contururi nete [72].



Fig. 2.4.31 Scannerile în lumină albastră, din seria *Artec Space Spider* [72]

- abilitatea scannerelor de a reproduce geometrii complexe, muchii ascuțite, rășfrângerii, pereți subțiri etc., le conferă acestora o tehnologie aparte; mai mult ele sunt ideale pentru numerizarea cu rezoluție înaltă a unor obiecte, cum ar fi mulaje, chei, monede, urechea umană, cu procedeele de exportare a modelelor virtuale 3D în format CAD;

- scannerile *Space Spider* oferă posibilități aproape nelimitate în domeniul precum ingineria inversă, controlul calității, designul produselor și al fabricației;

- ultimele generații de scanere se caracterizează printr-un sistem foarte performant de compensare a erorilor de temperatură și o electronică avansată, ceea ce face ca acestea să reproducă modelele 3D cu maximum de precizie, în doar 3 minute, de 10 ori mai rapid decât modelele mai vechi (*Spider*); mai mult, ele asigură o repetabilitate pe termen lung în privința achiziției de date, aceasta în condițiile în care precizia nu este afectată de fluctuațiile condițiilor de mediu [72].

2.4.8. Compania WENZEL (Germania)

Compania *WENZEL* reprezintă o soluție inovativă și flexibilă pentru problemele utilizatorilor, o soluție a ingineriei de precizie și a perteneriatului, este o companie suficient de puternică, încât să răspundă cerințelor clienților pe plan mondial, atât în domeniul metrologiei, cât și al aspectelor de finețe, ca de exemplu finisajele auto [73]. Această companie este organizată pe 5 linii principale de producție:

- MMC pentru metrologia 3D (figura 2.4.32) sunt disponibile în mai multe variante constructive, cum ar fi: pod rulant, cu masă fixă, cu braț orizontal etc.



Fig. 2.4.32 MMC dedicate aplicațiilor metrologice [73]

- de mai bine de 4 decade, domeniul MMC constituie piatra de temelie a companiei WENZEL, integrând perfect toată gama de capete de măsurare Renishaw, împreună cu accesoriile sale; sediile WENZEL localizate în America prezintă o ofertă completă în ceea ce privește servisiere și mentenanța MMC;

- varietatea MMC reprezintă o parte a echipamentelor WENZEL în domeniul metrologiei, incluzând: un sistem de scanare 3D cu sursă LASER, un sistem de marcaj, un cap de scanare cu emisie în lumină albă, un scanner industrial (*exaCT*), o linie completă de standuri de inspecție și o gamă de MMC de mare viteză, pe principiul optic [73];

- în figura 2.4.33 sunt prezentate mai multe modele de MMC produse și dezvoltate de compania WENZEL:

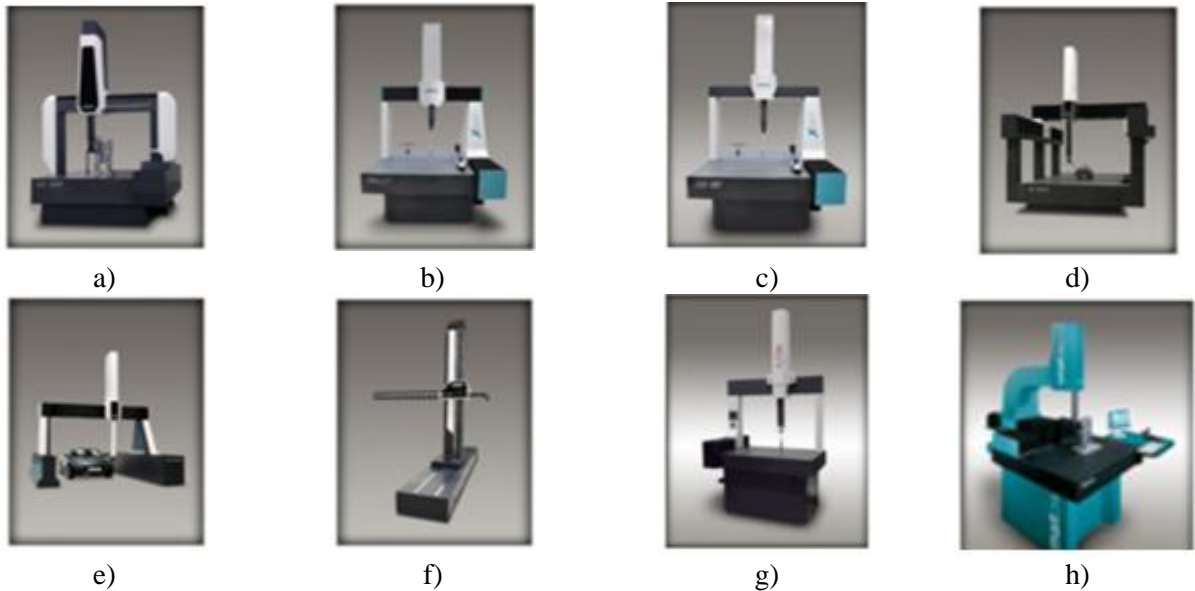


Fig. 2.4.33 Variante constructive de MMC produse de compania WENZEL: a) LH generation; b) XOpplus; c) XOrbit; d) LH Gantry; e) LFH; f) R Series; g) XCite Manual; h) Smart [73]

- standuri metrologice (figura 2.4.34) – acestea reprezintă segmentul cel mai mare al mașinilor de inspecție pe 4 axe;



Fig. 2.4.34 Stand metrologic dezvoltat în cadrul companiei WENZEL [73]

- standurile metrologice produse de compania WENZEL au capacitatea de a măsura repere de dimensiuni mari și foarte mari, cum ar fi de exemplu roți dințate cu diametre cuprinse între 280 mm și 4 m, aceste standuri fiind disponibile în mai multe variante constructive (de tip pod rulant, de tip masă fixă etc. (figura 2.4.35));

- standurile metrologice WENZEL folosesc exclusiv capete de măsurare Renishaw, garantând costuri scăzute de achiziție și livrare rapidă;

- standurile WENZEL produse în America asigură de asemenea servisierea și inspecția funcționării angrenajelor [73].

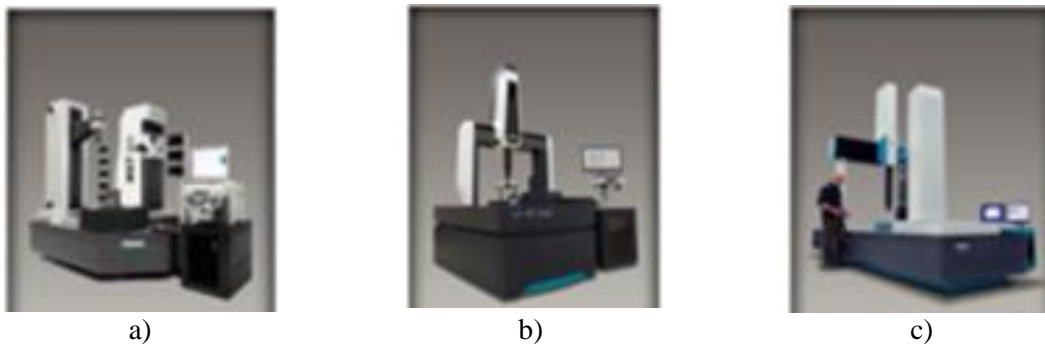


Fig. 2.4.35 Variante constructive de standuri metrologice produse de compania WENZEL: a) WGT Series Precision; b) LH; c) LH Hybrid [73]

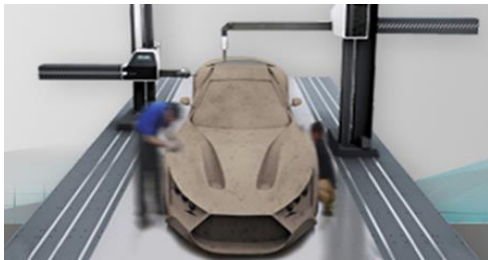


Fig. 2.4.36 Exemplu de utilizare a sistemelor de palpare în domeniul industriei auto [73]

- sisteme de palpare (figura 2.4.36): - compania WENZEL produce o gamă largă vârfuli de palpare și freze pentru materiale moi (cum ar fi lutul, lemnul, plasticul etc.); în plus, compania poate furniza și o gamă de cuțite de freze, instrumente de trasare și alte accesorii similare [73], [75];

- sisteme de scanare rapidă, pe principiul optic (figura 2.4.37) asigură cel mai rapid proces de inspecție pentru piese cu geometrii complexe, cum ar fi palele de turbină sau elemente similare;

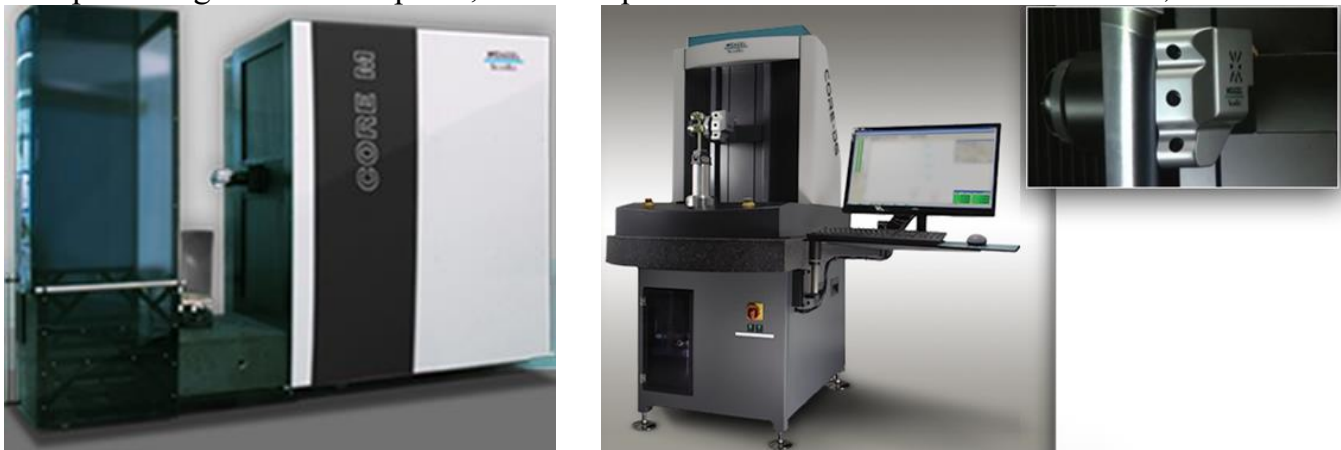


Fig. 2.4.37 Sistemele CORE de scanare optică de înaltă viteză [73]

- sistemele CORE reprezintă de fapt MMC cu accesorii de scanare pe principiul optic pe 5 sau 6 axe, fiind ideale pentru pentru inspecția palelor de turbine, pentru măsurarea implanturilor medicale sau alte elemente cu caracteristici similare, având suprafețe rectificată și polisate și muchii ascuțite; aceste sisteme de scanare prezintă elemente de ranforsare și ocupă un spațiu restrâns la nivelul solului;

- aceste soluții de măsurare reprezintă o provocare din punctul de vedere al concurenței pentru MMC clasice, pentru scannerele pe principiul LASER și pentru sistemele de scanare în lumină albă;

- mașinile din seria CORE pot măsura obiecte cu dimensiuni cuprinse între 2,5 și 200 mm și pot fi calibrate cu ajutorul standardelor ISO, întocmai ca în cazul MMC clasice;



Fig. 2.4.38 Exemplu de model *exaCT* de tomograf computerizat, produse și comercializate de compania WENZEL [73]

- tomografe computerizate (figura 2.4.38): modelele *exaCT* sau sistemele de scanare *Industrial CT* deschid o nouă eră a metrologiei, oferind mult mai multe performanțe decât un sistem de scanare cu sursă LASER; atât componentele, cât și piesele asamblate pot fi măsurate atât pe exterior, cât și la interior, prin posibilitatea unei achiziții complete de imagini digitale; mai mult, tomografele computerizate *exaCT* pot fi folosite și pentru analiza materialelor și testarea non-distructivă [73];

- componenta măsurată este penetrată de raze X, iar imaginile instantanee 2D sunt recompuse într-o imagine 3D, cu ajutorul mediului software *exaCT Analysis*;
- reprezentanțele WENZEL din America oferă operați de servizare și pentru aceste variante de sisteme performante de scanare [73];
- interfețe software - compania WENZEL produce sisteme software inteligente asociate MMC, ca soluții pentru numeroase aplicații de măsurare asistată; colaborarea în mod constant cu utilizatori din diferite medii industriale a avut drept rezultat dezvoltarea de pachete software adecvate acestor aplicații;
- WENZEL oferă posibilitatea de a alege mediul software adecvat aplicației specifice MMC; în figura 2.4.39 sunt prezentate diferite interfețe software, dedicate, oferind soluția ideală pentru fiecare situație;
- pentru aplicațiile bazate dpe tehnica „norului” de puncte (prin combinație cu sistemele de scanare pe principiul LASER sau cu tomografele computerizate *exaCT*) este garantată soluția adecvată aplicațiilor privind inspecția sau ingineria inversă;

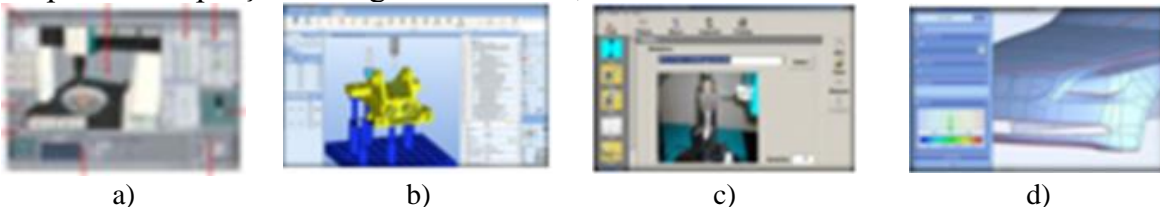


Fig. 2.4.39 Variante de interfețe software dezvoltate în cadrul companiei WENZEL: a) *Open DMIS CMM*; b) *Metrosoft Quartis CMM*; c) *TGear Inspection*; d) *PointMaster Point Cloud* [73]

- pentru inspecția angrenajelor, interfața software adecvată este TGear având module adiționale pentru măsurarea oricărui tip de angrenaje și de roți dințate, arbori și scule, putând fi exportate și prelucrate date în acord cu standarde specifice;
- pentru biblioteca de vârfuri de palpări se recomandă interfața software DesCAD, gestionând eficient datele provenite de la procesele de măsurare ale scannerelor cu surse LASER, respectiv de la procesele de frezare; aceste date sunt cu succes procesate în cadrul fișierelor CAD generate în mod automat [73].

Capitolul 3

Metode de măsurare pe principiul emisie radiatiei LASER

În ultimii ani, aplicarea tehnicii de scanare prin utilizarea radiatiei LASER a cunoscut o dezvoltare fără precedent, datorită numeroaselor avantaje, precum: creșterea sensibilă a eficienței, mărirea considerabilă a domeniului de aplicații, reducerea riscurilor de coliziuni, accidente etc. Cele mai des utilizate tehnici de scanare la ora actuală, pe plan mondial sunt prezentate în cele ce urmează:

3.1 Tehnica triangulației LASER

Aceasta poate fi aplicată, indiferent de tehnica folosită (bazată pe punct, pe linie sau pe suprafață), având ca principiu dispunerea mai multor senzori, având rolul de a recepționa razele LASER reflectate de către suprafața obiectului scanat. Cea mai bună soluție constă în utilizarea unei camere CCD (circuit cu cuplaj de sarcină), la nivelul căruia semnalul luminos se convertește în semnal electric. Principalul avantaj al sistemului CCD constă în faptul că permite detectarea mai multor spoturi luminoase și, ca urmare, erorile de citire ale datelor vor putea fi compensate într-o mai bună măsură.

Lumina utilizată în cazul metodei triangulației poate fi generată fie prin utilizarea unor bande de lumină albă compusă (oferind siguranță în operare, neafectând ochii), fie prin folosirea generatoarelor LASER ce se pot achiziționa din comerț [76], [77].

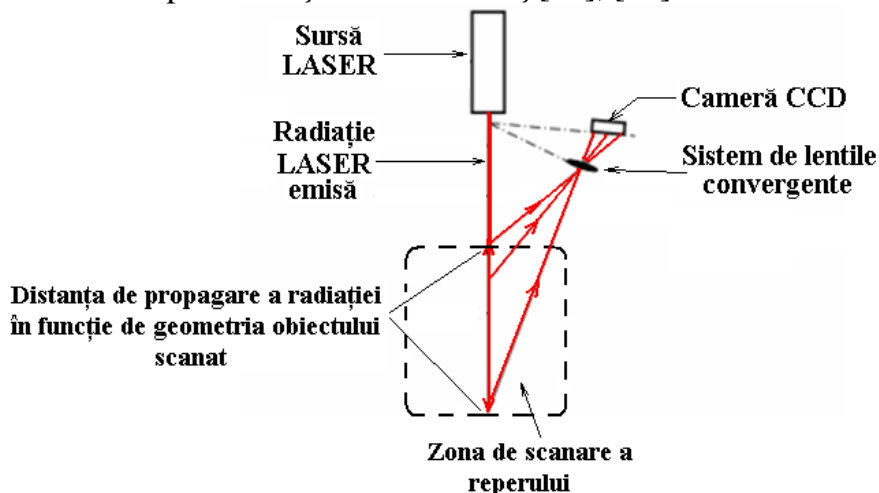


Fig. 3.1.1 Principiul metodei triangulației LASER [76]

Acest procedeu se caracterizează prin faptul că raza emisă, raza reflectată și distanța dintre emițătorul LASER și sistemul CCD formează un triunghi (figura 3.1.1). Ca principiu, se pune problema determinării poziției unui punct prin determinarea unghiurilor dintre punctul măsurat și alte două puncte de referință (punctul de emisie – recepție și punctul (zona) sistemului CCD).

Pozițiile acestor două puncte fiind cunoscută și constituind o bază fixă.

Principala problemă poate consta în blocarea captării de imagini în situațiile reducerii unghiului sau a aplicării radiației din partea opusă camerei. Pentru a se preveni această problemă, fie se folosește o pereche formată din două sau mai multe surse de iluminat, fie se utilizează mai multe camere CCD, prin aceasta înlăturându-se zgomotele. În acest caz o altă problemă ar fi legată de determinarea poziției pentru fiecare cameră în parte. Unghiul de triangulație fiind întotdeauna diferit de zero, există întotdeauna pericolul blocării sistemului.

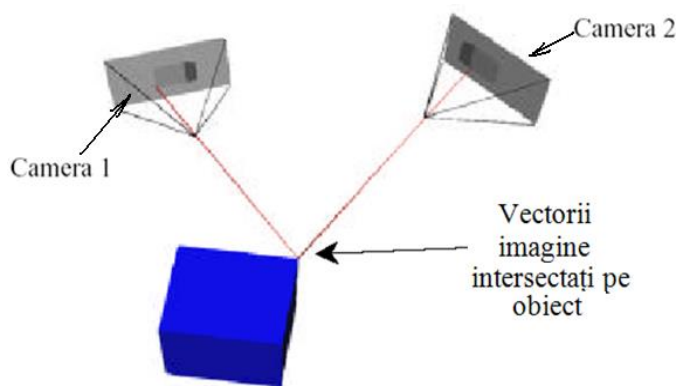


Fig. 3.1.2 Metoda fotogrametriei [78], [79]

Folosind componente autonome (cu posibilități de poziționare și reglare în mod automat) aceste neajunsuri pot fi compensate într-o oarecare măsură. În acest caz se poate ajunge la o precizie a măsurării de ordinul zecimilor de milimetru (de aproximativ 0,15 mm) [76], [77]. Din tehnica triangulației derivă două metode moderne pentru creșterea performanțelor și, mai ales, a preciziei de scanare/măsurare, și anume: metoda fotogrametriei (figura 3.1.2) și metoda profilometriei (figura 3.1.3) [76], [78], [79].

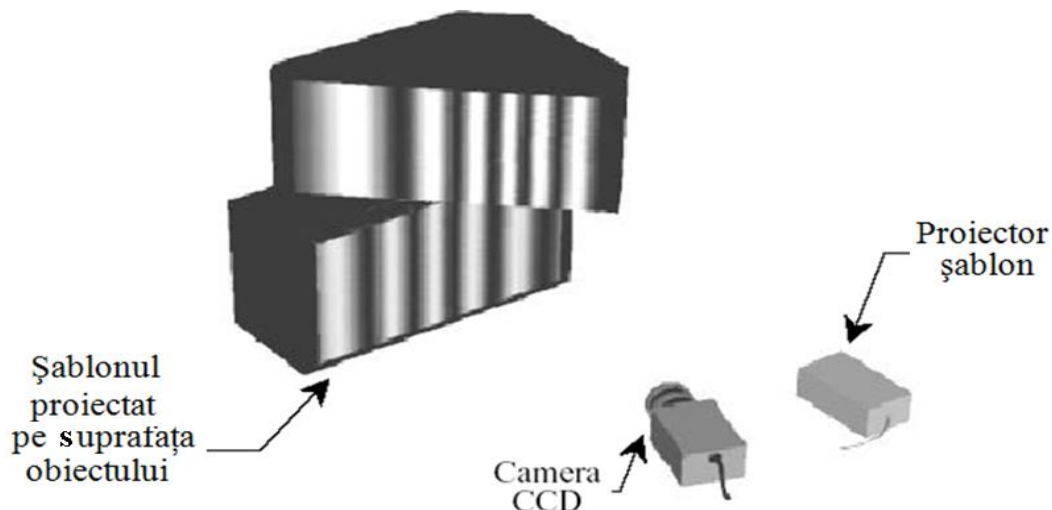


Fig. 3.1.3 Metoda profilometriei [78], [79]

Cele mai întâlnite tehnici de scanare prin triangulație LASER sunt: tehnica bazată pe punct, pe linie și pe suprafață.

a) *Tehnicile bazate pe punct* au ca principiu măsurarea punct cu punct, ceea ce înseamnă că un ciclu de măsurare se referă la determinarea coordonatelor după cele trei axe carteziane specifice punctului respectiv. Această procedură se realizează într-un mod secvențial, necesitând numeroase deplasări ale capului de măsurare al MMC (de obicei în puncte succesive). Această tehnică este utilizată în special în situația măsurării unor parametri de formă (abateri de la circularitate, de la cilindricitate, de la planeitate, de la rectilinitate etc.). Utilizarea (autosincronizare) sistemelor optice poate face capul de scanare să exploreze suprafața obiectului fără a fi necesară deplasarea întregului sistem de măsurare. Deoarece datele sunt preluate în mod secvențial de către sistem, suprafața obiectului trebuie să rămână stabilă pe toată perioada măsurării. Principalul dezavantaj al acestei metode constă în faptul că procesul devine unul inefficient în cazul scanării de suprafețe ale reperelor de dimensiuni medii și mari, de orice natură ar fi acestea [6], [75].

Ca și principiu, tehnica bazată pe punct, la rândul său se poate aplica prin mai multe procedee (figura 3.1.3), și anume: procedeul LRF (LASER Range Finding) (figura 3.1.3, a), procedeul Radar (figura 3.1.3, b) și procedeul triangulației (figura 3.1.3, c):

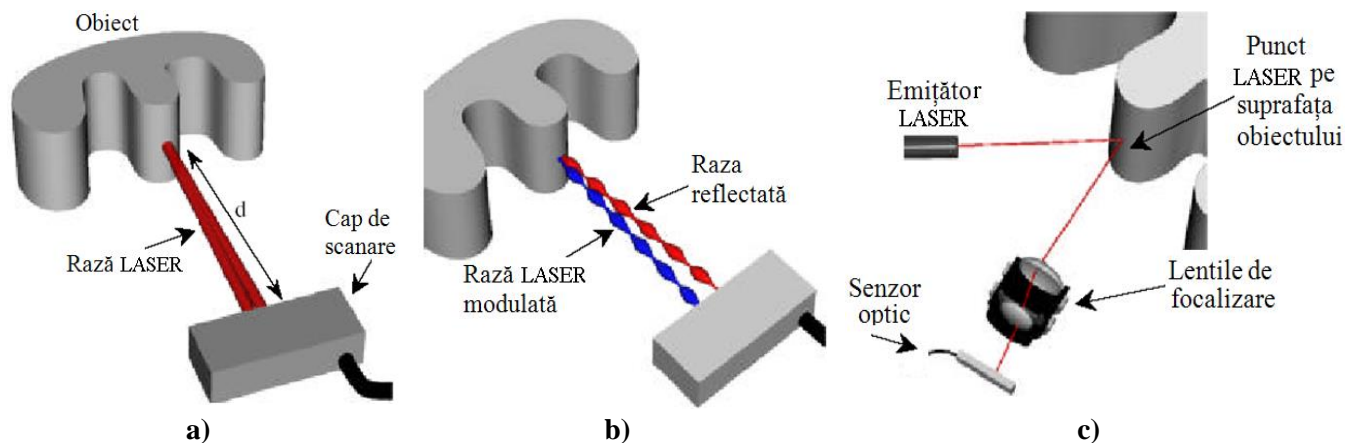


Fig. 3.1.3. Procedee ale tehnicii de scanare LASER bazată pe punct: a) procedeul LRF; b) procedeul Radar; c) procedeul triangulației [80]

Primul procedeu utilizează ca parametru de bază măsurarea timpului în care un impuls de lumină emis parcurge distanța până la suprafața piesei, este reflectat și recepționat de către capul de scanare.

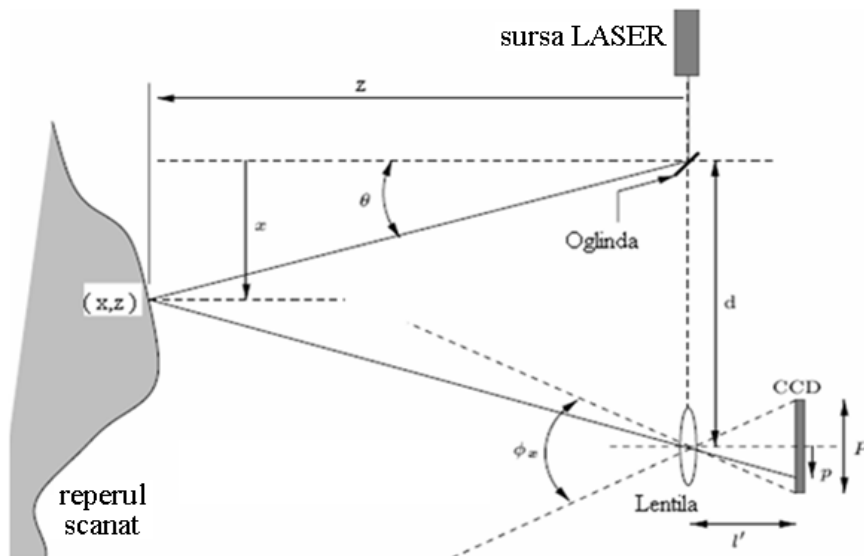


Fig. 3.1.4. Tehnica de măsurare cu radiație LASER, bazată pe punct, prin aplicarea procedurii triangulației [81]

Relația de calcul a distanței (d) de la sursă la obiect este exprimată mai jos:

$$z = \frac{d \cdot f}{p + f \cdot \operatorname{tg}(\theta)} \quad (3.1.1)$$

unde: f este distanța focală a lentilei, p – poziția fasciculului reflectat pe sistemul CCD, iar θ - unghiul de reflexie al radiației LASER.

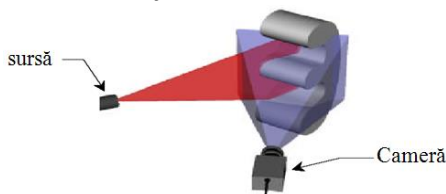


Fig. 3.1.5 Tehnica scanării bazată pe linie [76], [78]

b) Tehnicile bazate pe linie au drept principiu realizarea într-un singur pas a mai multor măsurători după o linie transversală la suprafața reperului scanat (figura 3.1.5).

Toate punctele fiind măsurate în paralel într-un singur ciclu de măsurare după o linie, face ca acest procedeu să fie în general mai rapid decât cel bazat pe punct. În urma scanării suprafeței, linie cu linie se generează o grilă de citiri. Ca procedee de scanare, se poate proceda fie la deplasarea continuă a

capului de scanare față de suprafața reperului (fix), fie la deplasarea prin translație a reperului în raport cu sistemul de scanare (fix) [76 ÷ 78].

c) *Tehnicile bazate pe suprafață* (figura 3.1.6) sunt cele mai eficiente și furnizează cele mai flexibile date privind coordonatele măsurate ale suprafeței scanate a reperului, valorile fiind organizate într-o grilă deasupra suprafeței de măsurat. Aceste tehnici necesită prelevarea mai multor imagini ale obiectului, acestea nefiind generate simultan, ci succedându-se la momente de timp foarte mici [78].

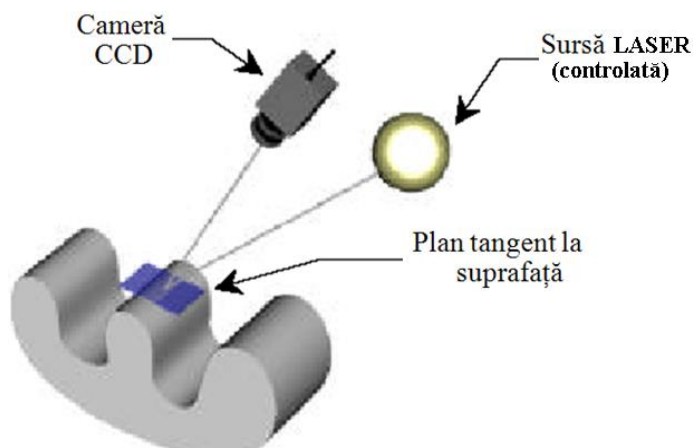


Fig. 3.1.6 Tehnica de scanare bazată pe suprafață [78]

Razele de lumină sunt proiectate paralel către suprafața reperului, acestea reflectându-se și fiind preluate de către o cameră ce formează o diagramă binară, tridimensională a umbrelor formate, pe măsură ce lumina este deplasată pe suprafața obiectului. Diagrama binară generată se va utiliza ulterior pentru determinarea câmpului înălțimilor suprafeței obiectului de măsurat. Principala problemă constă în faptul că echipamentul de achiziție de imagini generează o proiecție de perspectivă, care, adesea este ignorată, ceea ce poate conduce la anumite distorsiuni ale valorilor coordonatelor măsurate.

Avantajul principal al acestui procedeu constă în simplitatea echipamentului (o cameră CCD și una sau mai multe surse LASER), aceasta presupunând un cost scăzut pentru realizarea sistemelor de scanare ce utilizează această tehnică [78], [81].

Traductoarele ce folosesc tehnica triangulației se pot clasifica în funcție de tipul fascicolului LASER

- cu proiecție *punctiformă*, atunci când proiecția fascicolului laser pe obiect este un *punct*; în acest caz, la fiecare achiziție este numerizat *doar un singur punct* de pe suprafața obiectului;
- cu proiecție *liniară*, unde fascicolul punctiform este înlocuit cu un fascicol liniar; acest tip de proiecție este mai rapid decât cel punctiform, deoarece la fiecare achiziție este numerizat câte un vector de puncte măsurate la fiecare proiecție;
- cu proiecția unor planuri luminoase; această metodă permite achiziția rapidă a unei suprafețe întregi dar pune totuși probleme de interpretare fiind mai puțin precisă [78].

3.2 Tehnica Radar

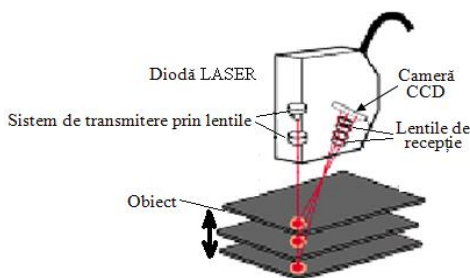


Fig. 3.2.1 Exemplu de măsurare a variației distanței până la obiect, prin aplicarea tehnicii Radar [83]

Principiul constă în măsurarea timpului de parcurgere a distanței de la suprafața măsurată la sistemul de recepție. Ținând cont de faptul că razele LASER se propagă cu o viteză constantă, distanța până la un punct oarecare aflat pe suprafața obiectului se poate afla dirijând unda LASER spre acel punct și măsurând perioada de timp necesară pentru care impulsul reflectat se întoarce la sistemul de captare (figura 3.2.1) [82].

Această tehnică se bazează pe iluminarea obiectului măsurat cu o sursă LASER, calculând informația de profunzime (distanța până la suprafața de reflexie) în funcție de energia reflectată.

3.3 Tehnica stereoviziunii se folosește în cazul sistemelor de captare pasive, pentru a calcula informația de distanță pe baza spațiului format între două sau mai multe camere de achiziție de imagini (figura 3.3.1).

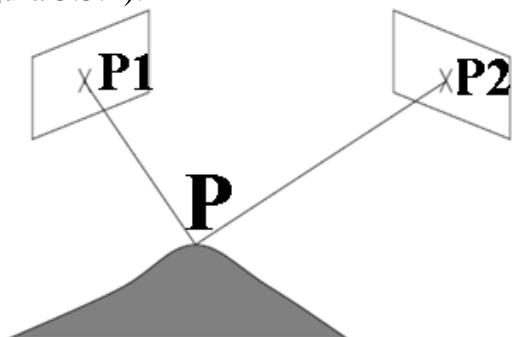


Fig. 3.3.1 Principiul tehnicii stereoviziunii [82]

Fiecare punct P de pe suprafața măsurată, aflată în câmpul vizual al celor două camere se proiectează în planele – imagine P_1 și P_2 ale celor două camere, respectiv în punctele P_1 și P_2 , conținute în cele două plane; identificarea punctelor din cele două imagini permit calcularea coordonatelor 3D ale punctului curent P . Dificultatea metodei constă în selectarea unor caracteristici identice ale celor două imagini și stabilirea corespondențelor [82].

În funcție de proveniența imaginilor, stereoviziunea poate fi clasificată în:

- viziune stereoscopică *statică*, unde se utilizează mai multe cadre filmate din poziții diferite și în același timp;
- viziune stereoscopică *dinamică*, unde se folosesc, de asemenea, mai multe cadre, dar la momente diferite de timp [82].

3.4 Tehnica Moiré



Fig. 3.4.1 Exemplu de formare a unei imagini prin fenomenul Moiré [84]

Aceasta presupune proiectarea pe obiectul supus măsurării a unor grile luminoase sinusoidale de frecvență înaltă, diferențele de fază a undelor luminoase, care conduc la franje de interferență; informația conținută în imaginea franjelor permite generarea reliefului forme. Această tehnică asigură măsurări fiabile, dar necesită multă aparatură pentru analizarea semnalului [84].

3.5 Tehnici de achiziție a imaginilor

Scopul principal al unei strategii de achiziție de date este acela de a îmbunătăți precizia procesului de numerizare unei suprafețe complexe a unui reper scanat, mai exact se face în scopul cunoașterii coordonatelor fiecărui punct 3D achiziționat. Strategia constă în determinarea coordonatelor pentru un ansamblu X de puncte de vedere x^i (sub forma unui nor de puncte) pentru obținerea unei imagini tridimensionale optime specifice reperului scanat [1], [85].

Algoritmul unei strategii de numerizare presupune următoarele etape:

a) Studiul datelor de intrare:

- extragerea informației din fișierul CAD;
- crearea unui model Voxel¹;

b) Cercetarea ansamblului X de puncte de vedere:

- determinarea punctelor de vedere;
- localizarea optimă în spațiu a fiecărui punct de vedere;

c) Estimarea preciziei datelor 3D;

d) Reprezentarea optimă a ansamblului X al punctelor de vedere [85], [86].

3.5.1 Studiul datelor de intrare constă în două etape asociate extragerii informației necesare, în funcție de datele de intrare, în vederea realizării studiului ansamblului de puncte de vedere. În prima

¹ Un voxel reprezintă o valoare pe o grilă regulată în spațiu tridimensional

etapă, fișierul CAD (în format IGES) este citit și utilizat pentru determinarea suprafețelor componente ale reperului. În ceea ce privește prima etapă, formatul IGES oferă o reprezentare precisă a tuturor suprafețelor ce compun un reper, numite suprafețe NURBS² (Non uniform rational basis spline), iar o suprafață este, la rândul ei compusă din mai multe curbe de tip segment drept, arc de cerc, curbă NURBS etc. [1], [3], [86].

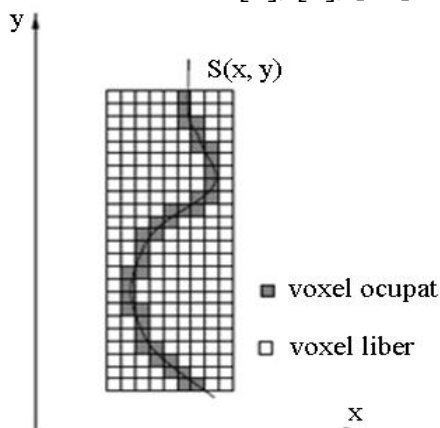


Fig. 3.4.2 Exemplu privind reproducerea modelului Voxel pentru un profil al unei suprafețe neregulate a unui reper numerizat [1], [86]

La rândul lor, suprafețele NURBS pot fi suprafețe nedecupate (pline), respectiv suprafețe decupate sau parametrice (o curbă așezată într-un plan îl împarte pe acesta într-o componentă externă și nelimitată și una internă și limitată).

Modelul Voxel al unui reper scanat este un model spațial, în care fiecare pixel poate lua două valori, respectiv valoarea „0” (pixel liber) sau valoarea „1” (pixel ocupat). Figara 3.4.2 prezintă un model Voxel pentru un profil al unei suprafețe oarecare [85], [86]. Cea de a doua etapă constă în crearea unui model Voxel al reperului scanat, pe baza identificării punctelor de vedere [85], [86].

3.5.2 Studiul ansamblului punctelor de vedere

Un punct de vedere x^i se definește ca un ansamblu de mai mulți parametri, $x^i = \{x, y, z, \Phi, \theta, \Psi, \gamma\}$ (unde $x, y, z, \Phi, \theta, \Psi$ sunt coordonatele carteziene și unghiulare ale punctului), ansamblul fiind notat cu X , fiind minimul de puncte de vedere x^i care permit numerizarea completă a unei suprafețe sau chiar a unui întreg reper. Studiul ansamblului de vedere se face independent pentru fiecare suprafață de interes și presupune parcurgerea a 3 etape: inițial este cercetată o imagine binară (2D) (ce reprezintă suprafața), pentru generarea punctelor de vedere proiectate pe aceasta. Cea de a doua etapă o constituie formarea ansamblului de puncte de vedere proiectate, care este utilizat ținând cont de toți parametrii săi, pentru obținerea punctului de vedere din spațiu. Ultima etapă constă în modificarea (după caz) a punctului de vedere astfel încât să se asigure accesibilitatea și vizibilitatea regiunii suprafeței care trebuie numerizată [1], [86].

Principiul poate fi exemplificat astfel: se definește un punct de vedere proiectat pe o suprafață ca fiind un punct central pe suprafață în timpul unei baleieri LASER. Sistemul de măsurare (captorul) este dispus astfel încât radiația LASER să fie normală la acest punct, prin urmare acesta se numește punct de vedere proiectat [86].

Generarea unui ansamblu de puncte de vedere implică folosirea a două sisteme, și anume:

- sistemul A, compus dintr-un captor de profunzime (autosincronizat), montat pe coloana MMC;
- sistemul B, compus dintr-un captor de profunzime de tip Biris, montat pe un braț de măsurare [85], [86].

² O suprafață de tip NURBS este o suprafață modelată analitic, utilizată în mod obișnuit în grafica pe calculator pentru generarea și reprezentarea curbelor și a suprafețelor

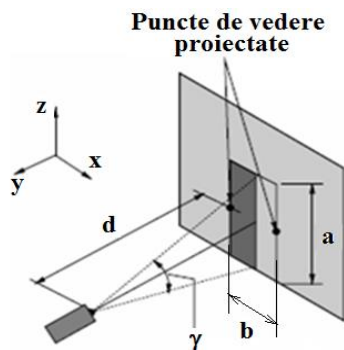


Fig. 3.5.1. Dreptunghiul de numerizare pentru sistemul A [1], [86]

Generarea punctelor de vedere la nivelul sistemului A presupune deplasarea sistemului de măsurare al MMC între două puncte din spațiu, urmărind dreapta ce unește punctele intermediare de pe traiectoria descrisă de sistem, cu condiția ca orientarea sistemului de măsurare în timpul deplasării să rămână constantă. Dacă sistemul de măsurare este orientat astfel încât baleierea razei LASER să fie perpendiculară pe deplasarea între punctele de vedere proiectate și viteza mișcării de baleiere este mai mică decât viteza baleierii razei LASER, atunci porțiunea de suprafață numerizată între cele două puncte este dată de un dreptunghi $R = a \cdot b$ (figura 3.5.1) [1], [86].

Laturile a și b ale dreptunghiului de numerizare R depind de distanța d dintre captor și reperul scanat, de câmpul de vedere γ al sistemului de măsurare și distanța b dintre cele două puncte de vedere proiectate. În general câmpul de vedere al captorului γ este fix (aproximativ 15°), iar distanța d este stabilită în funcție de strategia de achiziție, fiind în intervalul 120 mm – 160 mm. Precizia punctelor măsurate de o cameră autosincronizată este în funcție de distanța d dintre cameră și piesă scanată și de unghiul de incidență al razei LASER, deci este direct influențată de parametrii a și b . În general viteza de deplasare a MMC între două puncte este mai mică decât viteza de baleiere a razei LASER [85 ÷ 87].



Fig. 3.5.2 Traiectoria punctelor de vedere proiectate în cazul numerizării unei suprafețe cilindrice [1], [86]

În figura 3.5.2 este prezentat un exemplu privind traiectoria punctelor de vedere proiectate, traiectorie obținută prin numerizarea unei suprafețe cilindrice. Unghiul de incidență al razei LASER pe suprafață la o baleiere completă va fi mai mare atunci când baleierea se face în plan orizontal (aproape 180°) decât atunci când baleierea se face în plan vertical (aproximativ 45°) [85], [86].

În figura 3.5.3 este prezentat un alt exemplu privind generarea ansamblului de puncte de vedere proiectate pentru două suprafețe plane.

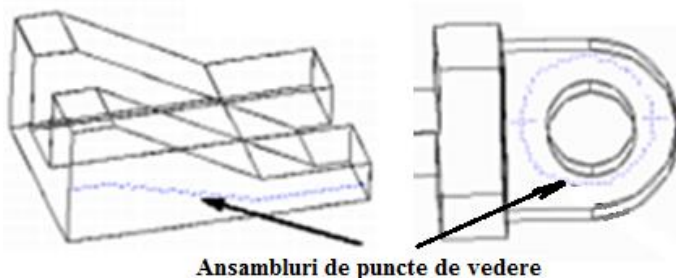


Fig. 3.5.3 Traiectoria punctelor de vedere proiectate pentru cele mai mici distanțe de baleiere pentru două suprafețe plane [1], [85]

Distanța de baleiere pentru fiecare punct, până la margini este simetrică și trebuie să fie cât mai mică. Dacă această distanță este prea mare, atunci fascicolul LASER baleiază suprafața cu un câmp de vedere mare (cu un unghi de incidență mare), sau există o distanță mare între amplasarea sistemului de măsurare și piesă, modificând condițiile optime pentru numerizare în raport cu precizia datelor 3D [1], [85].

În figura 3.5.4 este prezentat un exemplu în care poate fi baleiată întreaga suprafață a unui reper, iar figura 3.5.5 prezintă două exemple de numerizare a unor suprafețe printr-un ansamblu de puncte de vedere:

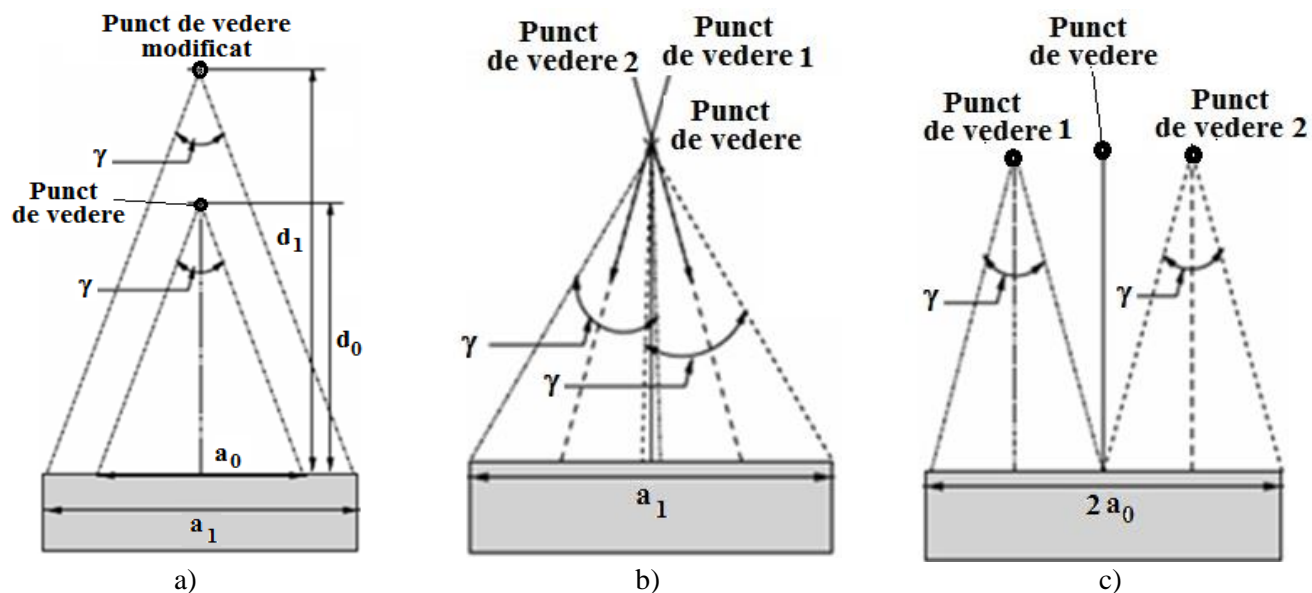


Fig. 3.5.4 Numerizarea unei suprafețe pe întreaga lățime: a) modificarea distanței între captor și suprafață; b) definirea noilor puncte de vedere ca având aceeași poziție, dar orientare diferită; c) amplasarea noilor puncte de vedere, amplasate pe aceeași linie de baleiere a razei LASER la o distanță egală între punctul p și marginea suprafeței [1], [85]

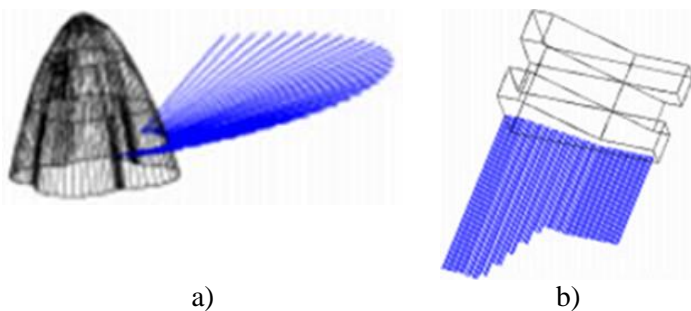


Fig. 3.5.5 Exemple de numerizare prin obținerea unui ansamblu de puncte de vedere, în urma procesului de baleiere: a) pentru o suprafață complexă; b) pentru o suprafață plană [1]

În figura 3.5.5, a) este prezentat un exemplu privind modificarea orientării unui punct de vedere, în cazul numerizării unei suprafețe complexe. Principiul este acela al variației distanței punctului de vedere pentru a se mări lățimea suprafeței de baleiere. Fiecare linie (reprezentată cu culoarea albastră) reprezintă câte o proiecție a razei LASER din punctul de vedere în care este amplasat capul de măsurare până la punctul de vedere proiectat [1], [86].

O altă variantă este cea în care numerizarea se face prin executarea unei mișcări de rotație a brațului MMC pe care este dispus sistemul de măsurare (figura 3.5.6).

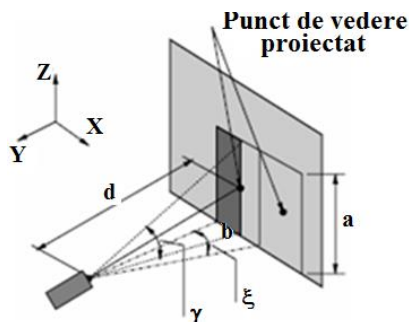


Fig. 3.5.6 Definierea elementului de suprafață de numerizare, în cazul procedurii de rotire a articulației brațului de scanare [86]

Orientarea capului de măsurare trebuie să fie făcută astfel încât baleierea razei LASER să fie perpendiculară pe direcția dată de mișcarea produsă de rotația articulației brațului de scanare al mașinii. Elementul de suprafață numerizat dintr-un anumit punct de vedere se definește ca fiind un dreptunghi $R = a \cdot b$, unde a și b sunt parametrii ce depind de distanța d dintre capul de măsurare și reperul scanat, de câmpul de vedere γ și de unghiul de rotație ξ al articulației brațului pe care este amplasat sistemul de măsurare (pe care este dispusă camera de achiziție de imagini) (figura 3.5.6) [86].

În figura 3.5.7 este prezentat un exemplu de numerizare a unei piese cu suprafețe plane, prin generarea a 5 puncte de vedere (figura 3.5.7, a), respectiv a 7 puncte de vedere (figura 3.5.7, b):

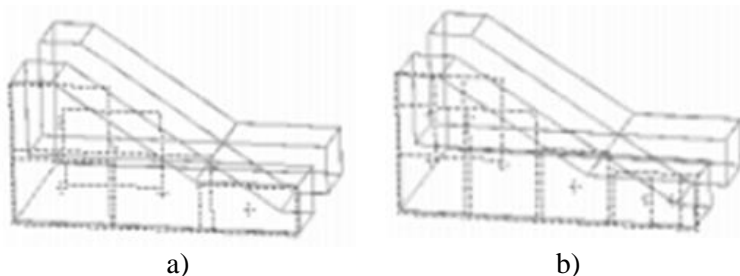


Fig. 3.5.7 Numerizarea unei piese cu suprafețe plane: a) prin 5 puncte de vedere; b) prin 7 puncte de vedere [86]

Legat de problema ocluziunii, din punctul de vedere din care se dorește realizarea unui proces de numerizare a unei suprafețe, raza LASER nu va fi întreruptă de nici un obstacol, putând deci atinge suprafața dorită [1]. Atunci când este detectată o problemă de ocluziune, sistemul de măsurare caută un nou punct de vedere, prin deplasarea pe direcția de baleiere a fascicolului LASER. Deplasarea va presupune creșterea și micșorarea unghiului de incidență al razei LASER, pe direcție baleierii, respectiv între două margini ale punctului de vedere proiectat.

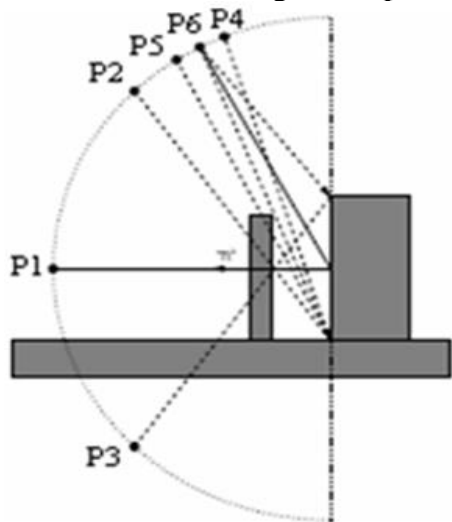


Fig. 3.5.8 Procesul de căutare al unui nou punct de vedere [86]

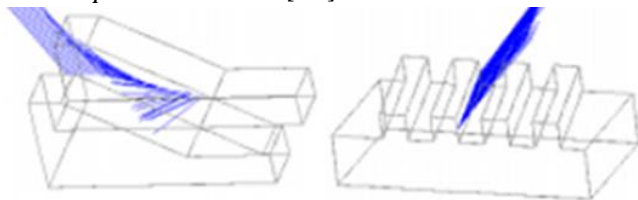


Fig. 3.5.9 Exemple de remediere a problemelor de ocluziune pentru două suprafețe, prin redefinirea punctelor de vedere [86]

3.5.3 Estimarea preciziei datelor 3D

După ce toate punctele de vedere au fost localizate și satisfac condițiile privind evitarea ocluziunii, strategia calculează precizia de măsurare, în funcție de caracteristicile fiecărui punct de vedere.

Etapa următoare a procesului este aceea de a verifica dacă poziția punctului de vedere este accesibilă și ferită de orice problemă de ocluziune. Un punct de vedere este accesibil dacă acesta poate fi atins de către suportul mecanic al brațului pe care este dispus capul de măsurare, iar în deplasarea necesară pentru a-l atinge este exclus orice risc de coliziune.

Noul punct de vedere trebuie să permită numerizarea suprafețelor dorite și, de asemenea trebuie să rămână cât mai aproape posibil de direcția normală a punctului de vedere proiectat (figura 3.5.8) [86]. Punctul inițial P₁, care a fost definit în cele mai bune condiții de precizie prezintă o problemă de ocluziune. Ca urmare sunt identificate punctele P₂ și P₃, dar care, de asemenea prezintă și ele probleme de ocluziune și, prin urmare doar puncte de vedere P₄, P₅ și P₆ elimină această problemă de ocluziune. Astfel, punctul P₄ elimină problema ocluziunii, dar strategia continuă să caute un punct care să fie cât mai aproape de punctul inițial, P₁, în acest fel găsiindu-se punctele P₅ și P₆. Procesul se oprește atunci când variația unghiului dintre cele două puncte valide va fi mai mică de 5° [86].

Figura 3.5.9 prezintă un exemplu în care punctele de vedere găsite pentru două suprafețe ce prezintă inițial probleme de ocluziune:

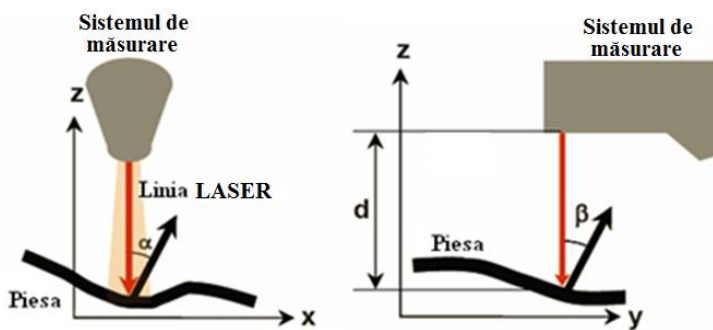


Fig. 3.5.10 Rolul parametrilor geometrici pentru evaluarea preciziei coordonatelor punctelor de măsurare, în procesul de numerizare al unui reper [85]

Precizia coordonatelor punctelor măsurate este în funcție de distanța d dintre sistemul de măsurare și reperul scanat, precum și în funcție de unghiurile de incidență α și β ale razei LASER (figura 3.5.10). Acești parametri geometrici contribuie de asemenea la determinarea orientării și la poziționarea capului de măsurare în raport cu piesa numerizată [85], [86]. Unghiul α definește unghiul de incidență în planul de numerizare dintre linia spotului LASER și direcția normală la suprafața reperului scanat

Unghiul β reprezintă unghiul de incidență în planul perpendicular pe planul de numerizare, dintre direcția razei LASER și normala la suprafața piesei [85], [86].

3.5.4 Prezentarea optimă a ansamblului X de puncte de vedere

Aceasta reprezintă ultima etapă a strategiei și constă în prezentarea ansamblului X de puncte de vedere, astfel încât deplasarea suportului mecanic între punctele de vedere să fie una optimă, în scopul reducerii duratei procesului de numerizare. Prezentarea optimă se definește în funcție de ansamblul de puncte de vedere proiectate, utilizând totodată parametrii fiecărui punct de vedere, în parte. Astfel, problema se reduce la studiarea drumului minim între punctele de vedere, astfel încât punctul de plecare să fie punctul extrem care se află cel mai aproape de origine [85 ÷ 87].

3.6 Tehnici moderne pentru optimizarea performanțelor sistemelor de scanare cu sursă LASER

Performanțele unui sistem de numerizare pe principiul emisiei radiației LASER se referă în general la următoarele aspecte fundamentale, ce vor fi analizate pe rând:

- conceptul de vizibilitate;
- influența culorii suprafeței măsurate asupra preciziei scanării [1], [6];
- identificarea pozițiilor optime în funcție de precizia de măsurare.

3.6.1. Conceptul de vizibilitate

Procesul de numerizare înseamnă rezultatul interacțiunii dintre un fascicul LASER cu suprafața unei piese, proces înregistrat printr-o cameră sau un ansamblu de camere CCD. Pentru ca acest proces de interacțiune cu reperul scanat să fie cât mai bun, un aspect foarte important îl are noțiunea de vizibilitate, acest concept vizează determinarea ansamblului de direcții, asociate diferitor suprafețe ale piesei scanate, ce pot fi potențial vizibile de către sistemul de măsurare [87]. Cercetările în acest sens, din punctul de vedere al robusteții și al ușurinței de implementare s-au axat în principal pe discretizarea spațiului de vizibilitate și a reperului scanat. În acest scop se consideră geometria formei perfecte a piesei, considerată cunoscută. Pornind de la modelul CAD asociat, reperul este convertit în format .STL, în figura 3.6.1 fiind prezentat un caz al unui reper în formă de "L", discretizat într-o rețea de tetraedre (figura 3.6.1). Pentru fiecare fațetă F_i a piesei ($i \in [1 \div n]$), cu n numărul de triunghiuri de discretizare a piesei, va fi asociată sfera unitară pentru determinarea ansamblului de direcții de vizibilitate al sistemului de măsurare [87], [88].

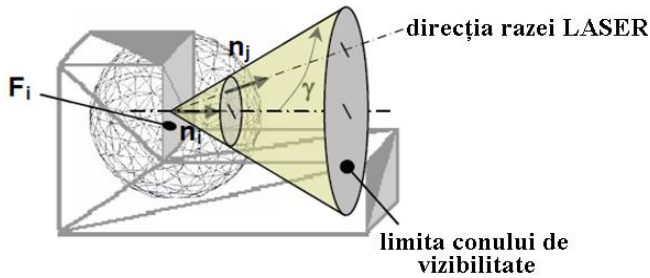


Fig. 3.6.1. Vizibilitatea locală a unei fațete F_i [88], [89]

Spațiul de vizibilitate creat se bazează pe geometria sferică, astfel că o sferă unitară discretizată modelează un ansamblu de direcții potențiale de vizibilitate. Numărul acestor direcții depinde de rezoluția rețelei de discretizare, cu V_j notându-se fiecare tetraedru ce compune sfera unitară, unde $j \in [1 \div m]$, m reprezintă numărul total de tetraedre ale sferei [88 ÷ 90].

Conceptul de vizibilitate se poate defini în trei etape succesive: în prima etapă se definește vizibilitatea din punctul de vedere al razei LASER, cea de a doua etapă se referă la vizibilitatea din punctul de vedere al camerei de achiziție, iar cea de a treia etapă reprezintă vizibilitatea totală a ansamblului sistemului de măsurare, mai exact sistemul de emisie-recepție LASER, împreună cu camera de achiziție a imaginilor. În acest context s-au făcut două ipoteze simplificatoare, prima se referă la faptul că sistemul de baleiere LASER se poate considera ca un sistem punctiform. Cea de a doua ipoteză presupune că raza reflectată de către piesă atinge camera CCD în centrul său. Cele două ipoteze pot fi aplicate pentru determinarea vizibilității sursei LASER, precum și a vizibilității camerei [87], [90].

Vizibilitatea din punctul de vedere al razei LASER se referă la determinarea ansamblului potențial de direcții de emisie de fascicule LASER ce pot atinge o anumită fațetă a reperului scanat. Într-o primă fază această detecție se face independent de alte fațete ce compun piesa. Prin această etapă se definește conceptul de vizibilitate locală. Se poate formula ipoteza prin care sursa LASER emite după o direcție ce corespunde axului sistemului de măsurare, ceea ce poate duce la formularea ipotezei sus – menționate, și anume că sistemul de baleiere LASER poate fi considerat ca un sistem punctiform [87], [88].

Din punct de vedere matematic, modelul de vizibilitate locală se poate exprima după cum urmează:

- fie F_i (cu $i \in [1 \div n]$) o fațetă a piesei de numerizat;
 - fie n_i vectorul normal-unitar, asociat fațetei F_i ;
 - fie n_j (cu $j \in [1 \div m]$) un vector normal-unitar ce definește direcția de emisie a razei LASER, asociată unei fațete F_j a sferei unitare de vizibilitate; ca urmare, fațeta F_i va fi vizibilă pe direcția de propagare (n_j) a razei LASER dacă unghiul dintre vectorul n_i și normala n_j se încadrează într-un con limitat de vizibilitate. Unghiul ce caracterizează acest con corespunde unui unghi-limită de incidență a fascicolului LASER ce se proiectează pe suprafața piesei (figura 3.6.1) [87], [88], [90].
- Ca urmare, ecuația privind reprezentarea vizibilității asupra unei fațete a unui reper discretizat este de forma [87]:

$$\frac{\vec{n}_i \cdot \vec{n}_j}{\|\vec{n}_i\| \cdot \|\vec{n}_j\|} \leq \cos(\gamma) \quad [3.6.1]$$

Prin aplicarea ecuației (3.6.1) la întregul ansamblu de fațete, se obține o hartă de vizibilitate locală, identificată pe sfera unitară. Aceasta reprezintă o interpretare geometrică a direcțiilor prin care fațeta studiată este vizibilă de către sistemul de scanare cu sursă LASER [87], [88].

În etapa următoare se pune problema determinării vizibilității globale. Prin reconstituirea acestei hărți este posibilă prevenirea anumitor fenomene de ocluziune între sursa LASER, fațeta vizată și alte fațete ale piesei numerizate. Metoda folosită se bazează pe harta de vizibilitate locală a piesei, reconstituită anterior.

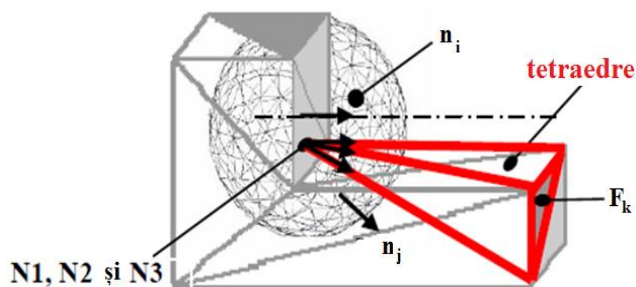


Fig. 3.6.2 Vizibilitatea globală a unei fațete F_i [1], [85]

Concret, este vorba de o proiecție a triunghiurilor F_k ($k \neq i$) piesei asupra sferei unitare. După aceasta se face un test prin care se verifică dacă se respectă condiția ca direcția n_j nu se intersectează cu nici unul dintre triunghiurile F_k . Pornind de la centrul de masă al triunghiului current F_i se construiește un tetraedru și se verifică vectorul n_j , direcția fasciculului LASER, nu se află în interiorul tetraedrului (conform figurii 3.6.2) [87], [88].

Vizibilitatea din punctul de vedere al camerei de achiziție presupune determinarea vizibilității locale și apoi a vizibilității globale a camerei, mai exact presupune stabilirea câmpului de vedere potențial al camerei CCD [87].

Pentru simplificarea modelului de vizibilitate specific camerei CCD, s-au formulat două ipoteze simplificatoare: Prima presupune că raza reflectată de piesă va ajunge întotdeauna în centrul camerei CCD. Cea de a doua ipoteză consideră o direcție de numerizare a piesei, ce corespunde axei OY a mașinii în coordonate, perpendiculară pe planul fasciculului LASER. Din punct de vedere matematic, aceasta implică aplicarea unei rotații asupra sferei de vizibilitate, cu un unghi de rotație ce depinde de orientarea direcției fasciculului LASER față de axa optică a camerei. Se va ține cont de dimensiunile câmpului de măsură a camerei, definite de unghiurile – limită ρ_1 și ρ_2 (figura 3.6.3), reprezentând limitele sistemului de măsurare ce permit numerizarea unei zone a reperului. Din acest motiv, modelul de vizibilitate globală a camerei, VG_c , este foarte asemănător cu cel al sistemului de emisie LASER [87], [91].

Modelul de vizibilitate locală poate fi definit astfel:

- fie F_i (cu $i \in [1 \div n]$) o fațetă a piesei și n_i – vectorul asociat al normalei la fațetă;
- fie n_j un vector normal unitar la sfera unitară, definind direcția de percepție la nivelul camerei CCD a imaginii unei fațete F_j (cu $j \in [1 \div m]$); ca urmare fațeta F_i va putea fi considerată ca vizibilă în direcția n_j , dacă aceasta verifică ecuația (3.6.2) [87], [88].

$$\cos(\delta_2) \geq \frac{\vec{n}_i \cdot \vec{n}_j}{\|\vec{n}_i\| \cdot \|\vec{n}_j\|} \geq \cos(\delta_1) \quad [3.6.2]$$

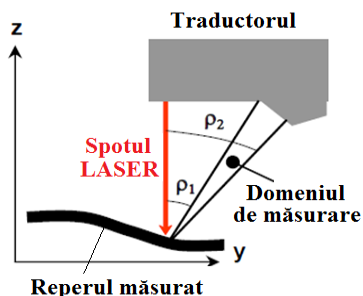


Fig. 3.6.3 Reprezentarea unghiurilor de captare a imaginii în funcție de geometria piesei și a direcției spotului LASER [89]

Ca urmare, modelul obținut cu ajutorul camerei (VG_c) se va situa foarte aproape de cel real. Conform reprezentării din figura 3.6.3, se poate exprima relația [3.6.2].

În ceea ce privește determinarea unghiurilor specifice unei vizibilități globale prin intermediul camerei, relațiile de calcul se vor aplica în mod identic. În acest caz, obiectivul este acela de a verifica dacă raza LASER reflectată de către suprafața piesei scanate ajunge exact în dreptul camerei CCD, fără a fi deviată (ascunsă) de către vreo altă fațetă a piesei [89].

3.6.2. Identificarea punctelor de vedere potențiale în cadrul procesului de numerizare se referă la aspectul alegerii celei mai bune configurații spațiale a traductorului cu sursă LASER pentru o fază de numerizare a unui reper de tip mecanic. Acest lucru vizează stabilirea hărții reale de vizibilitate a unui reper, în scopul determinării pozițiilor și a orientărilor preferențiale a traductorului. Această

determinare trebuie să se realizeze respectând condițiile metrologice și ținând seama și de specificațiile dimensionale și geometrice ale piesei, în vederea asigurării unui proces complet de numerizare [88], [89], [91].

Pentru aceasta, este necesar să se ia în considerare rezultatele analitice, prin exprimările matematice ale parametrilor direcțiilor de reflexie a radiației, în scopul stabilirii gradului de incertitudine a măsurării parametrilor de poziționare și de orientare a traductorului în raport cu reperul. Ca urmare vor fi reținute valorile considerate optime ale parametrilor unghiulari și de distanță. Acestea vor fi determinate în funcție de nivelul de incertitudine de măsurare. Aceste incertitudini vor putea defini valorile de toleranță a abaterilor, în vederea verificării conformității standardelor metrologice, potrivit standardului NF E 02-204, din 1993 [89], [90].

Din punctul de vedere practic, modelul propus al reperului scanat se bazează pe cartografierea vizibilității reale a piesei, aceasta fiind luată în considerare pentru definirea orientării cât mai bune a traductorului. Normalele la fațetele specifice sferei de vizibilitate reală reprezintă un ansamblu de direcții potențiale ale numerizării. Aceste direcții normale vor face obiectul unei analize individuale în scopul de a determina care sunt fațetele ale căror orientări ce asigură un unghi cât mai apropiat de unghiul optim de numerizare.

$$\vec{OP} = \vec{OG}_i + d_{opt} \cdot \vec{n}_j \quad [3.6.3].$$

Acest unghi este definit ca fiind parametrul principal ce arată precizia de măsurare determinată. Astfel va fi posibil să se determine coordonatele punctelor de vedere potențiale ale numerizării, luând în calcul poziționarea și orientarea traductorului. Acestea sunt determinate cu ajutorul relației [3.6.3], unde P_i reprezintă un punct de vedere potențial al numerizării fațetei F_i , față de centrul de masă G_i , aflat la o distanță optimă d_{opt} , după direcția preferențială n_j .

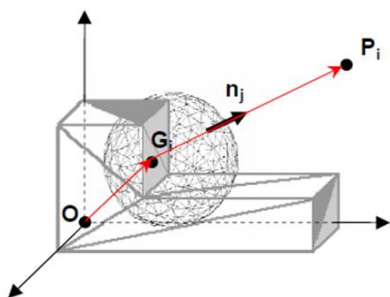


Fig. 3.6.4 Identificarea unui punct de vedere potențial optim în vederea procesului de numerizare [88], [89], [91]

3.6.3 Influența culorii suprafeței măsurate asupra preciziei scanării

Cel mai bun exemplu din acest punct de vedere îl reprezintă reperele de culoare închisă, însă cercetările s-au realizat pentru diferite spectre de culoare.

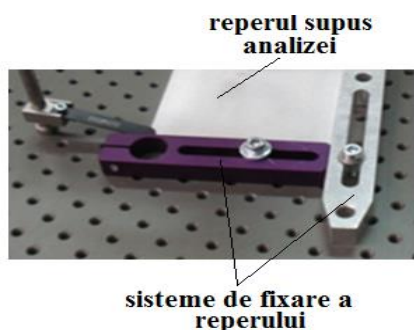


Fig. 3.6.5 Dispunerea pe masa mașinii în coordonate a unui reper prelucrat prin electroeroziune, în scopul determinării influenței culorii asupra preciziei de măsurare [1]

Din punctul de vedere al formei reperelor studiate, s-a stabilit că reperele având forme paralelipipedice sunt cele mai potrivite studiului. Pentru ca determinările să fie cât mai corecte, de-a lungul timpului, cercetările realizate au dus la concluzia că este indicat ca suprafețele pieselor să fie prelucrate prin procedeul tehnologic de electroeroziune, spre a nu se genera reflexii parazite, iar suprafața să fie mată (figura 3.6.5) [1]. Pentru simularea cât mai multor situații ale procesului de scanare, în care piesele sunt de diferite culori, pe suprafața acestor reperi prelucrate prin procedeul de electroeroziune se aplică fâșii de bandă adezivă, de diferite culori omogene (roșu, albastru, alb, negru, verde, sau galben).

Pentru delimitarea zonei de scanare, se procedează la aplicarea unei benzi format din culorile verde și galben, cu dispunere succesivă (figura 3.6.6). Este important ca fâșiile de bandă aplicate peste reper

să aibă aproximativ aceeași textură sau, cel puțin, texture apropiate de cea a materialului reperului prelucrat, spre a se reduce riscul apariției erorilor de scanare [1], [92].

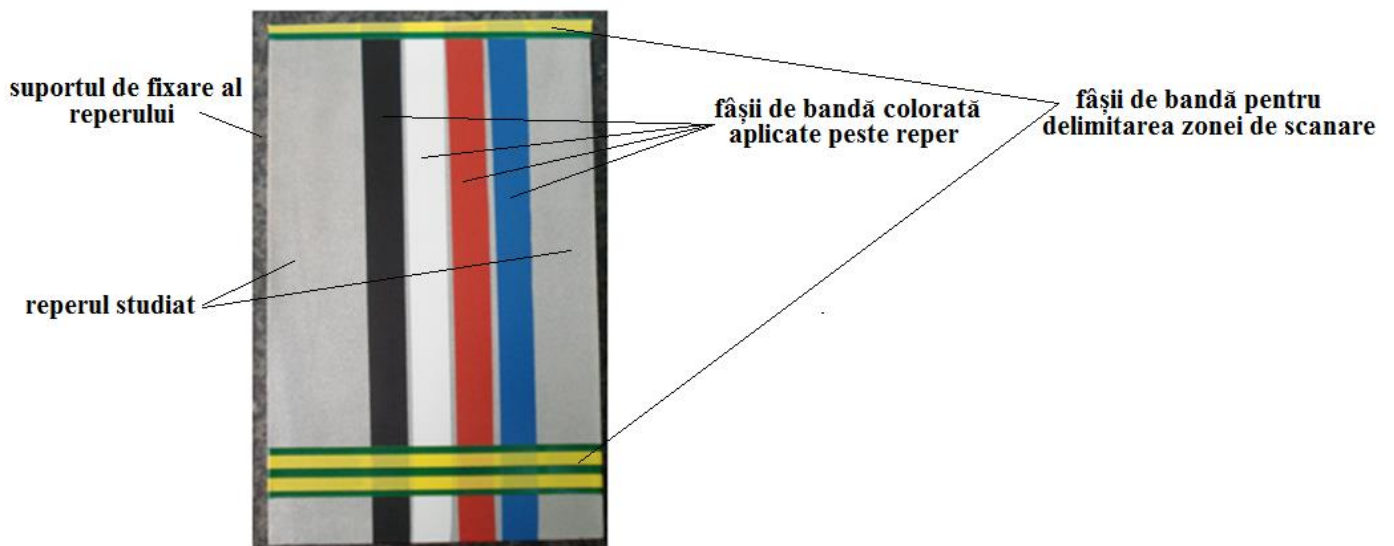


Fig. 3.6.6 Procedeele de aplicare a fâșiilor de benzi colorate pentru simularea mai multor situații de scanare din punctul de vedere al culorii reperului [1], [92]

Din punctul de vedere al configurației de măsurare, pe masa mașinii este dispus un sistem de fixare al piesei, două sfere de calibrare și un palpator cu contact, având rolul de a localiza și de a etalona sferele de calibrare (figura 3.6.7). Prin aceasta se determină sistemul de coordonate propriu al piesei, urmând a se scana zona acoperită cu bandă adezivă, delimitată de cele două benzi galben-verde, cu dispunere transversală. În prima etapă se procedează la scanarea prin contact (în vederea obținerii unui nor de puncte de coordonate, cu valori contând ca fiind etalon), iar, ulterior se trece la scanarea aceleiași zone, dar cu ajutorul unui cap de măsurare cu sursă LASER [1], [92].

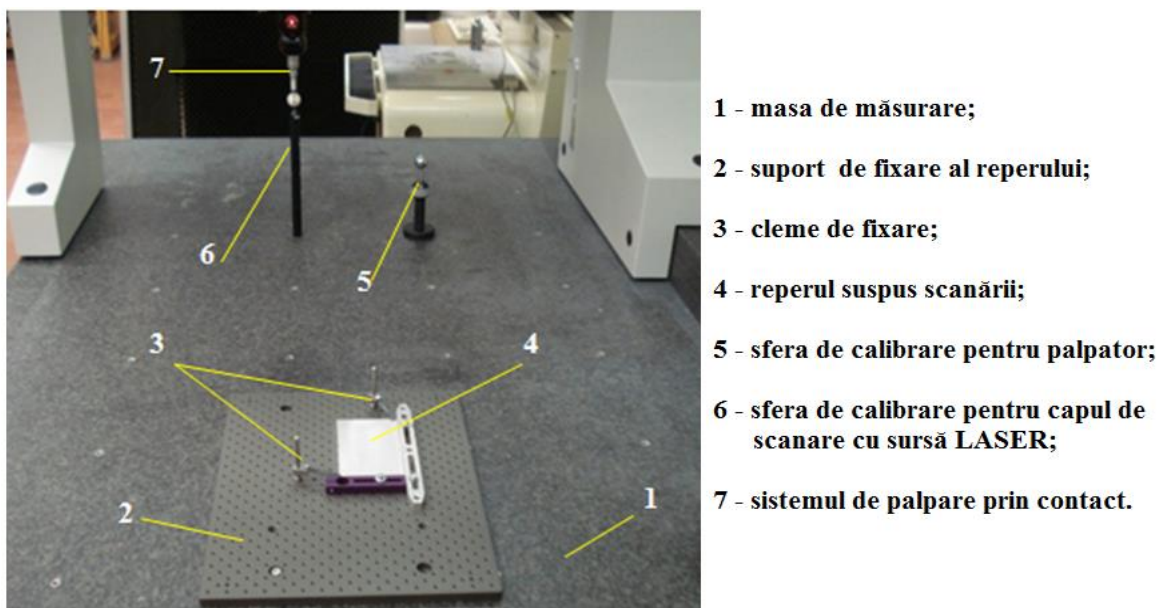


Fig. 3.6.7 Reprezentarea configurației de măsurare a reperului studiat [1], [92]

Strategia de măsurare constă în scanarea prin contact a unui număr cât mai mare de puncte pe suprafața delimitată a reperului, după care, aceeași zonă va fi scanată pe principiul emisie de radiație LASER. Cele două modele (ca nori de puncte) ale reperului scant urmează apoi să fie suprapuse, spre a se observa diferențele de coordonate. În vederea comparației rezultatelor se consideră ca etalon

scanarea prin contact, deoarece în acest caz precizia este mai ridicată decât în cazul scanării cu radiație LASER (caz în care intervin unele erori parazite cauzate de interferențele între radiațiile emise și cele reflectate). La scanare se va stabili ca originea sistemului de coordonate să se plaseze în colțul din stânga, spate al reperului, pentru a se înregistra valori numerice mici ale punctelor scanate, acestea putând fi prelucrate și verificate mai ușor. Pentru definirea sistemului de coordonate asociat reperului, de regulă se preferă utilizarea și alinierea a trei entități, de tip plan, linie, punct, fiind cea mai eficientă metodă de aliniere [1], [74].

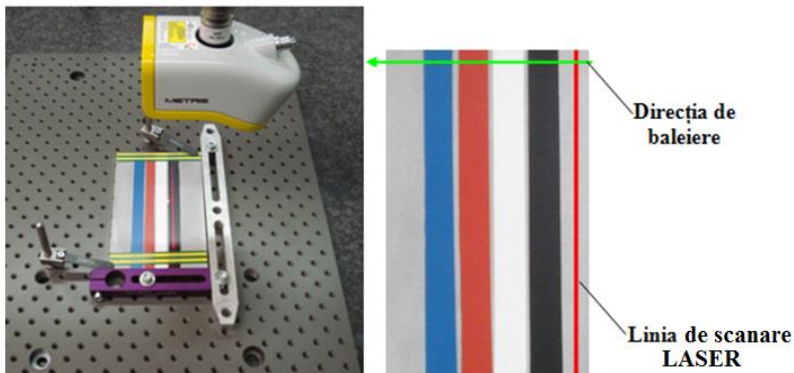


Fig. 3.6.8 Metodă de scanare transversală [1]

- prin scanarea longitudinală, în care linia LASER baleiaiază mai multe culori odată, prin deplasarea de-a lungul benzilor adezive (figura 3.6.9) [1].

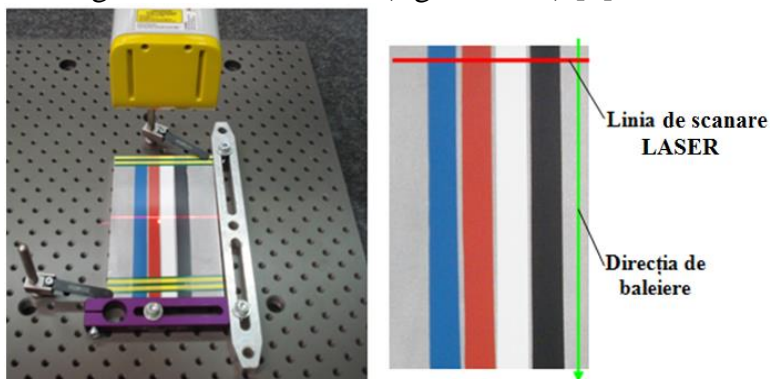


Fig. 3.6.9 Metodă de scanare longitudinală [1]

Scanarea prin procedeul emisiei radiației LASER, presupunând digitalizarea suprafeței delimitate se poate efectua în două metode diferite, după cum urmează:

- prin scanarea transversală, prin care linia LASER parcurge o singură fâșie (de o anumită culoare) la un moment dat, prin deplasare pe direcție perpendiculară față de direcția de dispunere a benzilor adezive (figura 3.6.8);

Cele două metode, practic, acoperă situațiile de scanare, întâlnite în procesele de verificare metrologică. Se acordă o atenție deosebită determinării preciziei obținute pentru fiecare culoare în parte, aceasta în ambele situații [1]. Procesarea și compararea valorilor coordonatelor, ca nori de puncte, se face prin intermediul unor interfețe software dedicate, precum *Camio* sau *Focus Inspection*, acestea permițând o gamă largă de operații [93].

Pentru analiza rezultatelor se folosesc grafice, obținute pe baza datelor statistice, generate anterior în cadrul mediului software specific. Acestea, la rândul lor, sunt generate în urma comparației norilor de puncte rezultați în urma scanării prin contact, respective prin emisie LASER. În cazul scanării cu emisie LASER, în general sunt necesare unele prelucrări ale norului de puncte, constând în îndepărtarea zonelor ce depășesc suprafața marcată prin delimitarea cu benzi transversale (figura 3.6.6). În figura de mai jos este prezentată discretizarea pe principiul triangulației a norului de puncte prelucrat, în urma scanării prin metoda transversală (când linia LASER baleiaiază) o singură culoare la un moment dat. Se poate observa o diferență între zona pe care au fost dispuse benzi adezive și zona lăsată liberă. În general, se poate constata că în cazul benzii adezive de culoare neagră sistemul de scanare întâmpină dificultăți în numerizarea zonei respective, neputându-se procesa întreaga suprafață [1], [92].

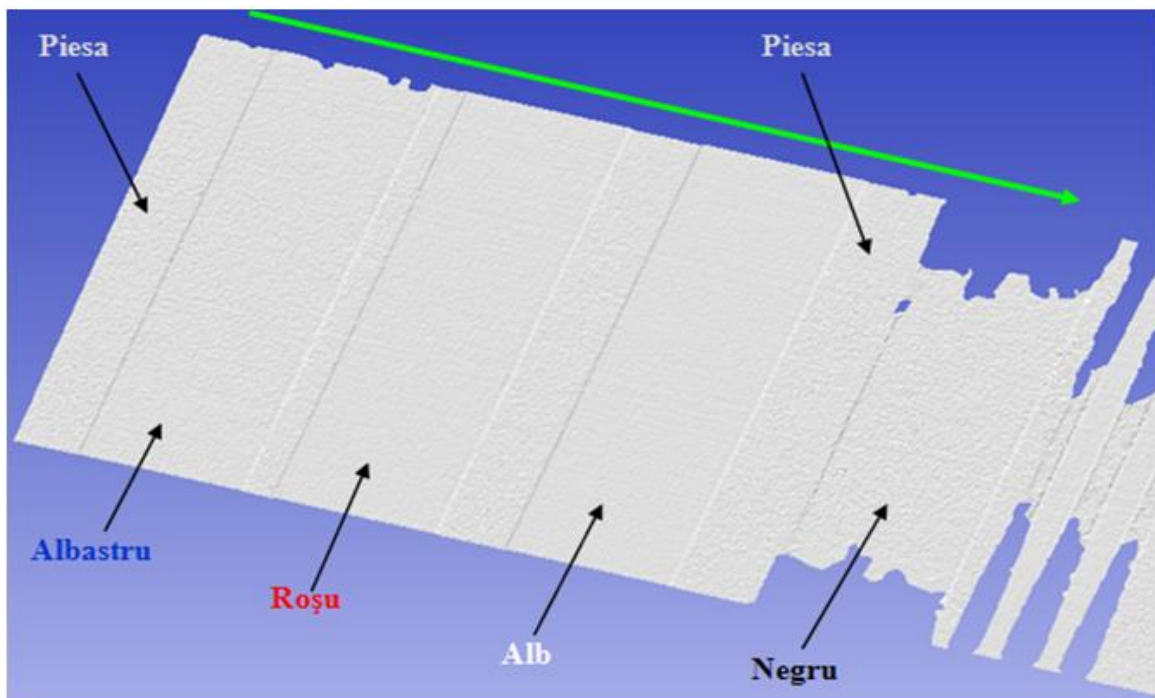


Fig. 3.6.10 Procesarea norului de puncte, prin triangulare, în urma scanării prin baleiere LASER transversală [1]

Cercetări în acest scop metrologic, au evidențiat clar diferențe nete în ceea ce privește rezultatele scanării diferitor benzi de culoare. Astfel, prin identificarea și separarea zonei aferente fiecărei culori în parte, iar comparația cu etalonul (norul de puncte obținut prin scanarea cu contact) făcându-se, de asemenea, pe rând, pentru cazul fiecărei culori, în parte [1], [94].

Cercetări metrologice complexe, realizate în cadrul unor teze de doctorat au scos în evidență clar rezultate comparative, în acest sens, pentru repere de formă paralelipipedică precum cel prezentat în figurile 3.6.8 și 3.6.9.

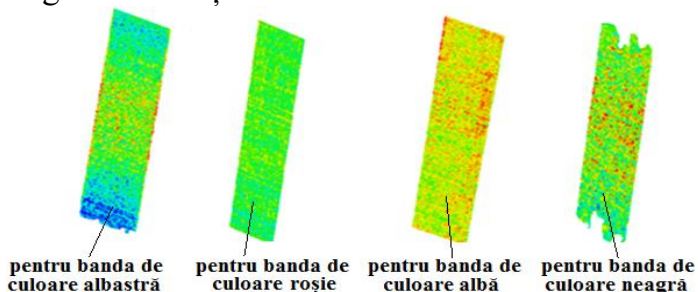


Fig. 3.6.11 Identificarea norilor de puncte pentru fiecare culoare în parte [1]

În acest sens, în cele ce urmează este prezentat un exemplu concret în care s-a scanat un astfel de reper și s-au realizat cercetări în scopul influenței culorii asupra preciziei de scanare. În figura 3.6.11 sunt prezentate rezultatele comparației pentru fiecare culoare în parte. Informații referitoare la date statistice legate de comparații între norii de puncte specifici fiecărei culori se pot vizualiza în tabelul 3.6.1:

Tabelul 3.6.1 Valori statistice obținute pentru fiecare bandă de culoare în cazul scanării transversale pe principiul LASER, a unui reper de formă paralelipipedică [1]

Scanarea după direcție transversală	Pentru banda albastră	Pentru banda roșie	Pentru banda albă	Pentru banda neagră
Numărul de puncte valide	41.415	37.607	37.791	25.020
Abaterea maximă [mm]	0,078	0,036	0,051	0,084
Abaterea minimă [mm]	-0,058	-0,035	-0,01	-0,078
Amplitudinea [mm]	0,137	0,072	0,061	0,161
Abaterea medie [mm]	-0,002	0,001	0,016	0,008
Abaterea standard [mm]	0,016	0,008	0,007	0,015
Rădăcina pătrată medie [mm]	0,016	0,008	0,018	0,017

Pe baza unor studii teoretice, coroborate cu rezultatele prezentate în acest exemplu, se poate constata că din punctual de vedere al abaterii standard, în cazul scanării benzii de culoare albă s-a obținut precizia de măsurare cea mai bună [1], [95 ÷ 97].

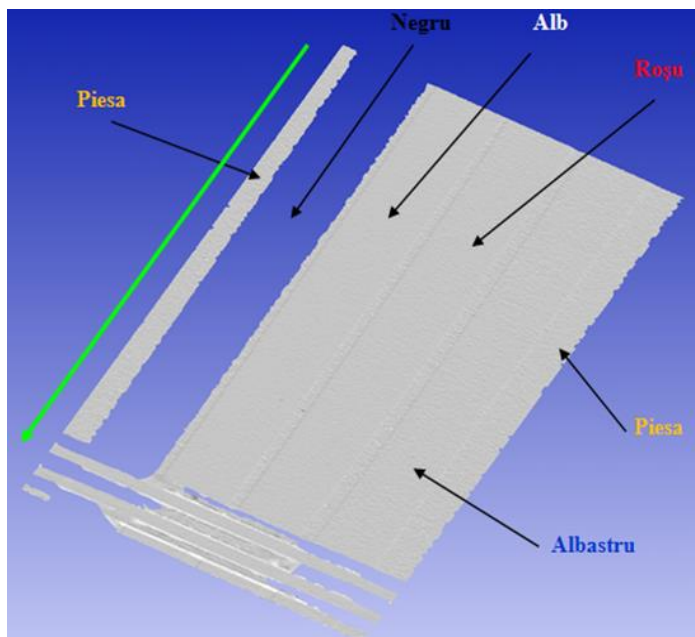


Fig. 3.6.12 Exemplu de rezultatele obținute prin triangularizarea în urma scanării longitudinale a unui reper de formă paralelipipedică, de care s-au aplicat benzi colorate diferit [1]

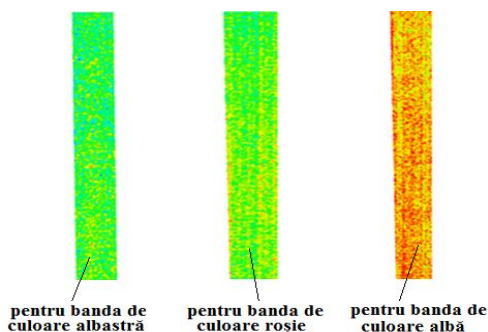


Fig. 3.6.13 Extragerea mostrelor din norii de puncte rezultați în urma scanării longitudinale, cu generarea rezultatelor specifice fiecărei benzi de culoare [1]

Tabelul 3.6.2 Valori statistice obținute pentru fiecare bandă de culoare în cazul scanării longitudinale pe principiul LASER, a unui reper de formă paralelipipedică [1]

Scanarea după direcție transversală	Pentru banda albastră	Pentru banda roșie	Pentru banda albă
Numărul de puncte valide	43.835	39.502	46.444
Abaterea maximă [mm]	0,04	0,049	0,054
Abaterea minimă [mm]	-0,056	-0,029	-0,005
Amplitudinea [mm]	0,096	0,078	0,059
Abaterea medie [mm]	0,001	0,006	0,024
Abaterea standard [mm]	0,01	0,008	0,007
Rădăcina pătrată medie [mm]	0,01	0,01	0,025

S-a putut determina faptul că, la polul opus se situează benzile de culoare albastră și neagră, cu cele mai mari abateri standard, ceea ce înseamnă că pentru reperele de culoare închisă precizia de scanare scade față de cazul reperelor de culori deschise. Tendința este valabilă și din punctul de vedere al abaterilor maxime și minime, rezultatele putând fi observate și în cazul exemplului prezentat în tabelul 3.6.1 [1]. În figura 3.6.12 este prezentat un exemplu de discretizare prin triangulație a unui nor de puncte prelucrat, generat în urma unui proces de scanare longitudinală, în cazul în care radiația LASER baleiază simultan mai multe culori. Și acest caz, într-o măsură mai mare, chiar decât în cazul scanării transversale, se poate observa că scannerul LASER întâmpină dificultăți mari la digitizarea benzii de culoare neagră, aceasta, nefiind văzută deloc de către camera CCD [1].

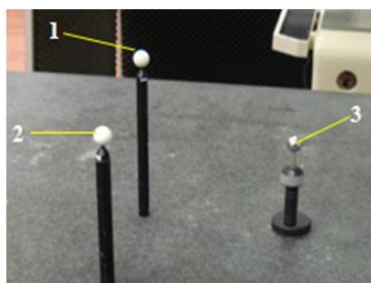
În figura 3.6.13 se observă norii de puncte pentru fiecare bandă colorată în parte, cu excepția benzii de culoare neagră, aceasta nefiind detectată de către camera CCD:

În tabelul de mai jos sunt prezentate rezultatele legate de compararea între culori, în cazul exemplului menționat mai sus:

Cele două seturi de rezultate specificate în cadrul exemplului prezentat vin să certifice concluzia potrivit căreia reperele de culoare deschisă se pretează mult mai bine la procesul de numerizare LASER decât cele de culoare închisă, în special din punctual de vedere al preciziei.

3.6.4 Identificarea pozițiilor optime în funcție de precizia de măsurare

Este cunoscut faptul că în etapele pregătitoare proceselor de măsurare și/sau scanare a reperelor, de cele mai multe ori se întâmpină dificultăți la calibrarea orientărilor capetelor de măsurare (a palpatorului, respectiv a capului de scanare LASER). Din acest motiv, cercetări în scopul reducerii acestor sincope, au dus la concluzia că este util să se testeze performanțele sistemului de scanare LASER, în vederea găsirii pozițiilor optime pentru care să se poată obține precizia maximă în cadrul proceselor de măsurare/scanare. Pentru aceasta, operația prin care se testează performanțele traductorului LASER trebuie să se facă obligatoriu în laboratoare de metrologie, menținând pe tot parcursul testelor o temperatură constantă, respectiv o iluminare omogenă [1], [95], [97]. În scopul realizării testelor, este indicat să se respecte o anumită conformație, având ca elemente principale două sfere de calibrare pentru scannerul LASER (figura 3.6.14).



1, 2 - sfere ceramice de calibrare a capului de scanare;
3 - sferă metalică pentru calibrarea palpatorului cu contact

Fig. 3.6.14 Exemplu de configurare a sistemului de testare a performanțelor sistemului de măsurare / scanare [1]

Sfera de calibrare metalică are rolul de a calibra palpatorul cu contact, cu ajutorul căruia se identifică și se măsoară cele două sfere ceramice de calibrare [63], [74]. Poziționarea celor trei sfere de calibrare se recomandă a fi făcută în așa fel încât să se evite posibilitatea vreunei coliziuni cu scannerul în timpul calibrării / măsurării [1], [97].

Testele constau în realizarea unor scanări pe principiul emisiei LASER a celor două sfere ceramice, prin folosirea mai multor orientări unghiulare ale capului de scanare, preum și în realizarea unei scanări prin contact a celor două sfere. Cu ajutorul mediilor software dedicate (ex. *Focus Inspection*, *Camio*, *PC-DMIS* etc.) interpretarea rezultatelor testelor se face prin generarea unor nori de puncte, de formă sferică, aspectul primordial constând în determinarea distanței dintre centrele sferelor virtuale și compararea cu distanța dintre centrele sferelor reale [1], [97].

Prima etapă necesară pentru testarea pozițiilor optime ale capului de scanare (figura 3.6.15), de regulă constă în identificarea și măsurarea celor două sfere prin utilizarea palpatorului cu contact (acesta fiind în prealabil calibrat cu ajutorul sferei metalice).

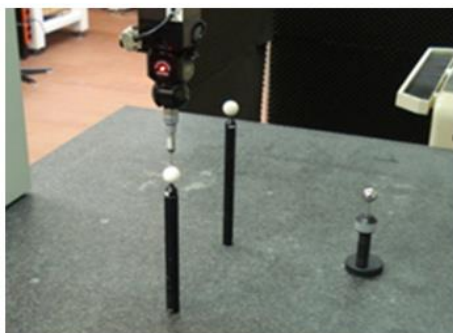


Fig. 3.6.15 Etapa de identificare și măsurarea celor două sfere ceramice, prin determinarea distanței dintre centrele acestora [1], [97]

Pentru ca rezultatele să fie cât mai corecte, se recomandă ca fiecare sferă ceramică, în parte să fie măsurată prin contact prin intermediul unui număr cât mai mare de puncte (minim 20), luate echidistant pe întreaga suprafață [1], [97]. După înlocuirea palpatorului cu contact cu scannerul LASER, se stabilește direcția de scanare. Scanarea trebuie să pornească înainte de sfera 1 și să se încheie după sfera 2 (figura 3.6.16).

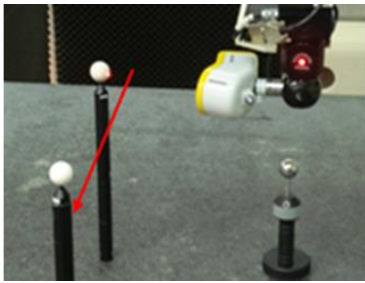


Fig. 3.6.16 Stabilirea direcției și a distanței de scanare LASER [1]

Se recomandă ca sferile să fie poziționate la înălțimi diferite, și anume sfera 1 să fie situată mai sus decât sfera 2, fără, însă, a se depăși câmpul de vedere al senzorului LASER. Această măsură se ia spre a rezulta mai multe situații în determinarea pozițiilor optime de scanare (figura 3.6.17) [1], [98].

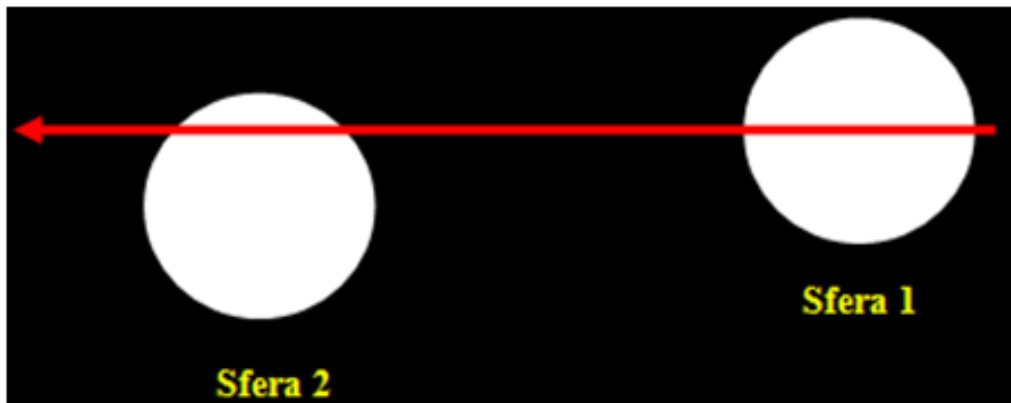


Fig. 3.6.17 Poziționarea pe direcție verticală a sferelor ceramice de calibrare [1], [98]

Pe parcursul procedurii de testare, este necesar să se utilizeze diferite orientări ale capului de scanare LASER, toate în planul vertical, cu unghiul director A care pornește de la 0° , putând fi incrementat cu un pas de 30° , până la valoarea de 90° . Celălalt unghi, B, va putea lua doar două valori unghiulare, și anume $\pm 90^\circ$. Prin combinarea celor două unghiuri directoare se poate astfel ajunge la un număr de 7 orientări distincte (figura 3.6.18) [1], [98].

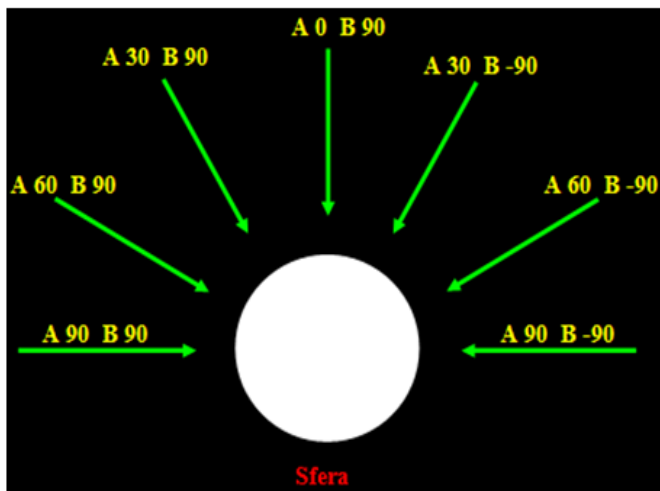


Fig. 3.6.18 Orientările unghiulare ale capului de scanare, utilizate pe fiecare sferă de calibrare, în cadrul testelor [1], [98]

Tot în scopul asigurării unei analize cât mai complexe (prin generarea unui număr cât mai mare de situații de măsurare), se recomandă ca pentru numerizarea sferelor de calibrare să se folosească trei distanțe de scanare (figura 3.6.19). Acestea se recomandă a fi în progresie aritmetică, cu rația de aproximativ 5 mm.

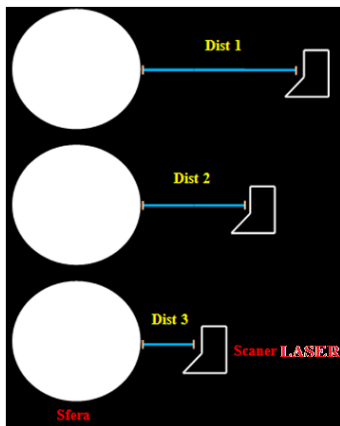


Fig. 3.6.19 Stabilirea distanțelor de scanare ale capului LASER față de sferile ceramice de calibrare [1]

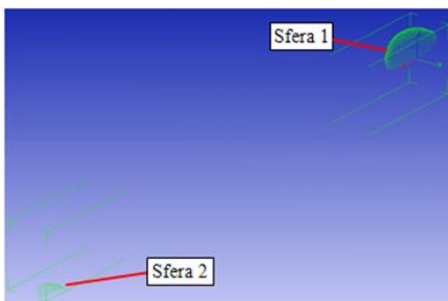


Fig. 3.6.20 Exemplu de nor de puncte rezultat în urma unei scanări a celor 2 sfere de calibrare [1]

Pentru determinarea pozițiilor centrelor sferelor de calibrare se recurge la interpolarea sferelor prin norul de puncte, cu ajutorul mediilor software (figura 3.6.21), după care se procedează la exportarea datelor obținute în format .TXT, pentru fiecare sferă generată, în parte [1].

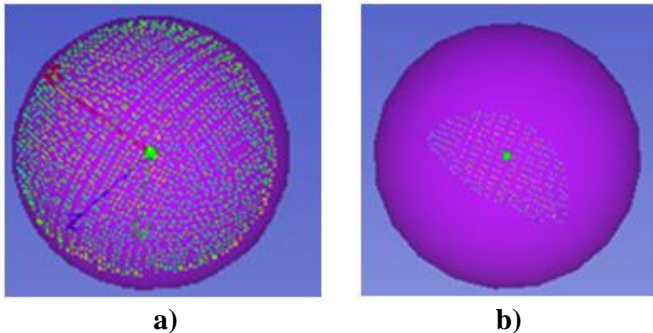


Fig. 3.6.21 Sferile virtuale, generate cu ajutorul norilor de puncte: a) pentru sfera ceramică 1; b) pentru sfera ceramică 2 [1]

Combinând astfel cele 7 orientări ale capului de scanare cu cele trei distanțe, rezultă în final un număr de 21 de determinări, pe baza cărora se pot stabili destul de precis și corect performanțele scannerului LASER [1], [97], [98].

În figura 3.6.20 este prezentat un exemplu de nor de puncte rezultat în urma scanării celor două sfere de calibrare, printr-o singură baleiere și o singură orientare. Pentru ca mediul software să poată identifica ambele sfere, norul de puncte trebuie împărțit în două (figura 3.4.20) [1].

Se poate observa faptul că pentru sfera 2, situată mai jos în câmpul de vedere al scannerului LASER, norul de puncte este mai redus decât în cazul sferei 1, deoarece senzorul nu poate vedea suprafața în mod corespunzător [1]. Datele exportate pot fi ulterior prelucrate în mediul *Matlab*, fiind apoi sintetizate în tabele, putând fi astfel interpretate rezultatele și concluziile privind amplasarea optimă a scannerului LASER. Analiza datelor se poate face în funcție de abaterea standard, distanțele dintre cele două sfere fiind raportate la fiecare axă în parte.

De asemenea pozițiile centrelor sferelor se raportează la cele trei axe carteziene. În figura 3.6.22 este prezentat un exemplu de reprezentare a rezultatelor privind abaterile standard, în funcție de diferite orientări ale capului de scanare [1].

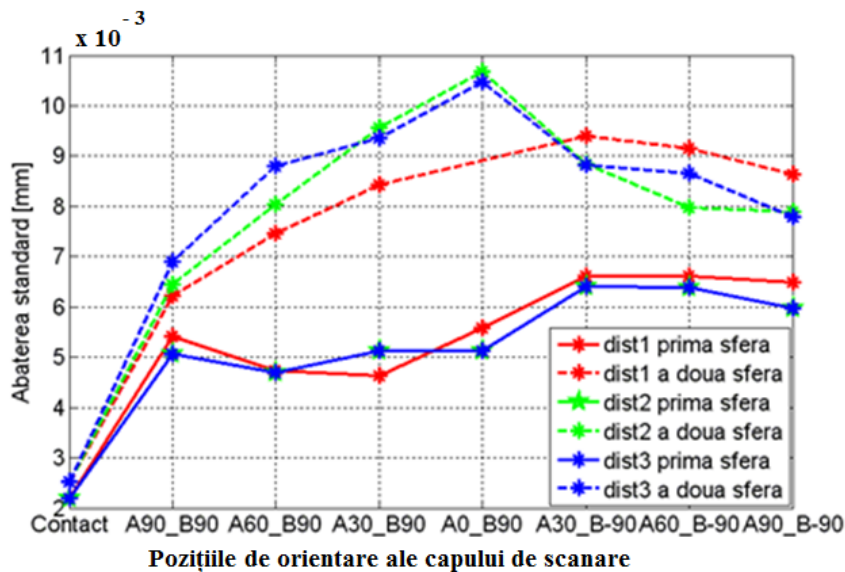


Fig. 3.6.22 *Comparația din punctul de vedere al abaterii standard, pentru diferite orientări ale capului de scanare, în cazul celor două sfere de calibrare [1]*

Se poate, deci trage concluzia că indiferent de orientarea capului de scanare, la digitizarea unei suprafețe, aspectul cel mai important pentru obținerea unei precizii cât mai ridicate se referă la scanarea unei zone cât mai mari, dar menținând distanța de scanare în limitele câmpului de vedere al scannerului [1], [97], [98].

În general, se poate deci constata că orientările pentru care se obțin deviațiile cele mai mari în raport cu scanarea prin contact sunt A90_B90 și A60_B-90. Modalitatea de testare exemplificată și descrisă poate fi generalizată și utilizată ca procedură de testare standard în cadrul oricărui proces de măsurare / scanare pe principiul LASER, atunci când sunt necesare precizii mari pentru repere cu geometrie complexă [1], [98].

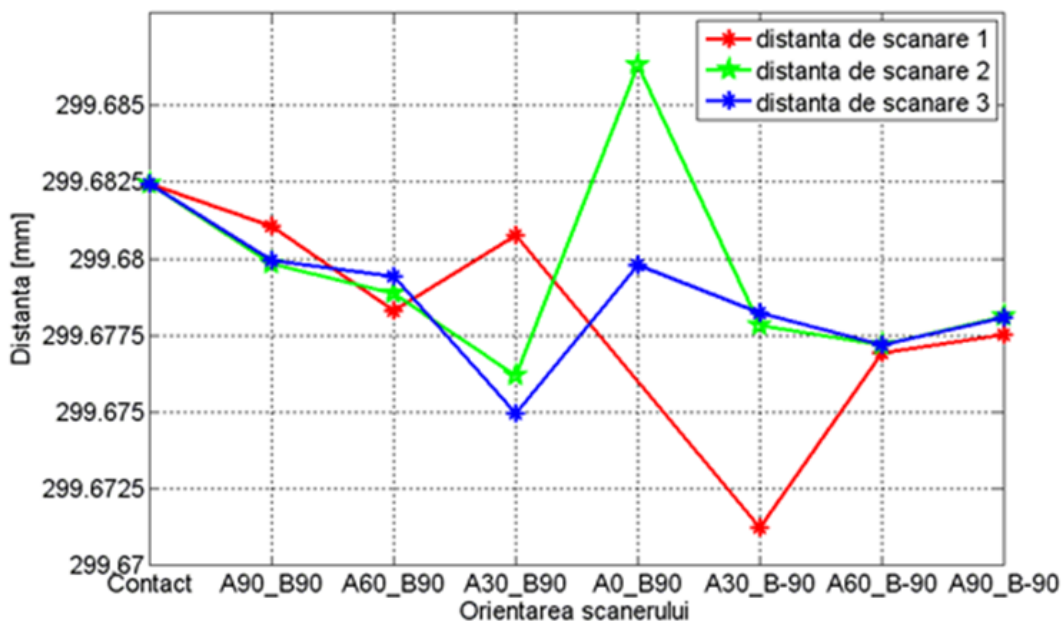


Fig. 3.6.23 *Exemplu de comparație a distanțelor dintre cele două sfere, raportat la axa OX [1]*

Prin comparația din punctual de vedere al abaterii standard pentru ambele sfere (figura 3.6.23), urmărindu-se diferențele dintre valorile obținute pentru prima și cea de a doua sferă, se poate constata următorul lucru: Cu cât scannerul baleiază mai mult din suprafața de măsurat, cu atât norul de puncte este mai mare (mai complet), iar măsurările vor fi mai precise. Spre exemplu, în cazul sferei 1, atunci când scannerul numerizează o suprafață mai mare, diferența privind abaterile standard în cazul celor 7 orientări este una foarte mică (de ordinal a 2 – 3 μm).

Capitolul 4

Aplicații ale mașinilor de măsurat în coordonate cu sisteme de scanare cu sursă LASER

În ultimul timp, pe plan mondial aplicațiile pentru care se utilizează atât mașinile complexe, cât și cele simple, bazate pe sistemul emisiei de radiație LASER a cunoscut o dezvoltare deosebită [80], [82], [99]. Acest lucru se datorează unor avantaje nete, cum ar fi scanarea reperelor complexe și/sau deformabile, precum și eficiența foarte mare, timpul necesar unui proces de numerizare al unui reper cu geometrie complexă putând fi redus de până la zece ori în comparație cu durata specifică procesului de scanare clasică (prin contact cu reperul). Ca urmare, în ciuda unor dezavantaje, cum ar fi costul ridicat, respectiv sensibilitatea în cazul scanării unor repere de culoare închisă și/sau cu grad înalt de reflexie, utilizarea sistemelor de scanare LASER în cadrul mașinilor de măsurare fixe și portabile a cunoscut și cunoaște o continuă dezvoltare [86], [87].

În cele ce urmează, în acest capitol sunt prezentate câteva exemple de aplicații atât a mașinilor clasice (fixe) de măsurare în coordonate, cât și a celor portabile, în care diferite repere utilizate în industrie și medicină au putut fi numerizate eficient cu ajutorul sistemelor de scanare cu LASER [1], [48], [50].

4.1 Aplicații ale sistemelor de scanare LASER, utilizate în cadrul mașinilor de măsurare fixe

Procesul de numerizare cu ajutorul echipamentelor de scanare pe principiul emisiei LASER, la ora actuală își găsește aplicații cu precădere în domeniul industrial, al biomecanicii și al ingineriei medicale. În domeniul industrial, o ramură aparte o constituie industria auto, aici fiind necesare procese de verificare și scanare a diferitor repere cu rol funcțional și tehnologic în construcția motoarelor, a ambreiajelor, a sistemelor de transmisie etc [1], [48], [50], [75].

4.1.1 Exemplu de reper de tip turbină supus procesului de numerizare cu sisteme LASER

În cele ce urmează este prezentat pe larg un exemplu de aplicație a proceselor de numerizare pe principiul radiației LASER pentru un reper de tip turbină, cu rol în componența motoarelor auto complexe. Luarea în considerare a acestui reper ca obiect de studiu s-a făcut deoarece acesta prezintă o geometrie complexă și, totodată se pretează foarte bine pentru procesele de numerizare asigurate de către mașinile în coordonate pe principii moderne de scanare. Scanarea unor repere cu geometrii complexe, cum este cel de tip turbină prezentat în exemplul de față se pretează, dup caz, la operații tehnologice de acoperire a suprafețelor lucioase, spre reducerea erorilor cauzate de interferența radiațiilor incidente cu cele reflectate. În descrierea exemplului de față este prezentat modul în care se poate proceda pentru numerizarea suprafeței turbinei, atât în cazul în care suprafața rămâne în stare liberă, cât și în cazul în care se procedează la acoperirea acesteia. Pentru aceasta, în general se recomandă acoperirea suprafeței reperului cu un strat subțire de pulbere albă, prin procedeul de șpreiere.

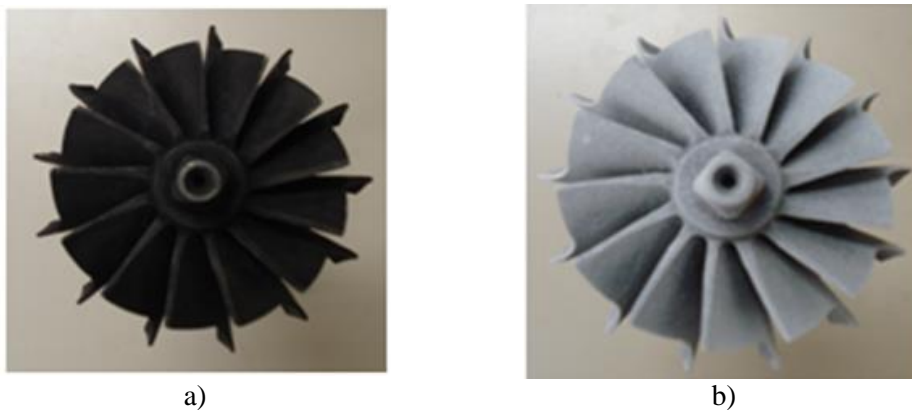


Fig. 4.1.1 Prezentarea reperului supus numerizării în cele două ipostaze: a) în stare naturală; b) în stare șpreiată [1]

În acest caz, pentru procesul de numerizare a reperului de tip turbină s-a folosit o mașină în coordonate echipată cu capete de scanare cu sursă LASER de tip *LC 50* și *LC 60 DX*, produse de către compania *Nikon Metrology* [1].

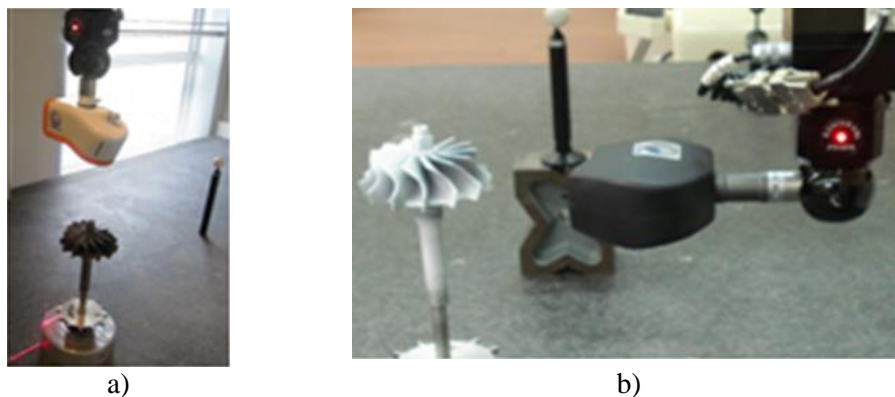


Fig. 4.1.2 Scanarea turbinei cu capetele *LC 50* și *LC 60 DX*, prin utilizarea diferitor orientări ale acestora: a) scanarea turbinei în stare naturală; b) scanarea turbinei acoperită cu stratul de pulbere albă [1]

Motivul pentru care în industrie se utilizează în mod frecvent sistemele de scanare din seria *LC 50* constă în performanțele ridicate ale acestora, acestea putându-se remarca și din caracteristicile tehnice specificate în tabelul de mai jos:

Tabelul 4.1.1 Caracteristicile tehnice ale sistemelor de scanare cu LASER din seria *LC 50* [1], [101]

Denumirea caracteristicii	Valoarea
precizia	15 μm
domeniul de măsurare (câmpul de vedere, pe lățime și înălțime)	50 x 60 mm
masa	315 g
lățimea liniei spotului LASER	50 mm
adaptabilitatea la MMC	la toată gama de capete de măsurare PH10

Produs tot de către compania *Nikon Metrology*, sistemul de scanare *LC 60 DX* are performanțe îmbunătățite, având următoarele caracteristici tehnice:

Procedeul se aplică în special atunci când reperul este de culoare închisă și prezintă suprafețe cu grad ridicat de reflexie [100]. În figura 4.1.1 este prezentată turbina scanată în stare naturală (neacoperită), precum și în stare șpreiată.

Procedeul de scanare a turbinei, cu ajutorul capetelor de scanare *LC 50* și *LC 60 DX*, presupune utilizarea diferitor orientări, în funcție de geometria palelor turbinei, prin respectarea distanței optime de lucru de la trestor la suprafața de scanat (figura 4.1.2).

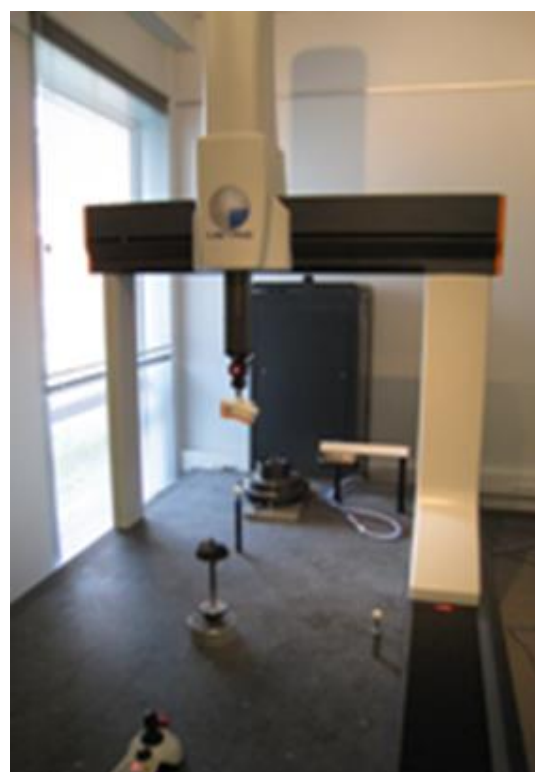
Tabelul 4.1.2 Caracteristicile tehnice ale sistemelor de scanare cu LASER din seria LC 60 DX [102]

Denumirea caracteristicii	Valoarea
precizia	7 μm
rezoluția de scanare	0,06 mm
viteza maximă de achiziție	75.000 pct / s
distanța de scanare	95 mm
domeniul de măsurare (câmpul de vedere, pe lățime și înălțime)	60 x 60 mm
masa	390 g
lățimea liniei spotului LASER	60 mm
adaptabilitatea la MMC	la toată gama de capete de măsurare PH10

În figura 4.1.3 este prezentat un exemplu în care astfel de capete de scanare au putut fi montate și utilizate pe mașini în coordonate *COORD3 MC16*, respectiv *Metris C3* [103]:



a)



b)

Fig. 4.1.3 Exemplu de adaptare și utilizare a unui cap de scanare din seria LC 60 DX pe două tipuri de MMC: a) pe modelul *COORD3 MC 16*; b) pe modelul *Metris C3* [1]

Pentru manipularea sistemului de scanare, procesarea norilor de puncte, operațiile cu suprafețe, alinieri, comparații și generare de rapoarte se utilizează medii software dedicate, cum ar fi de exemplu mediul *Focus Inspection* [1], [104].

În exemplul prezentat, legat de scanarea reperului de tip turbină, în cele ce urmează vor fi descrise trei proceduri de digitizare, în condiții diferite de stare a suprafeței reperului, respectiv pentru diferite performanțe ale scannerului LASER. Pentru fiecare procedeu de numerizare se atribuie câte un acronim, acest lucru fiind recomandat în vederea unei mai rapide și mai ușoare identificări, în situația în care procedeele de scanare sunt evaluate din punctul de vedere metrologic. De exemplu pentru scanarea turbinei în stare naturală cu capul de scanare *LC 50* se poate atribui simbolul *T50-N*, pentru scanarea turbinei acoperită cu pulbere albă cu același cap de scanare se poate atribui simbolul *T50-S*,

iar pentru scanarea turbinei în stare naturală cu capul de scanare *LC 60 DX* se poate atribui simbolul *T60-N* [1].

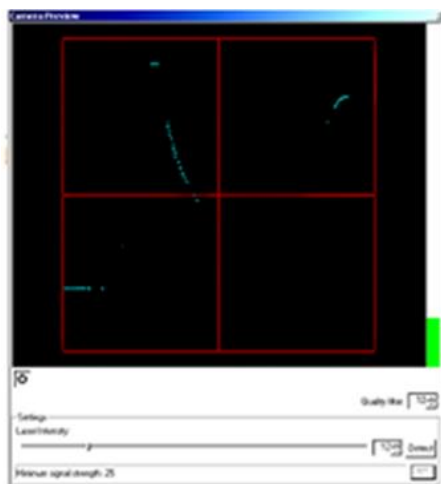
În vederea digitizării turbinei este necesară o manipulare cu mare atenție a sistemului de scanare, pentru evitarea riscurilor de coliziune cu reperul scanat. Din acest motiv se are în vedere degajarea de oricare alte elemente a zonei de lucru a scannerului. Pentru sporirea accesului la suprafețe din zone greu vizibile ale unor reperi complexe, cum este cel de tip turbină, se recomandă o amplasare a reperului pe diferite elemente de tip suport. De asemenea, trebuie ținut seama de faptul că pentru numerizarea pe principiul emisiei LASER, spațiul de lucru necesar este mult mai mare decât în cazul numerizării prin contact cu reperul. Ca urmare nu este necesare o calibrare pentru fiecare orientare, în parte, cum este necesar în cazul scanării prin contact, ceea ce presupune, în mod evident o scădere drastică a timpilor de lucru.



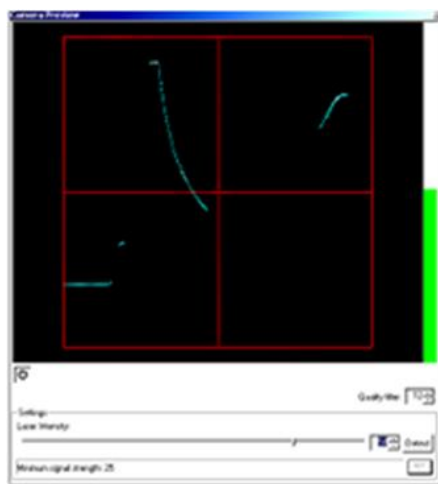
Fig. 4.1.4 Exemplu de orientare a capului de scanare cu LASER, după cele două unghiuri de rotație, în cele două plane [1]

În scopul creșterii eficienței în lucru, se recomandă calibrarea orientărilor capului de scanare înainte de începerea scanării propriu-zise. În cazul unor reperi cu geometrii complexe (cum este cazul reperului de tip turbină), în multe situații sunt necesare calibrări de noi orientări, neprevăzute inițial [1]. În figura 4.1.4 este prezentat un exemplu prin care definirea orientărilor capului de scanare se face în funcție de unghiurile de rotație în cele două plane (unghiurile A și B), în mod identic cu cazul folosirii capetelor de scanare prin contact.

În vederea digitizării unor reperi precum cel de tip turbină, prima etapă constă în realizarea operației de inițializare a mașinii, cu temporizarea unei durate de 30 de minute, necesară încălzirii senzorului LASER. Următoare etapă constă în calibrarea orientărilor necesare numerizării reperului, urmată de ajustarea intensității spotului LASER în scopul înregistrării unui număr cât mai mare de puncte într-un interval cât mai scurt de timp.



a)



b)

Fig. 4.1.5 Fereastra de vizualizare a camerei CCD: a) pentru intensitate mică; b) pentru intensitate ridicată [1]

De această etapă de ajustare (deosebit de importantă) depind atât acuratețea, cât și timpul necesar procesului de scanare [105]. Pentru reglarea intensității fasciculului LASER se utilizează o fereastră de vizualizare a camerei CCD (figura 4.1.5), în care operatorul poate observa efectul schimbărilor [1].

Se poate observa că la o distanță oarecare, intensitatea radiației poate avea drept efect o mai bună vizibilitate a suprafețelor scanate, ceea ce înseamnă achiziția unui număr mai mare de puncte. Pentru o distanță corespunzătoare de scanare, bara din partea dreaptă ce corespunde intensității razei LASER

este de culoare verde, în cadrul ferestrei de vizualizare punctele fiind reprezentate cu culoarea albastru deschis. Dacă, însă reprezentarea este de culoare portocalie sau roșie, înseamnă că suprafața de scanat se află prea aproape de scanner, punctele fiind în acest caz saturate. În acest caz exactitatea informațiilor achiziționate va fi una scăzută. Având în vedere faptul că de cele mai multe ori, prin complexitatea geometriei reperului numerizat, au loc schimbări bruște ale distanței de scanare (de exemplu în cazul turbinei), există riscul apariției unor probleme de acuratețe chiar și pe lungimi mici ale direcției de scanare. În general complexitatea geometriei reperelor scanate, făcând absolut necesară definirea și calibrarea mai multor unghiuri de orientare a capului de scanare, face ca durata procesului efectiv de scanare a reperului să crească foarte mult. În tabelul de mai jos este prezentat un exemplu de definire a mai multor unghiuri de orientare a capului de scanare pentru captarea întregii suprafețe a reperului de tip turbină [1].

În funcție de tipul de scanare, în cadrul procesului de numerizare este necesar un număr mai mare sau mai mic de orientări unghiulare, presupunând timpi de scanare diferiți. Din tabelul 4.1.3 se poate observa faptul că scanarea turbinei în culoarea sa naturală, cu scannerul LC 50 (scanarea cod T50-N) ridică mai multe probleme decât în celelalte două situații. Scanarea turbinei cu capul de scanare LC 60 DX (codul de scanare T60-N) este mult mai rapidă, datorită vitezei sporite de achiziție. De exemplu pentru scanarea unor repere de tip turbină cu cote de gabarit de aproximativ 200 mm lungime și 120 mm în diametru (la nivelul palelor turbinei) sunt necesare aproximativ 3 ore pentru un proces complet de numerizare. În cazurile T60-N și T50-S (vezi mai sus atribuirea codurilor de scanare) numărul de orientări se reduce aproape la jumătate față de cazul scanării T50-N (cel mai defavorabil). Ca urmare, este evident că utilizarea unui cap de măsurare performant, cum este modelul LC60 DX, coroborat cu procedura aplicării unui stat subțiere de pulbere, de culoare alb- mat contribuie împreună la eficientizarea procesului de scanare [1].

Tabelul 4.1.3 Utilizarea orientărilor unghiulare pentru cele 3 tipuri de scanări [1]

Unghiul de rotație în planul vertical (A)	Unghiul de rotație în plan orizontal (B) pentru scanarea cu modelul LC 50 a turbinei în starea naturală		Unghiul de rotație în plan orizontal (B) pentru scanarea cu modelul LC 50 a turbinei acoperită cu pulbere		Unghiul de rotație în plan orizontal (B) pentru scanarea cu modelul LC 60 DX a turbinei în stare naturală	
	Unghiul de rotație B	Numărul orientărilor	Unghiul de rotație B	Numărul orientărilor	Unghiul de rotație B	Numărul orientărilor
0°	0°; 90°	2	0°; 90°	2	0°; 90°	2
45°	-180° ÷ 180°, cu incrementul de 45°	8	-180° ÷ 180°, cu incrementul de 90°	4	-180° ÷ 180°, cu incrementul de 90°	4
90°	-180° ÷ 180°, cu incrementul de 15°	24	-180° ÷ 180°, cu incrementul de 30°	12	-180° ÷ 180°, cu incrementul de 30°	12
105°	-180° ÷ 180°, cu incrementul de 45°	8	-180° ÷ 180°, cu incrementul de 90°	4	-180° ÷ 180°, cu incrementul de 90°	4
<i>Timpul necesar procesului de scanare</i>	7 ore	42	5 ore	22	3 ore	22

Pentru fiecare trecere a liniei LASER peste câte o suprafață rezultă câte un nor de puncte, astfel încât, pentru N operații de baleiere vor rezulta N nori de puncte. După realizarea scanării și digitizarea suprafețelor, norii de puncte obținuți pot fi prelucrați ulterior, în scopul obținerii unei discretizări cât mai bune a suprafețelor scanate. Primul pas în procesarea norilor de puncte constă în operația de fuzionare a acestora, deoarece, pentru discretizare, norul de puncte trebuie să se comporte ca o entitate singură. Ulterior acestei operații, norul va avea o formă grosieră (figura 4.1.6, a), fiind necesară o curățare manuală a punctelor reziduale vizibile (figura 4.1.6, b) [1].

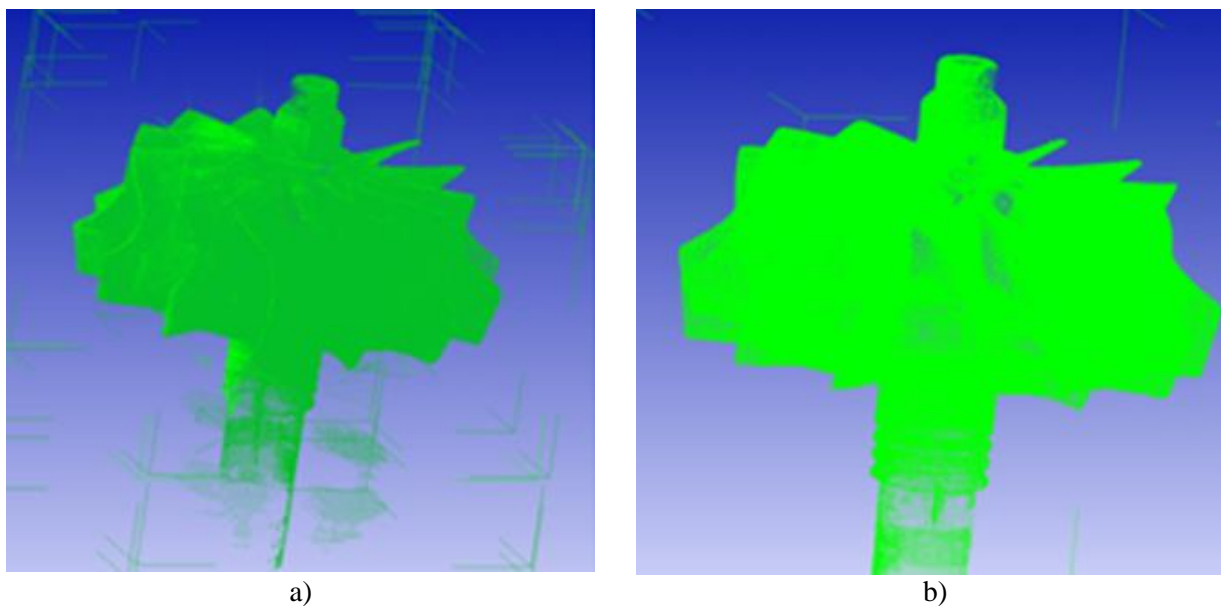


Fig. 4.1.6 Generarea norului de puncte: a) în forma grosieră; b) în forma prelucrată [1]

Punctele de zgomot care se observă în figura 4.1.1.6, a) se datorează zgomotului sau reflexiilor secundare de pe muchiile mai lucioase, respectiv de pe arborele turbinei (cu grad înalt de reflexie) [1], [105].

Etapa următoare constă în operația de filtrare, având drept scop ștergerea automată a punctelor considerate ca fiind extreme. Tot în cadrul filtrării se șterg și punctele care, pentru anumite zone din nor, conferă o densitate mai mare decât cea necesară discretizării. Astfel, ca urmare a operației de filtrare, norul de puncte va avea o densitate constantă în toate zonele, putându-se defini suprafața virtuală a reperului scanat.



Fig. 4.1.7 Exemplu de discretizare prin triangulație a norului de puncte asociat turbinei scanate [1]

Etapa următoare necesară în cadrul procesului de prelucrare a norului de puncte constă în discretizare prin triangulație, norul de puncte fiind discretizat în mai multe suprafețe, care, prin intermediul mediilor software specifice, va putea fi vizualizat ca o singură entitate (figura 4.1.7). Ca urmare se va obține o imagine a formei scanate sub forma unei suprafețe virtuale, putându-se analiza vizual diferite aspecte ale sale [1], [105].

Se poate observa că pe suprafața virtuală obținută există zone în care apar mici bavuri. De asemenea trecerea de la o zonă la alta prezintă anumite muchii inexistente la reperul real, ceea ce denaturază calitatea suprafeței.

Aceste muchii aparente sunt cauza unor puncte care nu au fost considerate ca fiind extreme în cadrul algoritmului de filtrare [1], [105]. Pentru eliminarea acestei probleme se folosește un procedeu de netezire, cu rolul de a armoniza suprafața, cu eliminarea punctelor extreme, prin generarea mai multor triunghiuri de dimensiuni mici. În figura 4.1.1.8, a) se poate observa detaliat modul în care arată suprafața rezultată imediat după procesul de discretizare, iar în figura 4.1.8, b) se pot vedea clar efectele procesului de netezire.

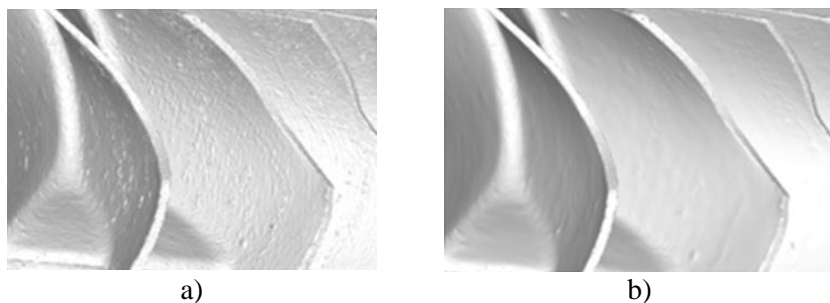


Fig. 4.1.8 Netezirea suprafeței generate în urma procesului de triangulație:

a) suprafața rezultată în urma triangulației; b) suprafața netezită

Pentru operația de netezire, utilizatorul poate defini numărul de iterații; astfel cu cât mai mare este numărul de iterații, cu atât suprafața va prezenta un grad mai mare de netezire. Prin aceasta, calitatea suprafeței obținută în urma digitizării are gradul înalt de optimizare, reproducând cu o marjă mică de erori reperul scanat [106].

Pentru a se asigura o creștere a performanțelor procesului de numerizare, numeroase cercetări în domeniu au avut drept scop realizarea mai multor procese de scanare ale aceluiași reper, în condiții diferite de acoperire, respectiv prin utilizarea diferitor sisteme de scanare. În cazul exemplului prezentat este vorba de compararea între ele a celor trei scanări ale turbinei (având codurile T50-N, T50-S și T60-N – vezi mai sus). În scopul comparării scanărilor, o operație deosebit de importantă este cea de aliniere a suprafețelor scanate. În cazul de față, cea mai bună metodă constă în compararea câte două a suprafețelor scanate, astfel, în scopul realizării comparației, două suprafețe scanate trebuie să fie aliniate una peste cealaltă. Ca suprafață de referință se poate lua în considerare oricare dintre suprafețele scanate (în exemplu considerat, se poate considera oricare dintre scanările T50-N, T50-S și T60-N. Pentru a nu se denatura relevanța comparației, toate modelele scanate au fost pregătite, astfel ca zonele situate în afara suprafeței etalonului să fie eliminate (figura 4.1.9, a) [1]. Alinierea suprafețelor poate fi realizată prin diferite metode, în funcție de complexitatea reperului scanat și de existența zonelor de referință corespondente ambelor modele. În figura 4.1.9, b) pot fi observate planele asociate celor două modele (cu albastru, respectiv cu mov). Datorită acestor constrângeri, modelul scanat conținând ca măsurand se va suprapune peste modelul scanat conținând ca etalon (referință). Pentru certitudinea unei suprapuneri juste, prin utilizarea mediilor software specifice, se recomandă procedarea la alinierea în mod automat, în figura 4.1.10 putând fi vizualizat un exemplu de rezultat al acestui procedeu [1].

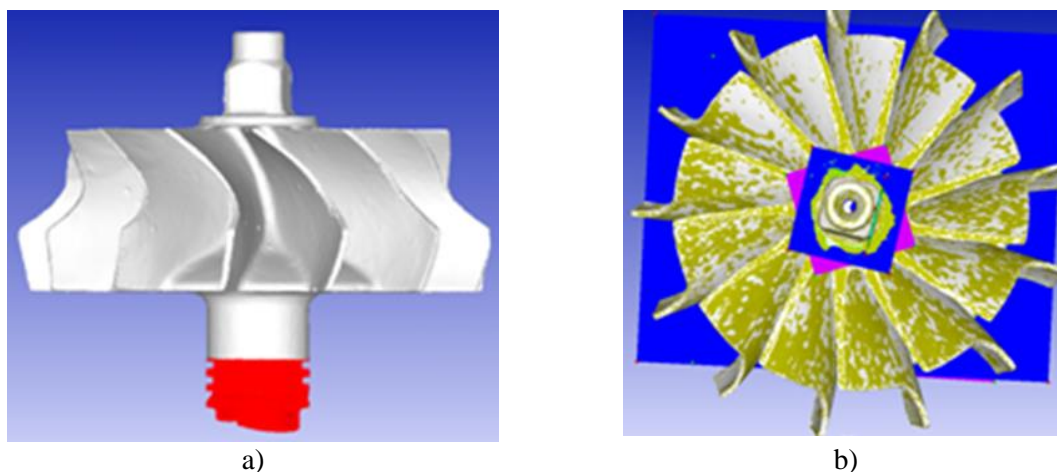


Fig. 4.1.9 Exemplu al aplicării procedurii de aliniere în cazul a două scanări pe un reper de tip turbină: a) pregătirea suprafețelor; b) referințele de aliniere [1]

După această etapă este realizată comparația globală între cele două modele (ca entități distincte, suprapuse), putând fi apoi generat raportul de măsurare (figura 4.1.11, b). Pe baza raportului, cu ajutorul unei scale gradate virtuale (în cadrul mediului software specific), în care sunt integrate intervalele de culoare, pot fi analizate datele necesare comparației. Concret este vorba de compararea

pozițiilor punctelor modelului măsurand în raport cu pozițiile punctelor modelului etalon. În plus, se mai pot obține informații referitoare la procentajul punctelor pentru fiecare interval în parte și numărul punctelor pe baza cărora s-a realizat comparația [1].

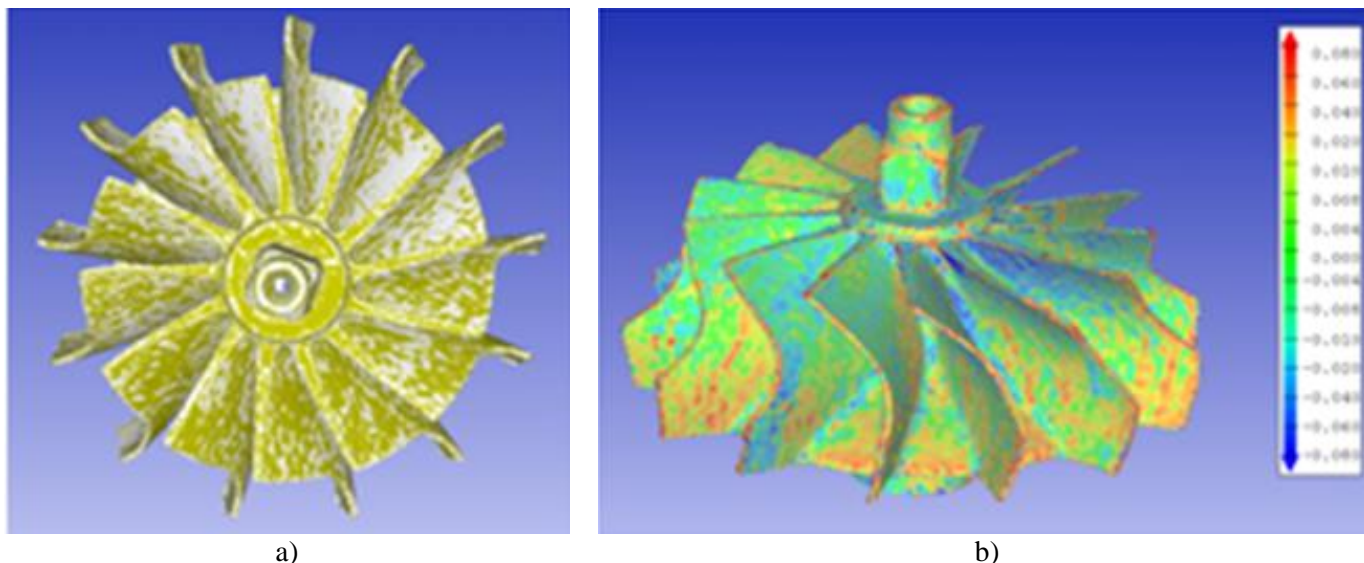


Fig. 4.1.10 Exemplu al aplicării procedurii de aliniere în cazul a două scanări pe un reper de tip turbină: a) pregătirea suprafețelor; b) referințele de aliniere [1]

Cercetările metrologice privind compararea modelelor au drept scop o amplă analiză în vederea identificării zonelor celor mai problematice ale reperului scanat. Exemplul prezentat aici, legat de turbină este foarte relevant, putându-se obține o imagine foarte clară asupra eficienței procesului de scanare, în contextul unor situații de măsurare diferite [107]. Compararea celor trei situații de scanare în cazul exemplului prezentat cu turbine se poate face după cum urmează:

- turbina în culoare naturală, scanată cu sistemul *LC 60 DX*, cu turbina în culoare naturală, scanată cu sistemul *LC 50* (scanarea *T 60N* versus *T 50N*);
- turbina în culoare naturală, scanată cu sistemul *LC 60 DX* cu turbina acoperită cu pulbere albă și scanată cu sistemul *LC 50* (*T 60N* versus *T 50S*);
- turbina în culoare naturală, scanată cu sistemul *LC 50* cu turbina acoperită cu pulbere albă și scanată cu sistemul *LC 50* (*T 50N* versus *T 50S*).

Analiza vizuală a comparației are un rol foarte important, deoarece, pe baza diferitelor coduri de culoare, specific fiecărui interval de abateri, se pot identifica aspecte privind zonele de pe suprafața piesei care, fie pun probleme la scanare, fie au abateri dimensionale mari. În acest mod, pentru fiecare comparație în parte, se pot obține informații referitoare la încadrarea procentuală a punctelor de pe suprafața modelului – măsurand în intervalul pozitiv sau negativ al abaterilor. Printr-o reprezentare grafică liniară se pot evidenția diferențele privind procentajul punctelor încadrate în intervale dimensionale simetrice față de valoarea zero [1].

În figura 4.1.11 este prezentat un exemplu privind imaginea rezultată în urma comparării scanărilor *T 60N* (etalon) și *T 50N* (măsurand).

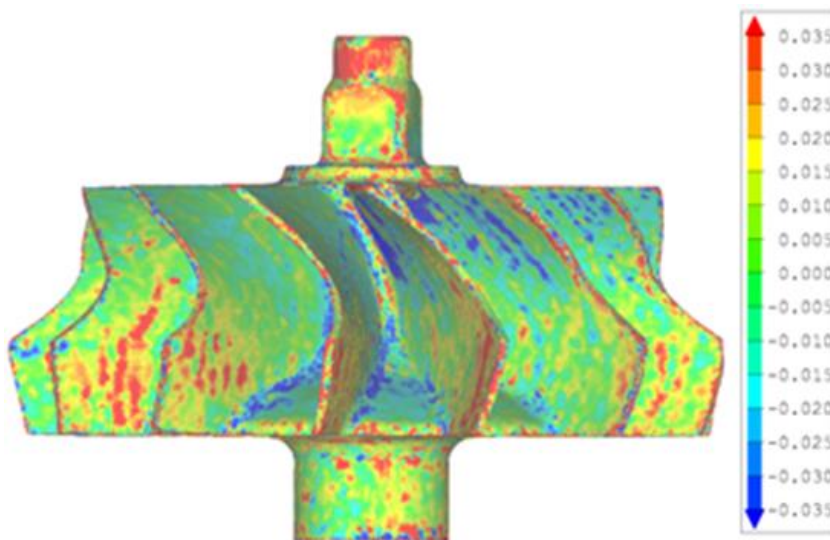


Fig. 4.1.11 Exemplu de imagine comparativă între scanările T 60N și T 50N, pentru un reper de tip turbină [1]

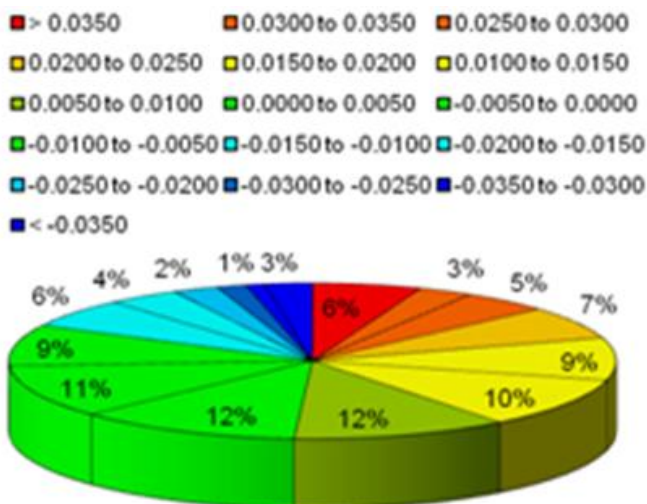


Fig. 4.1.12 Distribuția procentuală a punctelor în comparația scanărilor T 60N și T 50N, pentru un reper de tip turbină [1]

Printr-o analiză vizuală se pot observa zonele unde apar abateri negative mai mari (de peste -0,03 mm), fiind reprezentate în albastru închis. Zonele reprezentate cu roșu închis reprezintă abaterile pozitive mai mari de 0,03 mm. În figura 4.1.12 este prezentat un exemplu privind distribuția procentuală a punctelor, în cadrul comparației, putându-se observa quantumul punctelor integrate în fiecare interval dimensional, în parte [1].

Mediile software asociate sistemelor de scanare cu LASER permit, de asemenea obținerea de date, privind compararea scanărilor, având caracter statistic, tabelul de mai jos reprezentând un exemplu legat de scanarea reperului de tip turbină. Astfel se pot obține informații importante referitoare la precizia măsurării, dar și la numărul de puncte ale modelului – măsurând [1].

Tabelul 4.1.4 Exemplu valori statistice obținute în urma comparației scanărilor T60N – T50N, în cazul reperului de tip turbină

Numărul de puncte valide	584.964
Abaterea maximă [μm]	3,22
Abaterea minimă [μm]	-9,5
Amplitudinea [μm]	12,72
Abaterea medie [mm]	0,004
Abaterea standard [mm]	0,118
Rădăcina medie pătrată [mm]	0,118

În figura de mai jos este prezentat un exemplu de reprezentare grafică liniară privind apartenența procentuală a punctelor într-un anumit interval de abateri [1].

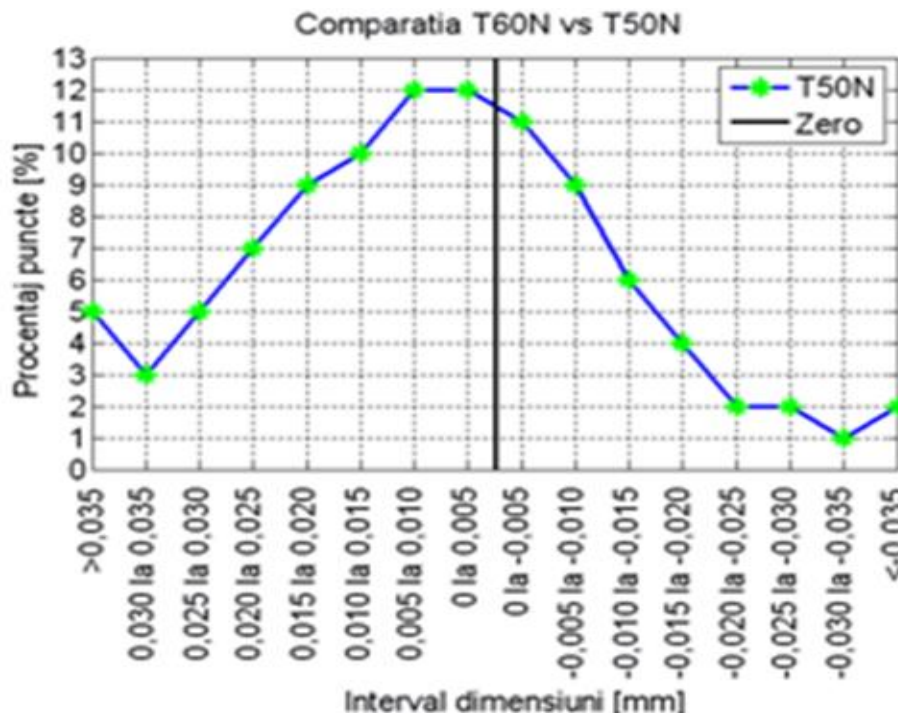


Fig. 4.1.13 Exemplu de reprezentare grafică liniară în comparația dintre scanările T60N și T50N pentru repere de tip turbină [1]

În cazul exemplului de față, se poate deduce că majoritatea punctelor din cadrul comparației (într-un procent de 63%) aparțin unui interval pozitiv de abateri (figura 4.1.14) [1].

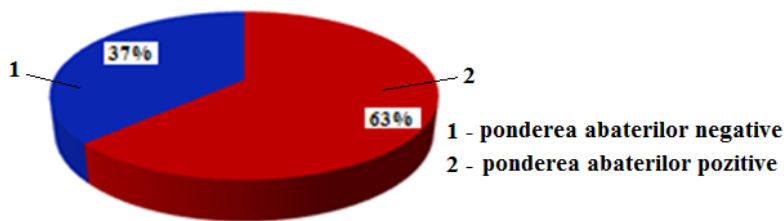


Fig. 4.1.14 Exemplu de reprezentare a ponderilor abaterilor în cazul comparației dintre scanările T60N și T50N pentru reperele de tip turbină [1]

Ca urmare, în cadrul exemplului privind compararea scanărilor, dimensiunile obținute la scanarea T50N rezultă a fi mai mari decât la scanarea T60N. Aceasta se explică și datorită faptului că sistemul de scanare LC 60 DX are performanțe mai bune decât sistemul de scanare LC 50 [1], [102].

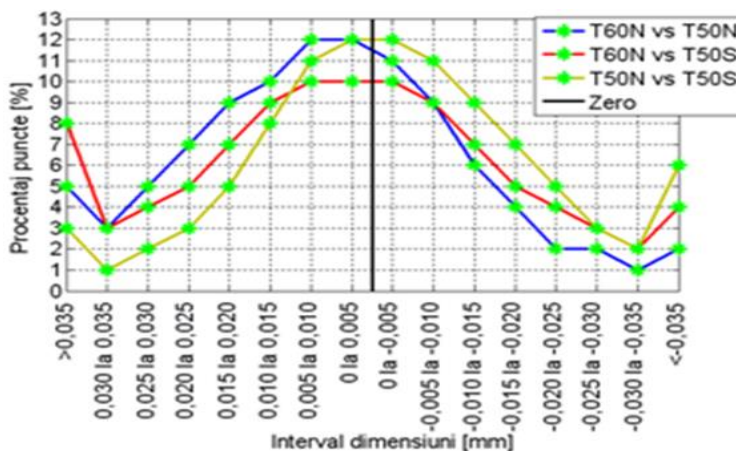


Fig. 4.1.15 Exemplu de reprezentare grafică liniară a tuturor comparațiilor scanărilor pentru un repere de tip turbină [1]

Printr-o reprezentare grafică a abaterilor în cazul tuturor comparațiilor scanărilor pentru reperele de tip turbină (figura 4.1.15), se poate face o determinare statistică a ponderilor procentuale ale abaterilor (tabelul 4.1.15) [1].

Tabelul 4.1.5 Exemplu de obținere de rezultate statistice privind ponderea abaterilor în cazul celor trei scanări pentru un reper de tip turbină

Comparația	Abateri	
	Negative	Pozitive
T60N / T50N	37%	67%
T60N / T50S	44%	56%
T50N / T50S	55%	45%

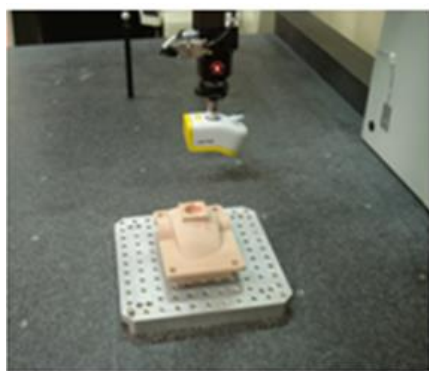
Se poate observa că pentru comparațiile $T60N - T50N$ și $T60N - T50S$, majoritatea punctelor se încadrează în intervalul pozitiv de abateri. Pentru cazul comparației $T50N - T50S$, majoritatea abaterilor se înscriu în intervalul negativ [1], [108]. Linia notată cu “zero” în cadrul diagramei reprezentate în figura 4.1.15 marchează diferența dintre deviațiile negative și cele pozitive. Zona în care se află majoritatea abaterilor (în stânga sau în dreapta liniei de zero) dă informații legate de dimensiunile scanării – măsurand în raport cu cele ale scanării – etalon. Aceasta înseamnă că pentru primele două comparații, dimensiunile scanării – măsurand depășesc dimensiunile celei etalon [1], [108].

4.1.2 Exemplu de reper de tip carcasă supus procesului de numerizare cu sisteme LASER

În cele ce urmează este prezentat un exemplu prin care un alt tip de reper (de tip carcasă) poate fi foarte eficient numerizat, cu ajutorul capetelor de scanare LASER $LC50$ și $LC60 DX$ [102]. În acest al doilea caz, este prezentat un exemplu în care, în cadrul proceselor de scanare, modelul virtual ca nor de puncte poate fi eficient comparat cu modelul CAD existent al reperului. În acest caz etalonul va putea fi considerat modelul CAD, și aici fiind relevant comparația dintre cele două modele și analiza erorilor ca diferență între acestea.

Etapele în cadrul procesului de scanare sunt aceleași cu cele din cazul exemplului anterior (al turbinei), diferența majoră constând în numărul stărilor de măsurare. Ca urmare a faptului că în acest al doilea caz, geometria reperului este una mult mai simplă, respectiv culoarea acestuia este deschisă, nu se justifică scanarea acestuia în mai multe ipostaze (acoperit, neacoperit etc.) ca în cazul turbinei. Ca urmare, pentru acest tip de reper este suficientă o singură stare de scanare, și anume în culoare naturală, cu sistemul de scanare cel mai performant (de exemplu $LC 60 DX$), aici nefiind întâmpinate probleme la scanare generate de natura și geometria reperului [1], [105].

Pentru digitizarea acestui tip de reper se recomandă poziționarea acestuia pe un suport dispus în partea frontală a mesei de lucru (figura 4.1.16, a).



a)



b)

Următoarea etapă de lucru este calibrarea scannerului și determinarea orientărilor necesare procesului. Având în vedere geometria relativ simplă a acestui tip de reper, orientările utile pot fi destul de ușor identificate, ca fiind, de exemplu: A0 B0, A45 B0, A45 B90, A45 B180, A45 B-90.

Fig. 4.1.16 Scanarea reperului de tip carcasă: a) dispunerea pe masa mașinii a reperului; b) scanarea propriu-zisă a reperului [1]

După identificarea orientărilor capului de scanare, următoarea etapă constă în calibrarea orientărilor, urmată apoi de digitizarea propriu-zisă a piesei [1], [105].



Fig. 4.1.17 Digitizarea unui reper de tip carcasă, cu obținerea modelului virtual al reperului [1], [105]

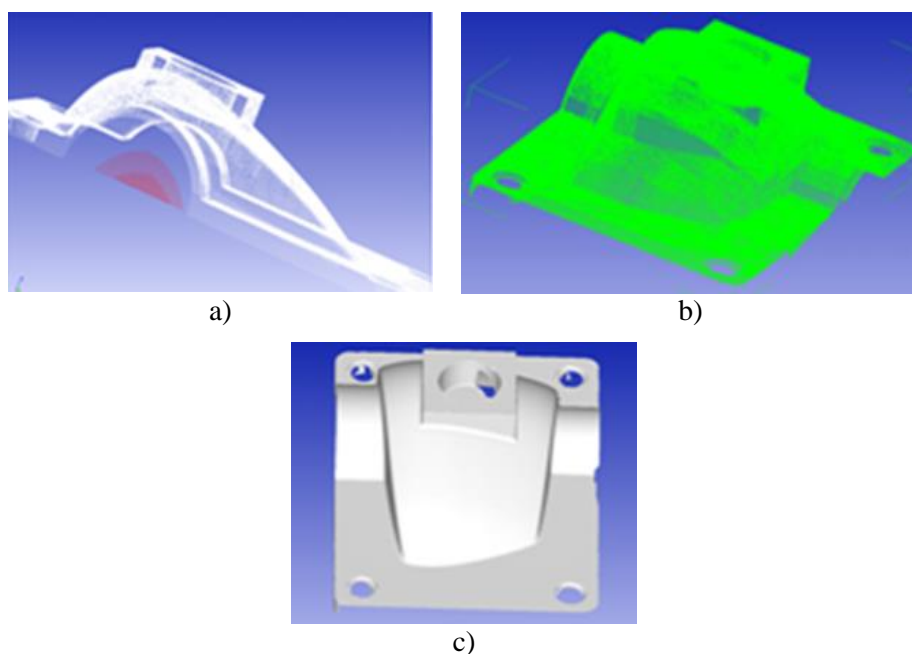


Fig. 4.1.18 Procesarea norului de puncte în cazul scanării unui reper de tip carcasă: a) eliminarea zonelor care nu prezintă interes; b) filtrarea norului de puncte; c) obținerea formei finale a norului de puncte [1]

În cazul acestor tipuri de repere, cu geometrii mai simple, suprafața se pretează mai bine pentru numerizarea pe principiul LASER și, ca urmare numărul de puncte reziduale și/sau de extrem, cu abateri mari pot fi mult mai ușor identificate. Aceste pot fi eliminate printr-un proces de curățire manuală. Punctele rămase sunt ulterior supuse unui proces de filtrare (etapa din figura 4.1.18, b), după care modelul este supus unui procedeu de triangulație și de netezire, obținându-se forma finală (figura 4.1.18 c) [1].

Din punct de vedere metrologic, această formă finală a modelului, obținută în mod similar pentru fiecare scanare a modelului (cu diferite capete de scanare și/sau cu diferite grade de acoperire) este utilizată pentru procesul de comparare. Procesul de comparare, și în acest caz, presupune în primul rând o aliniere a modelelor (de tip nor de puncte precesat) specifice tuturor scanărilor. În cazul de față este vorba de compararea dintre una dintre cele două scanări, și anume cu două tipuri de capete de scanare (*LC50* și *LC60 DX*) și modelul CAD al reperului. În situația de față, reperul neavând grad mare de reflexie, nu se mai pune problema acoperirii suprafeței acestuia. Astfel, în exemplu de față se pune problema suprapunerii a două modele, și anume modelul scanat și modelul CAD al reperului de tip carcasă. Pentru aliniere se folosește așa numita metodă „3-2-1” (adică alinierea bazată pe entități fundamentale, de tip plan – linie – punct sau plan – linie - cerc), în scopul creșterii gradului de precizie a alinierii. În urma unor studii analitice și experimentale s-a putut constata că pentru o cât mai bună aliniere, aceasta se recomandă a fi făcută în funcție de trei plane comune pentru fiecare entitate [1], [107]. Existența modelului CAD permite definirea planelor de referință ale etalonului prin selectarea cu ajutorul mouse-ului a suprafețelor. În figurile 4.1.19 a) și b) se pot observa planele de referință de pe suprafața discretizată, respectiv de pe modelul CAD al reperului scanat. Figura 4.1.19, c) prezintă forma finală a alinierii celor două modele. Forma finală a alinierii este prezentată în figura 4.1.20.

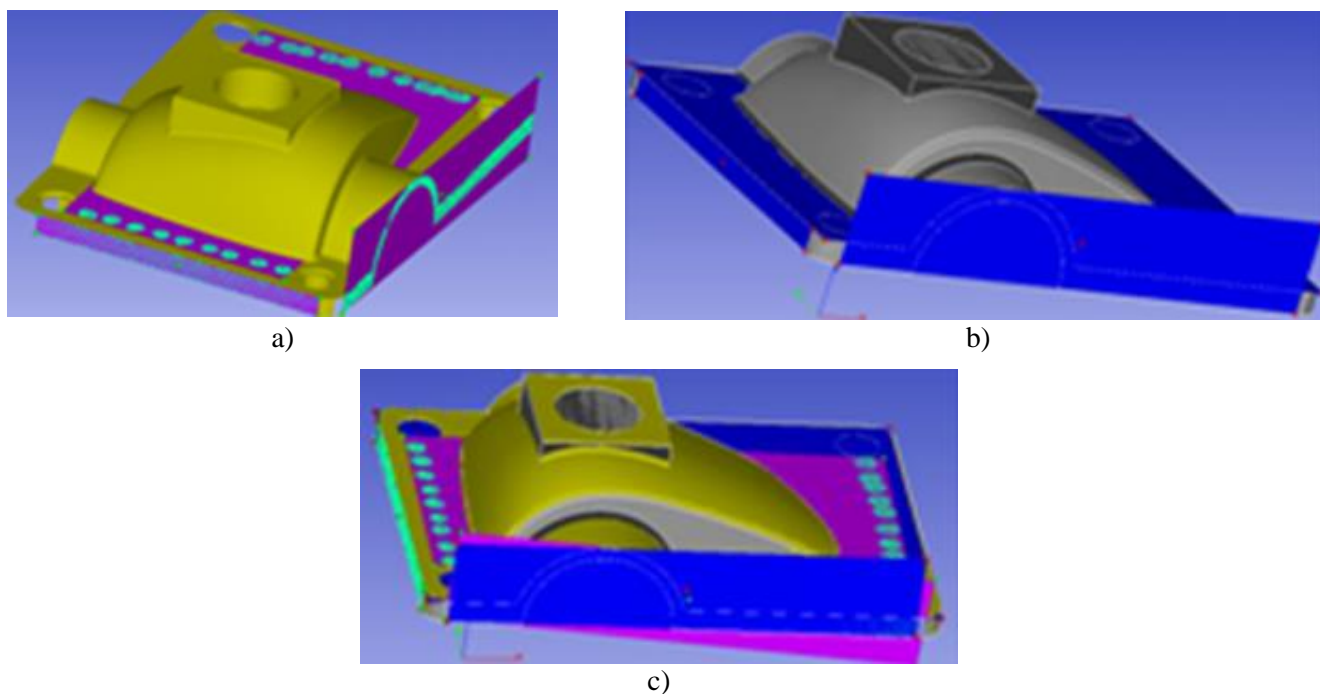


Fig. 4.1.19 Exemplu de procedură de aliniere 3-2-1 în cazul unui reper de tip carcasă: a) planele de referință specifice modelului ca nor de puncte discretizat; b) planele de referință specifice modelului CAD; c) suprapunerea modelelor [1]



Fig. 4.1.20 Alinierea modelelor, în vederea comparației

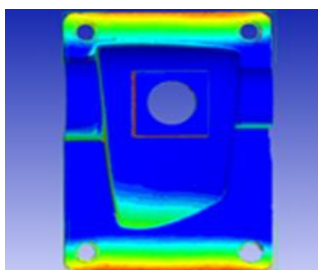


Fig. 4.1.21 Exemplu de comparație globală în cazul reperului de tip carcasă [1]

Se poate observa, înainte de realizarea comparației, faptul că între modelul CAD și suprafața discretizată există anumite diferențe geometrice [1].

Spre a se determina precizia de numerizare, această comparație globală (figura 4.1.21) are menirea de a evidenția abaterile dintre modelul CAD (considerat ca etalon) și suprafața discretizată a norului de puncte (considerată ca fiind modelul - măsurand) [1].

Pe baza scării gradate și a codurilor de culoare, aferente fiecărui interval de abatere se pot concluziona diverse aspecte legate de forma și dimensiunile modelului reperului de tip carcasă, scanat. În exemplul de față, limita maximă a abaterii s-a determinat la -0,35 mm, iar cea minimă la -0,35 mm, pasul incrementului fiind de 0,05 mm.

În figura 4.1.22 se poate vedea exemplul privind rezultatul specific comparării modelelor asociate reperului de tip carcasă [1].

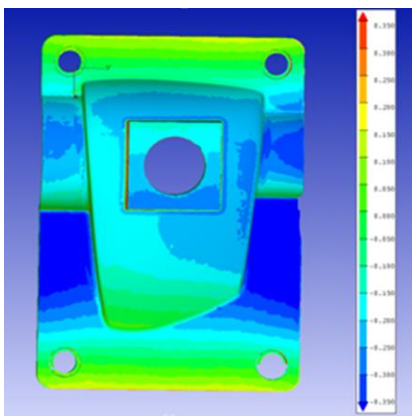


Fig. 4.1.22 Exemplu de afișare a rezultatelor abaterilor în urma comparației dintre modelul CAD și cel scanat în cazul unui reper de tip carcasă [1]

Pe baza analizei vizuale și a codurilor de culoare ce corespund fiecărui interval dimensional al scării gradate, pot fi identificate diverse aspecte privind comparația dintre modele. De exemplu se poate observa zona centrală a reperului ca fiind preponderent colorată în albastru, evidențiind abaterile negative dintre modelul CAD (etalon) și cel scanat (măsurand). Culoarea albastru închis, cu care sunt reprezentate extremitățile laterale ale comparației indică faptul că în acele zone abaterile dimensionale sunt sub valoarea de -0,35 mm, însemnând că acele zone se află mult sub valorile nominale.

Modul în care sunt reprezentate culorile în cadrul comparației, de la galben la portocaliu n extremitățile verticale spre albastru în zona mediană, indică faptul că reperul prezintă unele erori de fabricație [1], [109].

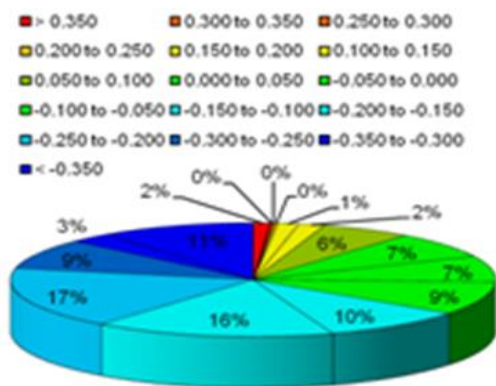


Fig. 4.1.23 Exemplu de afișare statistică a procentajului distribuției abaterilor dimensionale, ca urmare a comparației dintre modelul CAD și cel scanat al unui reper de tip carcasă [1]

Următorul pas după analiza vizuală a rezultatelor constă în general în interpretarea graficelor și a tabelor de date. În exemplul descris, procentajul punctelor ce se situează într-un anumit interval dimensional se poate determina prin analiza unor grafice statistice, precum cel exemplificat în figura 4.1.23.

În exemplul prezentat, abaterile dimensionale care se încadrează sub valoarea de -0,35 mm ocupă o proporție destul de mare în comparație cu abaterile ce depășesc intervalul $\pm 0,35$ mm [1].

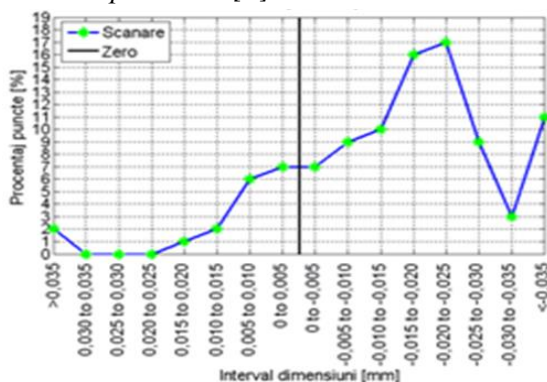


Fig. 4.1.24 Exemplu de reprezentare grafică liniară privind rezultatele comparației dintre modelul CAD și cel scanat al unui reper de tip carcasă [1]

Reprezentarea grafică liniară (figura 4.1.24) are ca scop să evidențieze diferențele privind procentajul punctelor încadrate în intervale simetrice față de valoarea zero. Aici se poate constata că intervalul abaterilor între -0,25 mm și 0,25 mm încadrează un procent mare de puncte (aproximativ 17%).

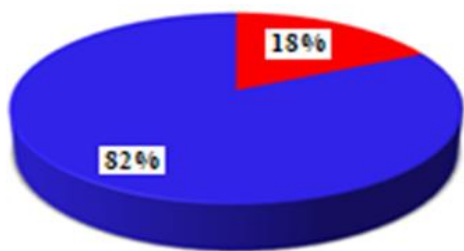


Fig. 4.1.25 Situația generală privind abaterile punctelor în cazul comparației pe reperul exemplificat [1]

Aceste rezultate, împreună cu cele arătate în exemplul din figura 4.1.25, privind situația generală a abaterilor punctelor (82% dintre acestea fiind în zona abaterilor negative), scot în evidență faptul că reperul a fost realizat cu erori mari de prelucrare. Aceste erori provin, fie din modul de fixare a semifabricatului în timpul prelucrării sale, precum și ca urmare a variației forțelor dinamice dezvoltate de sculele așchietoare pe parcursul prelucrării [1].

Aspectele privind datele statistice ale scanării sunt prezentate în tabelul 4.1.6, putându-se observa că abaterea standard este de 0,151 mm, iar amplitudinea are valoarea de 2,084 mm [1].

Tabelul 4.1.6 Exemplu de afișare a rezultatelor statistice privind abaterile dimensionale în cazul scanării pe principiul LASER a unui reper de tip carcasă [1]

Parametrul determinat	Valoarea
Numărul de puncte valide	292.100
Abaterea maximă [mm]	1,054
Abaterea minimă [mm]	-1,03
Amplitudinea [mm]	2,084
Abaterea medie [mm]	-0,157
Abaterea standard [mm]	0,151
Rădăcina medie pătrată	0,217

4.1.3. Concluzii privind utilizarea capetelor de scanare pe principiul LASER pe mașinile în coordonate fixe

Pe baza analizei celor două exemple prezentate la paragrafele 4.1.1 și 4.1.2 (acestea fiind printre cele mai relevante) se pot trage următoarele concluzii:

Pentru cazul primului tip de reper, în urma analizei se poate constata că suprafața rezultată ca urmare a scanării turbinei în stare naturală depășește ca dimensiuni modelul scanat în stare acoperită cu pulbere, în condițiile utilizării primului cap de scanare (LC50). Acest lucru este cauzat de situația în care, în cazul reperelor închise la culoare scanate pr principiul LASER, erorile sunt mari și foarte mari. Un alt aspect ce poate influența precizia de scanare în cazul reperelor complexe (cum este cel prezentat în exemplul 1, paragraful 4.1.1) îl constituie variația geometrică pe o arie relativ mică a înălțimii suprafeței. Aceasta poate conduce la erori, ca urmare a diferențelor apărute în interiorul câmpului de vedere al sistemului de scanare [1], [100]. Urmărind procesele de scanare pentru fiecare situație în parte, se poate constata că în cazul suprafețelor de culoare închisă, pentru scanarea cu sistemul LC50, acoperirea cu pulbere are o influență pozitivă datorită faptului că reduce cu aproximativ o treime durata procesului. Mai mult, în acest caz, acoperirea cu pulbere albă influențează pozitiv și precizia scanării, abaterile pozitive scăzând, de exemplu în cazul turbinei cu aproximativ 15%. O altă concluzie importantă este aceea că reperatele complexe, cum este turbina prezentată în primul exemplu generează probleme la digitizarea muchiilor, fiindcă în aceste regiuni apar puncte extreme, care denaturează norul de puncte, implicit precizia scanării și a modelului generat [1]. Se poate concluziona că pentru scanarea cu sistemul LC50 este necesară intervenția umană în vederea curățirii suprafeței de punctele extreme, generate de gradul înalt de reflexie. În cazul scanării cu sistemul LC60 DX, aceste puncte extreme dispar, datorită performanțelor îmbunătățite ale sistemului de scanare, însemnând un timp redus de procesare a datelor. Zonele ascunse dintre palele turbinei (în cazul exemplului 1) creează

de asemenea mari dificultăți, deoarece multe orientări, poziții și distanțe de scanare diferite sunt necesare pentru a numeriza complet și cât mai precis turbina [1].

Pentru cel de al doilea caz, referitor la reperul de tip carcasă, o primă concluzie este că modelul CAD asociat aduce un aport pozitiv în cadrul etapei de procesare a datelor, prezența acestuia simplificând procesul de aliniere a modelului la modelul generat ca nor de puncte, prin scanare. Faptul că modelul CAD reprezintă chiar etalonul, spre deosebire de cazul turbinei, acesta oferă un mai mare grad de credibilitate privind eficiența comparației. Astfel este eliminată posibilitatea ca anumite puncte de extrem sau erori generate de problemele măsurărilor cu LASER să afecteze determinarea abaterilor dimensionale. Pe de altă parte, timpul de doar o oră, necesar scanării în cazul reperului specific exemplului 2 (paragraful 4.1.2), în comparație cu cele 3 ore pentru reperul de tip turbină, scoate în evidență influența complexității reperului asupra procesului de numerizare. Astfel, cu cât piesa are mai multe zone ascunse, unghiuri ascuțite, suprafețe de culoare neagră sau diferențe mai mari de înălțime pe o arie mică, cu atât procesul de scanare necesită mai mult timp pentru realizare [1], [103], [105].

4.2 Aplicații ale sistemelor de scanare LASER, utilizate în cadrul mașinilor de măsurare portabile

4.2.1 Descrierea caracteristicilor și a funcționării sistemelor de scanare portabile

În afară de mașinile fixe în coordonate, capetele de scanare cu LASER, în prezent, își găsesc tot mai mult utilitatea și în componența sistemelor portabile de scanare, acestea având ca principal avantaj faptul că pot fi deplasate pe teren, în scopul numerizării unor semi-fabricate greu transportabile. Un exemplu de astfel de sistem portabil de scanare pe principiul emisiei de radiație LASER este scannerul portabil *EXA Scan 30144* (figura 4.2.1), ale cărui caracteristici sunt specificate în tabelul 4.2.1:

Tabelul 4.2.1 Caracteristicile tehnice ale sistemului de scanare portabil *EXA Scan 30144*

Modelul	ExaScan 30144
Domeniul de măsurare [mm]	$\pm 22,5$
Rata de măsurare [nr. cicluri de măsurare (emisie – recepție) / s]	25.000
Rezoluția de măsurare [mm]	0,05
Distanța de scanare [mm]	300
Mediul software	VXScan
Masa [kg]	$\cong 1,8$



Fig. 4.2.1 Sistemul portabil de scanare cu sursă LASER, *ExaScan 30144*

Principiul de scanare se bazează pe măsurarea timpului de emisie – recepție al radiației LASER, de la senzor la obiect, fiind asemănător cu cel întâlnit la sistemele de scanare din componența mașinilor în coordonate fixe.

Pentru transmiterea undei LASER către suprafața obiectului, o diodă emite un impuls LASER cu o frecvență cunoscută, unda fiind reflectată difuz de pe suprafața obiectului, iar o parte din aceasta se întoarce la sistemul de recepție. Pentru fiecare impuls este măsurat timpul dintre emisie și recepție.



Fig. 4.2.2 Etapele necesare lansării comenzii de configurare a scannerului [109]

Pentru asigurarea corectitudinii și a eficienței în lucru cu acest sistem de scanare, în prealabil se recomandă o operație de configurare, prin intermediul mediului software, necesitând o succesiune de pași, din meniul principal al ferestrei de lucru al interfeței.

Primul pas constă în accesarea meniului *Configure*, opțiunea *Sensor configuration* (figura 4.2.2), după care se procedează la orientarea corectă a poziției scannerului în raport cu suprafața reperului, urmărindu-se variația intensității fasciculului LASER, după direcțiile celor două axe din planul de scanare.

Aceasta se face printr-o urmărire atentă a ferestrei grafice afișate (figura 4.2.3) [63], [109].

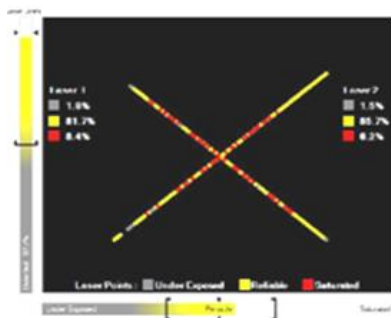


Fig. 4.2.3 Modul de configurare a intensității luminoase a fasciculului emis, în funcție de distanța până la suprafața scanată [109]

În funcție de complexitatea suprafeței de scanat se recomandă configurarea în două moduri. În modul manual, se presupune o stabilire manuală, intuitivă a distanței optime de scanare, asociate unei intensități luminoase adecvate a fasciculului. Această metodă are drept avantaj faptul că permite scanare unor repere cu geometrii mai complexe, dar și dezavantajul că operația figurare este mai complexă, durează mai mult și pot interveni erorile subiective [96], [110].

În modul automat, configurarea implică accesarea opțiunii *Auto Adjust*, după ce, în prealabil, s-a parcurs succesiunea de operații necesare apelării comenzii de configurare (figura 4.2.4).

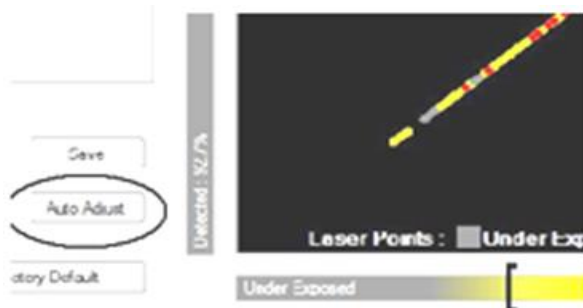


Fig. 4.2.4 Apelarea opțiunii pentru configurarea sistemului în modul automat [109]

Această metodă de configurare aduce avantajul unei proceduri mai simple și mai rapide, precum și o mai bună rezoluție de scanare, dar are ca principal inconvenient faptul că nu este prea eficientă în cazul scanării unor repere cu geometrii complexe [47], [110].

În vederea scanării propriu-zise, după operația de configurare a sensorului, se apelează comanda *Record Scan*, din meniul principal al interfeței software, asociat scannerului (figura 4.2.5).

În timpul scanării, senzorul trebuie menținut la o distanță adecvată față de reper, stabilită anterior prin operația de configurare. De asemenea este indicat ca fasciculul să cadă după o direcție normal la suprafața reperului, pentru obținerea unui model virtual asociat cât mai precis. În timpul acestui process poate fi urmărit stadiul de achiziție a imaginii în fereastra grafică a mediului software (figura 4.2.6) [109].



Fig. 4.2.5 Comanda necesară lansării unei noi sesiuni de scanare [109]

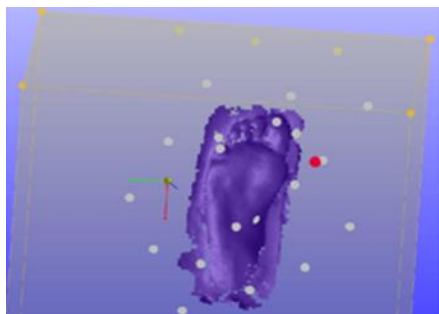


Fig. 4.2.6 Generarea imaginii unui reper pe durata procesului de scanare [47], [110]

În figura 4.2.6 este prezentat un exemplu de obținere în urma scanării a unui model virtual pentru o amprentă plantară. Pentru a se asigura o continuitate cât mai bună a modelului, înaintea procesului de scanare s-a procedat la lipirea unor repere pe modelul real în genul celor dispuse pe placa – suport a sistemului de scanare [63], [109]. La terminarea procesului de scanare se accesează meniul *Stop Scan* din bara principală de meniuri (figura 4.2.7), putându-se observa rezultatul scanării [109].



Fig. 4.2.7 Accesarea meniului *Stop Scan* pentru finalizarea unui proces de scanare [109]

După finalizarea scanării există două posibilități de îmbunătățire a imaginii scanate, după cum urmează: prima variantă constă într-o continuare a procesului de scanare, prin reacesarea meniului *Start Scan*. Această metodă se aplică în cazul în care în urma primului proces de scanare au rămas zone pentru care nu s-a putut reconstitui imaginea.

Cea de a doua metodă se referă la ajustarea imaginii, prin ștergerea unor porțiuni ce nu prezintă interes [48], [109]. Pentru aceasta este necesară folosirea meniului *Edit Facets*, urmată de selectarea uneia dintre entitățile de ștergere de tip *Free form*, *circle*, *rectangle* etc. În urma acestor operații se procedează la selectarea zonelor respective, iar apoi la ștergerea efectivă a acestora, prin accesarea comenzii *Delete facets*.

4.2.2 Exemple de aplicații ale utilizării sistemelor portabile de scanare cu sursă LASER

Ca și sistemele de scanare dispuse pe mașinile în coordonate fixe, sistemele portabile de scanare, pot fi utilizate cu succes în diverse aplicații ce se regăsesc în domenii precum: industrie, medicină, biomecanică, arte plastice etc. Scannerele mobile au ca principal avantaj faptul că acestea pot fi cu ușurință transportate pe teren, sunt ușor de manevrat și sunt relativ eficiente în scanarea de repere chiar și cu geometrie complexă. Însă principalul dezavantaj este acela că, un astfel de scanner, în timpul procesului, fiind manipulat manual de către operator (chiar dacă există opțiunea de calibrare a capului), va putea introduce erori subiective. Acestea sunt în principal cauzate de abateri ale spotului LASER de la direcția normală la suprafața reperului scanat, ca urmare a modului în care operatorul ține în mână scannerul. Un alt neajuns ar fi acela că un asemenea sistem se pretează doar pentru repere de mici dimensiuni (adică într-o unitate de volum de maxim 500 mm x 500 x 500 mm, neputând, deci fi utilizate în aplicații precum industria auto sau aerospațială, de exemplu [50], [75].

În cele ce urmează este descris un exemplu de utilizare a scannerului model *EXAScan 30144* într-o aplicație în domeniul biomecanicii, fiind vorba aici de obținerea unui model CAD al unei conformații plantare. Aceasta se poate face în scopul modelării și prototipării unor elemente de ortezare și/sau protezare la nivelul piciorului, în funcție de necesitate. Exemplul este descris în două ipostaze distincte, și anume în ipostaza în care, pentru obținerea modelului virtual se procedează la scanarea directă a piciorului subiectului, respectiv în ipostaza scanării indirecte, după cum va fi descris mai jos [63], [110].

Ipostaza scanării directe constă în scanarea piciorului subiectului după ce, în prealabil au fost dispuse elemente de marcaj pe acesta, pentru o mai bună reproducere a imaginii (figura 4.2.8).

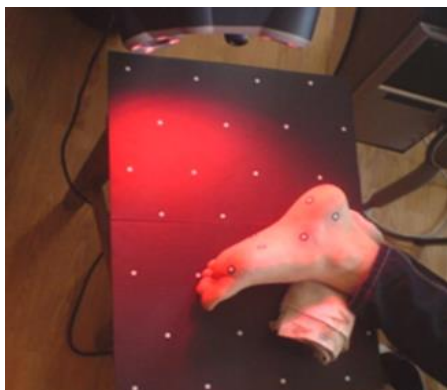


Fig. 4.2.8 Exemplu de scanare a tălpii piciorului unui subiect, prin aplicarea metodei directe [110]

Dezavantajul major al acestei metode constă în faptul că, deși prelucrat în prealabil subiectul, acesta, în timpul procesului de scanare, fie și involuntar, își poate mișca piciorul, afectând negativ calitatea reproducerii modelului. De asemenea în astfel de situații, este necesară o bună experiență privind numărul potrivit de elemente de marcaj, dat fiind faptul că, pielea, fiind iluminată sunb unghiuri diferite, va induce grade variate de reflexie.

Ca urmare un număr insuficient de elemente de marcaj poate conduce la o reproducere incompletă a modelului. Pe de altă parte, un număr prea mare de elemente de marcaj (acestea având alt grad de strălucire) va conduce, de asemenea la zone „oarbe” în cadrul modelului generat. În figura 4.2.9 este prezentat un exemplu de model generat ca urmare a scanării directe a piciorului unui subiect, putând fi observate multiple zone practic incomplete.

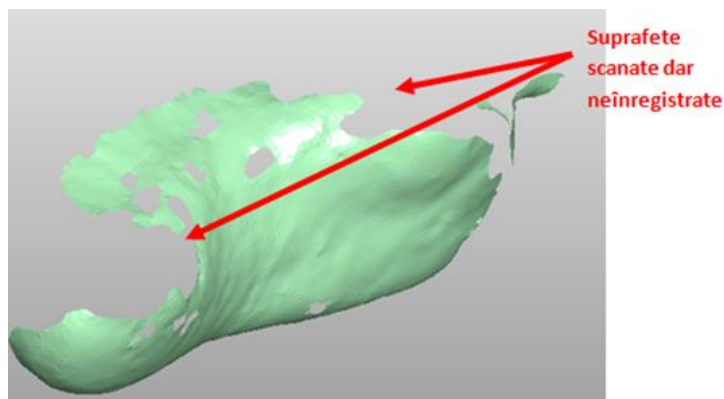


Fig. 4.2.9 Exemplu de model CAD obținut prin scanarea directă, marcat prin zone neînregistrate, prin dispunerea unui număr insuficient de repere de marcaj [110]

Se poate spune, deci, că în acest caz, nerespectându-se cu strictețe indicațiile specifice metodei scanării directe, modelul obținut este incomplet. Principala problemă, în acest caz nu vizează atât posibilitatea mișcării piciorului subiectului, cât, mai ales, dispunerea unui număr insuficient de elemente de marcaj. Ca urmare, în acest caz, reproducerea obținută poate fi utilizată pentru o modelare CAD, doar pe o anumită porțiune (cea plantară mediană), însă nu va putea fi utilizat, de exemplu pentru modelarea CAD a unei proteze de peroneu, tibie etc.

Varianta completării manuale sau automate a zonelor neînregistrate este exclusă din start, deoarece aceste zone incomplete sunt mult prea mari spre a mai putea fi reproduse [63], [110].

În figura 4.2.10 este prezentat un exemplu similar, ca urmare a unei scanări directe a piciorului, înse, de data acesta prin aplicarea unui număr adecvat de repere de marcaj (aproximativ 20 de astfel de repere). Reperele au rolul de a ajuta sistemul de scanare să detecteze mai ușor poziția obiectului vizat (în situația de față, piciorul subiectului).

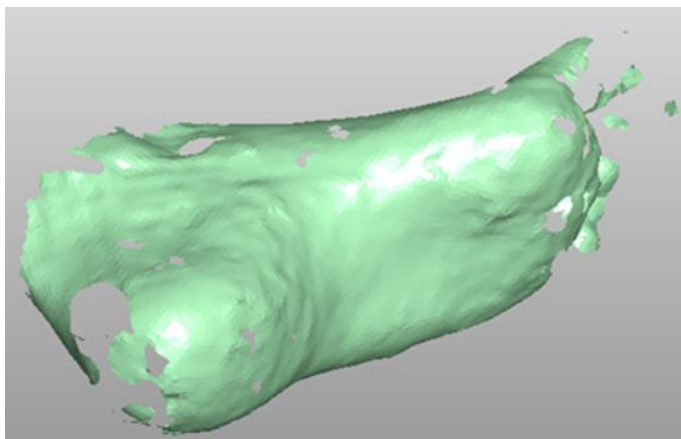


Fig. 4.2.10 Exemplu de model CAD obținut prin scanarea directă, marcat prin zone neînregistrate, prin dispunerea unui număr suficient de repere de marcaj [110]

Iată, deci, că, printr-o bună instruire a persoanei vizate, dar, mai ales, prin dispunerea unui număr suficient de mare de repere, scanarea în ipostaza directă se poate dovedi a fi una suficient de precisă și eficientă.

Cea mai utilă metodă de umplere a golurilor din modelele generate prin scanare constă în importarea modelului în mediul software *CATIA*, aici, operația putându-se practica mai eficient. Astfel, prin apelarea modului *Digitized Shape Editor* (figurile 4.2.11 și 4.2.12) se pot importa scanările anterioare, având extensia *.STL*. Cu ajutorul comenzii *Fill Holes* (figura 4.2.13) se poate cu ușurință realiza umplerea golurilor, suprafața rămânând neschimbată (figura 4.2.14).

În cazul scanării de membre ale sistemului locomotor, de exemplu, dat fiind gradul variat de reflexie, scannerul întâmpină dificultăți în detectarea poziției obiectului. Ca urmare este necesar să se utilizeze un număr relativ mare de astfel de repere de marcaj, putându-se chiar compensa unele mișcări de amplitudini mici ale piciorului (de până la 4-5 mm). Cu toate acestea se pot observa, chiar și în acest caz, mici găuri în reproducerea modelului scanat. Avantajul, însă în această situație, este că aceste goluri pot fi relativ ușor umplute, obținându-se, în final un model ce se apropie detul de mult de cel real [47], [109], [110].

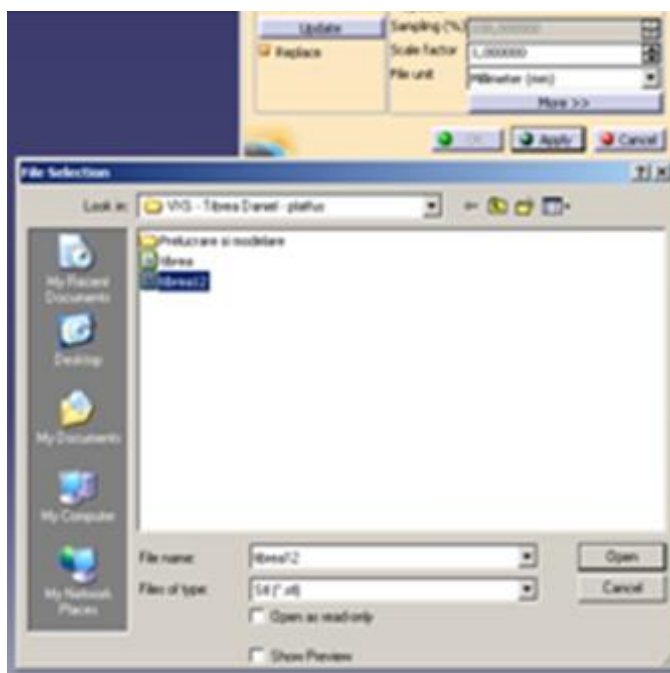


Fig. 4.2.11 Importarea unui model scanat anterior în mediul software de modelare *CATIA* [47], [110]

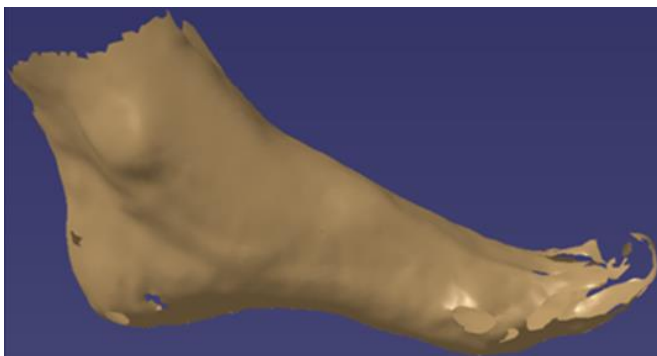


Fig. 4.2.12 Exemplu de model importat în mediul CATIA, în urma scanării directe, prin respectarea recomandărilor privind numărul de marcaje [63], [110]

Ulterior, pornind de la modelul obținut, caracterizat printr-o continuitate a suprafeței, acesta poate fi utilizat ca model de referință în vederea construirii și modelării de entități pentru prototiparea unor elemente de protezare și/sau ortezare [47].

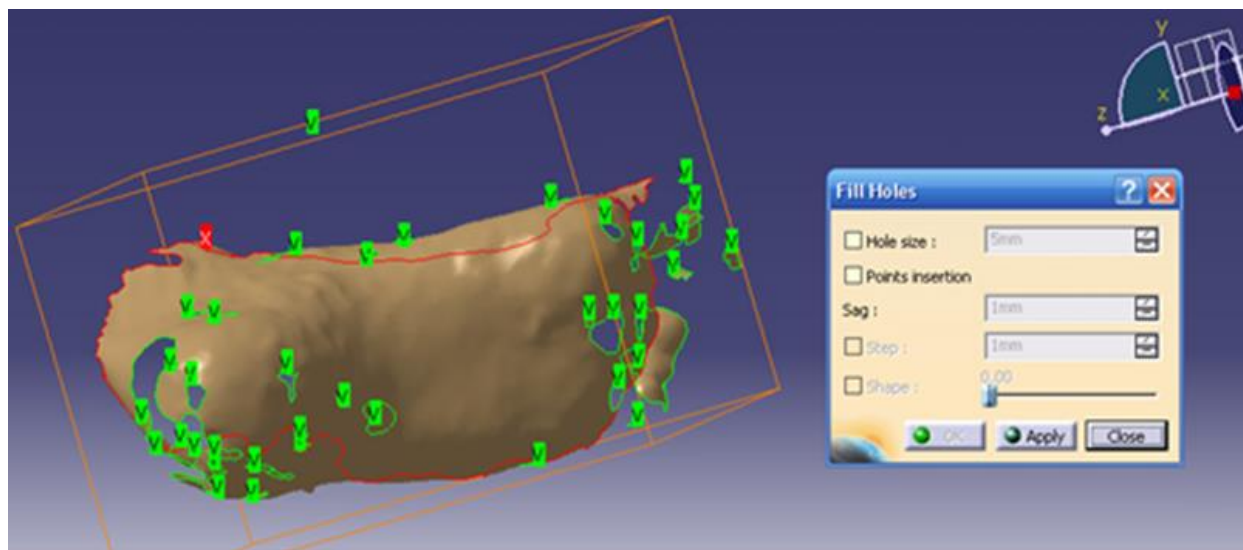


Fig. 4.2.13 Exemplu de utilizare a comenzii Fill Holes, în CATIA, pentru completarea unui model reproducând talpa unui picior scnat prin metoda directă [47], [63], [110]



Fig. 4.2.14 Generarea modelului CAD în urma operației de umplere a găurilor [47], [110]

În figura 4.2.15 este prezentat un exemplu prin care, ulterior operației de generare a modelului de referință, ca suprafață continuă, se pot aplica operații de construire de entități de prototipare. Concret, este prezentat un exemplu de generare prin extrudare a unei entități (inițial într-o formă brută) în vederea modelării și prototipării ulterioare a unor elemente de ortezare plantară, cu rol de corecție progresivă a unor afecțiuni precum platfusul [47], [48], [63].

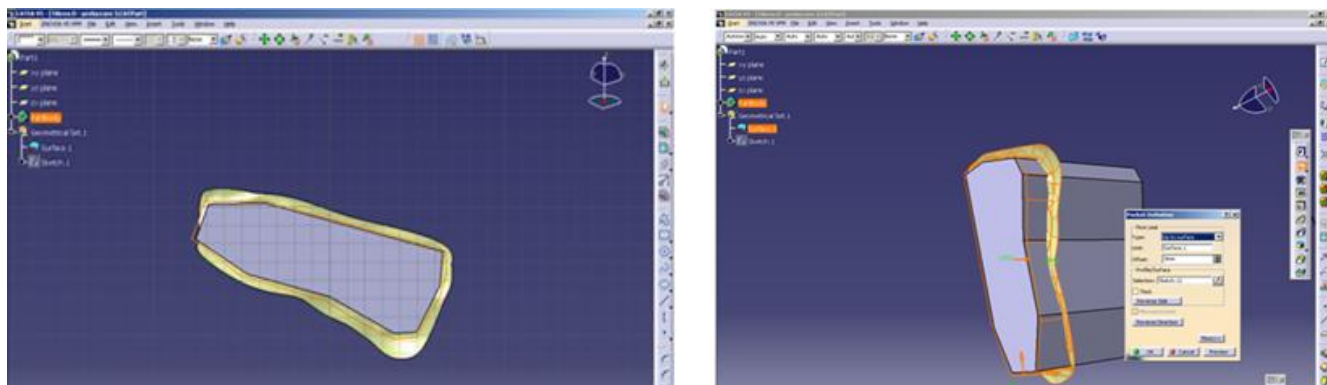


Fig. 4.2.15 *Generarea prin extrudare și modelare CAD a unor elemente de prototipare de orteze plantare cu rol de corecție progresivă [47], [48], [63], [111]*

Ipostaza scanării indirecte constă în scanarea unui mulaj obținut, în prealabil prin amprentarea pe un pat de ipsos a tălpii piciorului subiectului [48], [111]. Ca principal avantaj, în acest caz se poate menționa faptul că dispare riscul ca în timpul scanării să se miște piciorul subiectului. De asemenea, în această situație, procedura de dispunere a reperelor de marcaj nu mai este atât de strictă, deoarece mulajul din ipsos, având un grad mai redus de reflexie, nu conduce la dificultăți majore de identificare a poziției obiectului.

Ca și în metoda scanării directe, în acest caz este indispensabilă necesitatea configurării senzorului, procedura fiind similară cu cea descrisă anterior.

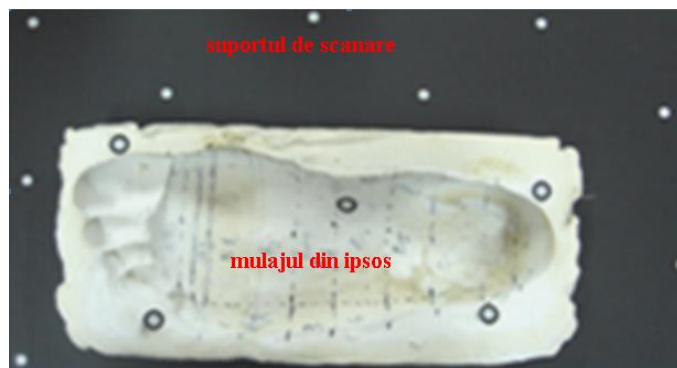


Fig. 4.2.16 *Dispunerea de repere pe mulaj, în situația scanării indirecte [48]*

Deosebirea este că, în acest caz, dispunerea reperelor de marcaj se va face pe mulajul din ipsos, acesta fiind considerat ca obiect de scanat. Se recomandă, în acest caz ca numărul și dispunerea elementelor de marcaj să se facă în conformitate cu numărul și dispunerea elementelor de pe suportul din dotarea kitului de scanare (figura 4.2.16) [48].



Fig. 4.2.17 *Scanarea modelului de tip mulaj [48]*

Procedura de scanare propriu-zisă a obiectului este similară cu cea în cazul scanării directe, în această ipostază, nemaifiind necesară supravegherea subiectului (pentru a nu mișca piciorul). Concret, se procedează la deplasarea scannerului portabil, la distanța prestabilită în urma configurării, față de mulaj (figura 4.2.17).

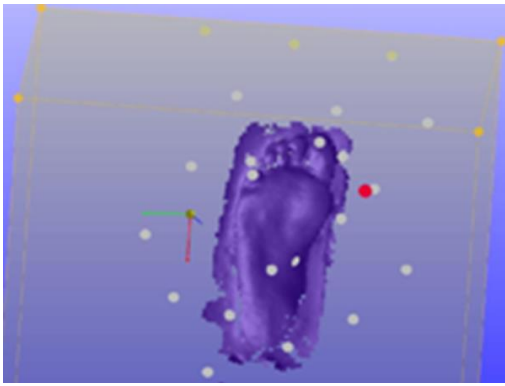


Fig. 4.2.18 Generarea modelului în timpul procesului de scanare a mulajului [48], [111]

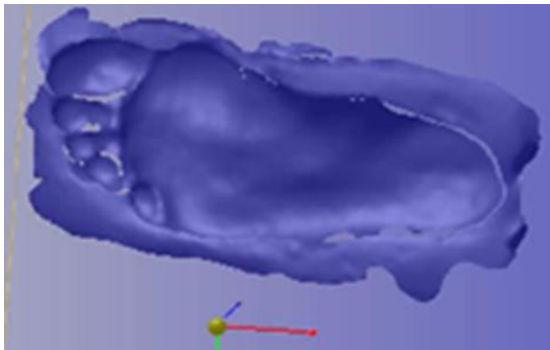
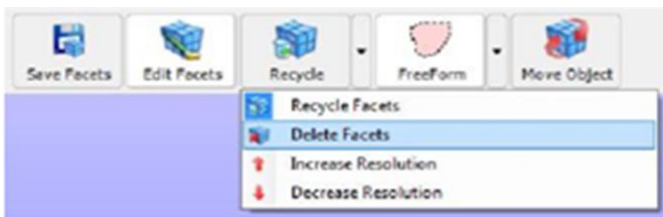
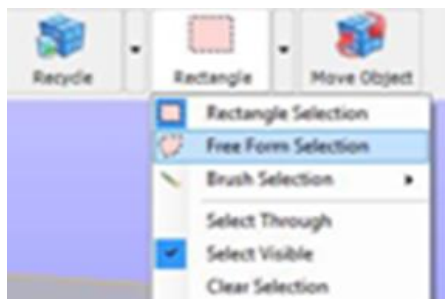


Fig. 4.2.19 Obținerea modelului virtual în urma procesului de scanare indirectă a unui mulaj [48]

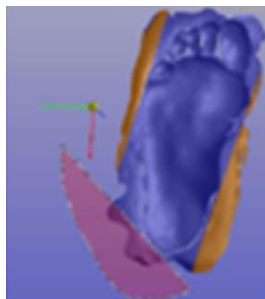
Ca și în cazul scanării directe, etapa următoare scanării, în acest caz, constă în operația de eliminare a porțiunilor ce nu prezintă interes (figura 4.2.20, c), prin apelarea meniului *Edit facets*, urmată de alegerea uneia dintre opțiunile *rectangle*, *free form* etc. (figura 4.2.20, a, b). [48]



a)



b)



c)

Fig. 4.2.20 Procedura de eliminare a porțiunilor ce nu prezintă interes: a) accesarea meniului de ștergere, b) alegerea opțiunii de ștergere; c) ștergerea efectivă a porțiunilor [48]

Generarea imaginii în timpul procesului de scanare este ilustrată în figura 4.2.18, putându-se observa delimitarea volumului de lucru de formă paralelipipedică. De asemenea pot fi observate reperele generate pe modelul virtual, pe baza reperelor lipite pe mulaj și a celor dispuse pe suportul de scanare [48], [111].

În figura 4.2.19 este prezentat un exemplu privind scanarea indirectă a mulajului, observându-se că, în acest caz zonele de tip găuri (de neacoperire) sunt mult mai mici și mai puține decât la folosirea metodei directe de scanare.

În funcție de complexitatea geometriei modelului scanat, opțiunile de ștergere a zonelor nedorite din modelul virtual pot fi alese în mod corespunzător. Spre exemplu, pentru un model cu geometrie complexă, de cele mai multe ori se preferă opțiunea de ștergere de tip *free form*.

Ca și în cazul scanării prin metoda directă, în urma prelucrării modelului chiar în mediul asociat sistemului de scanare, următorul pas este cel de salvare cu extensia *.STL* și de a fi exportat într-un mediu de modelare CAD (*CATIA*, *SolidWorks* etc.) (figura 4.2.22).

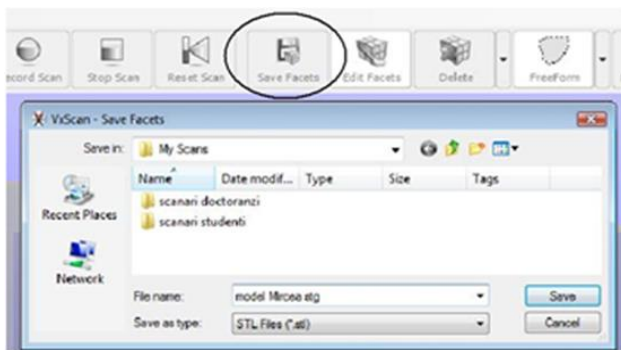


Fig. 4.2.21 Procedura de salvare a operației de prelucrare a modelului scanat [48], [109]

În prealabil, însă, operațiunea de prelucrare a modelului trebuie și ea salvată, apelând meniul *Save Facets* (figura 4.2.21) [48], [109].

Prin utilizarea în mediile CAD ale modelelor exportate, ulterior se pot modela elemente de protezare și ortezare, pornind de la modelul de referință anterior creat.

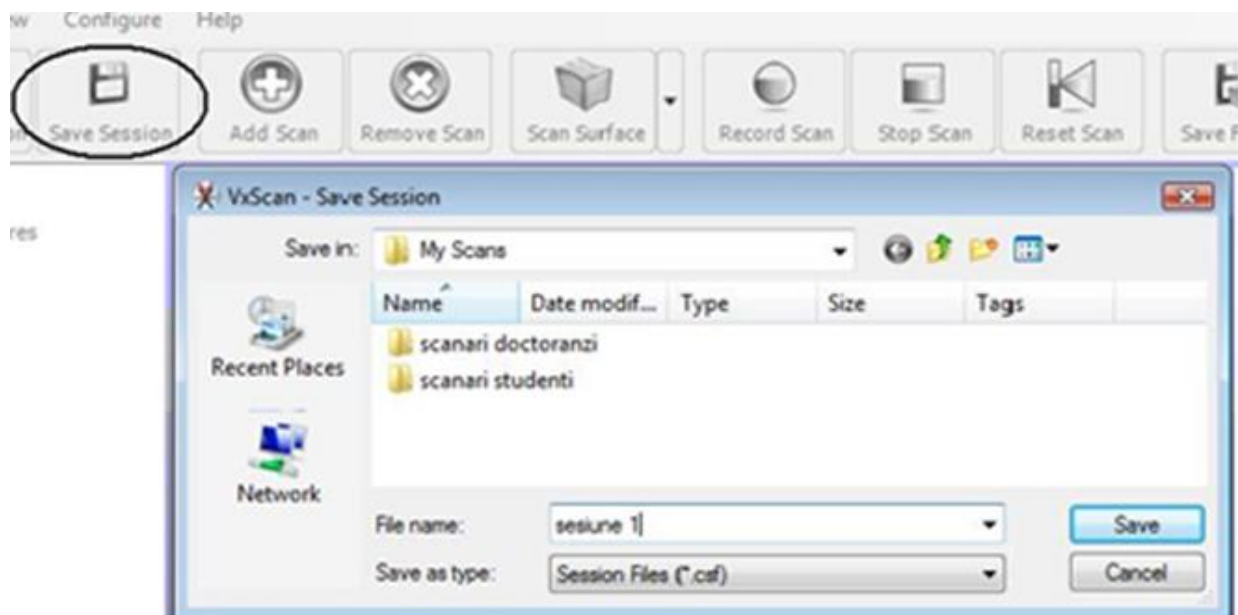


Fig. 4.2.22 Salvarea sesiunii de lucru și a modelului scanat în format compatibil cu mediile de modelare CAD [48], [109]

În vederea prototipării ulterioare a acestor elemente, modelele CAD asociate acestora pot fi salvate și importate în medii software specifice unor simulări, cum ar fi, de exemplu analiza cu element finit. Se are în vedere testarea, inițial într-un mediu virtual a comportării acestora într-un mediu static și dinamic, spre a se cunoaște dacă geometria și dimensiunile modelelor corespund spre a putea fi apoi prototipate și implementate [48], [63] [111].

Exemplul prezentat mai sus a făcut referire la o aplicație în domeniul biomecanicii, aceasta, deoarece sistemele biomedicale, în ultimii ani își găsesc o tot mai largă utilizare, urmărindu-se în mod constant asigurarea și creșterea calității vieții. Domeniul industria rămâne, însă un reper de o mare însemnătate, de asigurarea și verificarea calității producției depinzând într-o măsură covârșitoare siguranța și fiabilitatea în exploatare a produselor de uz general. De asemenea, sistemele de scanare cu LASER, în special cele portabile pot fi folosite cu succes și aplicații de recunoaștere și de restaurare a unor opere de valoare. Acest lucru este posibil datorită avantajului că aceste sisteme portabile de scanare pot fi deplasate cu ușurință și în condiții maxime de siguranță, pe teren. În exemplul de față, aceste sisteme ar putea fi aduse în cadrul unor muzee de patrimoniu, de unde nu ar putea fi extrase operele de valoare pentru a fi transportate către un centru dotat cu mașini fixe în coordonate, greu transportabile [47], [63], [110].

Capitolul 5

Tendențe privind utilizarea sistemelor și tehnicilor de scanare cu surse de emisie LASER

În contextul creșterii susținute a situațiilor în care este necesară deplasarea echipamentului de scanare la fața locului și, coroborat cu cercetările în scopul creșterii continue a performanțelor, utilizarea sistemelor portabile de scanare cunoaște o răspândire tot mai largă. Datorită diversificării domeniilor și aplicațiilor, sistemele portabile de scanare, bazate pe principiul emisie de radiație LASER au cunoscut o puternică dezvoltare, la ora actuală, aceste sisteme fiind folosite într-o proporție covârșitoare. Acest fapt se explică datorită eficienței foarte bune în procesul de numerizare, dar și prin extinderea aplicațiilor ce presupun scanarea de repere de foarte mici dimensiuni și/sau de repere deformabile, necesitând în exclusivitate o scanare fără contact [61], [62], [64].

5.1 Tendențe privind sistemele moderne de scanare și aplicațiile acestora

Printre cele mai răspândite și utilizate sisteme portabile de scanare, la ora actuală se află sistemele de scanare manuală, ca urmare a faptului că acestea sunt foarte practice și eficiente. În cele ce urmează sunt prezentate câteva astfel de sisteme portabile de scanare, de ultimă generație [64]:

a) *Sistemul GoScan3D* (figura 5.1.1) permite măsurări și numerizări eficiente și ușor de realizat, ca urmare a proceselor rapide de scanare 3D a reperelor.



Fig. 5.1.1 Manevrarea sistemului de scanare *GoScan3D* [112]

Aceste scannere s-au dovedit a fi cele mai robuste și, totodată flexibile sisteme, asigurând o soluție profesionistă privind scanarea 3D, incluzând o interfață software *VXmodel*, compatibilă cu mediile software pentru modelarea CAD [112].

Principalele caracteristici tehnice și funcționale sunt prezentate mai jos:

- kit-ul include toate capetele de scanare pentru scanarea profesională 3D a reperelor de diferite culori, cu includerea următoarei succesiuni de operații: scanare, curățire, unire de entități, alinierea modelului și obținerea variantei finale a modelului;
- sistemul prezintă un grad foarte ridicat de portabilitate și manevrabilitate, putând fi cu ușurință adus în aproape orice locație;
- sistemul de scanare prezintă un an garanție, posibilități de actualizare a mediului software și un ghid al utilizatorului;
- compatibilitate cu toate mediile CAD cele mai utilizate (*CATIA*, *ProEngineer*, *SolidWorks* etc.) [63], [64], [112].



Fig. 5.1.2 Manevrarea scannerului HandyScan3D, pentru numerizarea unei caroserii auto [113]

b) Sistemul HandyScan3D (figura 5.2) este o generație încă și mai nouă de scannere portabile, acestea fiind optimizate astfel încât să vină în întâmpinarea necesităților conceptelor de dezvoltare și design de produs și de profesionalism ingineresc, asigurând cel mai eficient și fiabil mod de achiziție de date și de imagini 3D ale obiectelor cu geometrii simple și complexe [113].

Avantajele majore ale acestor sisteme constau într-un grad foarte înal de portabilitate și manevrabilitate, precum și în măsurări cu un nivel înalt de precizie [113].



Fig. 5.1.3 Utilizarea sistemului METRASCAN3D [114]

c) Sistemul METRASCAN3D (figura 5.1.3) reprezintă un sistem portabil de scanare și măsurare în coordonate, pe principiul optic, fiind una dintre cele mai precise și automatizate soluții de scanare 3D, atât în condiții de laborator, cât și în mediul industrial [114].

d) Sistemul Profi 3D Scanner (figura 5.1.4) este un echipament profesionist, funcționând pe principiul luminii structurate, asigurând o precizie de scanare deosebit de ridicată, atât pentru numerizarea obiectelor de mici, cât și a obiectelor de mari dimensiuni [115].



Fig. 5.1.4 Sistemul de scanare Profi 3D Scanner [115]

Principalul avantaj al acestui sistem constă în faptul că permite obținerea de modele virtuale ce reproduc orice tip de obiect. Procedura de scanare poate recomanda sau nu, după caz, utilizarea de repere de scanare și, prin urmare acest sistem este capabil să reproducă foarte precis, cu o înaltă rezoluție, modelele supuse scanării. Pe lângă acest avantaj, acest sistem oferă și alte beneficii:

- posibilitatea de a scana obiecte cu dimensiuni (lungimi) între 5 mm și 5 m;
 - calibrare și scanare foarte rapidă cu durata totală de până la 3 minute;
- sistemul este livrat într-un ambalaj foarte practic, putând fi transportat cu ușurință în orice loc;
- sistemul are disponibile versiuni avansate ce utilizează camere de rezoluție înaltă [115].

e) Sistemul Kaarta-Real Time Slam (figura 5.1.5) reprezintă se asemeena o soluție mobilă de scanare automată de producere a sursei de lumină, având o serie de avantaje majore, cum ar fi rapiditatea, precizia și prețul de cost scăzut [116].



Fig. 5.1.5 Sistemul autonom de scanare Kaarta-Real Time Slam [116]

Acest sistem permite generarea modelului digital 3D după obiectul real în doar câteva secunde. Acest lucru se explică prin faptul că rata de transfer a datelor este de 8 ori mai mare în comparație cu scannerele tradiționale [116].

Principalele specificații tehnice ale acestui sistem de scanare sunt prezentate mai jos:

- este dotat cu adaptoare de tip *VLP-16* și *HDL-32E LIDAR*;
 - porturi pentru transferul de date: *HDMI* și *USB3 X2*;
 - sistemele de conexiune sunt incluse în kit;
 - tensiunea de alimentare: $12\text{ V} \div 19\text{V}$, în curent continuu;
 - masa kit-ului: 0,7 kg;
 - procesor *I7*, *dual core*;
- sistemul este potrivit pentru cartarea prin inspecție a drumurilor din centrele urbane, dar și a drumurilor din afara marilor orașe;
 - poate fi utilizat în condițiile dispunerii pe autovehicule ce rulează cu viteze de până la 70 km/oră, chiar și pe drumuri prevăzute cu tuneluri, poduri peste cursuri de apă sau drumuri ce trec prin zone împădurite;
 - scannerul *Kaarta-Real Time Slam* asigură un sistem de generare a hărților 3D cu o precizie foarte înaltă, cu erori de localizare de maxim 0,03 m;
 - oferă excelente informații în vederea utilizării lor la structurile de modele CAD;
 - permite măsurarea directă a structurilor și a clădirilor [116].

f) Sistemul *Kaarta Contour – Real Time Slam* (figura 5.1.6) este o soluție perfectă pentru scanări de interior, acesta fiind un sistem de scanare care generează modelele scante 3D în timp real. Ecranul integrat, de tip touch screen conferă ușurință în utilizarea acestui tip de scanner portabil. Pe ecran se generează modelul construit în timp real, permițându-i utilizatorului să îmbunătățească procesul de scanare chiar în timpul procesului. În plus operatorul are posibilitatea de a utiliza ecranul în scopul obținerii de informații cu privire la condițiile de mediu [116].



Fig. 5.1.6 Sistemul portabil Kaarta Contour – Real Time Slam [116]

Sistemul de scanare poate fi asociat cu un kit compus dintr-o platformă inercială și o cameră foto fotogrametrică pentru denerarea de hărți 3D în timp real. Tehnologia *Kaarta Engine TM* garantează o precizie cu eroare de doar 0,2%, raportată la întreaga distanță, în raport cu erori de circa $1 \div 2\%$ în cazul sistemelor tradiționale de scanare rapidă. Sistemul de scanare poate fi dispus pe o dronă, pe un autovehicul. Poate fi transportat cu ușurință, fie în mână, fie chiar într-un rucsac [116].

Printre principalele sale catacteristici tehnico-funcționale se pot menționa următoarele:

- domeniul de scaanre: 15 metri;
- ușurință în utilizare;
- adaptabilitate pe diferite platforme;
- rată de transfer foarte ridicată în transmiterea de date (43.200 puncte / s);
- procesare a datelor în timp real;
- cameră fotogrametrică integrată;
- ecran de tip touch screen pe 7 inch;

- acuratețea razei LASER: 30 mm;
- posibilitatea generării de imagini HD, de tip color [116].

În figura 5.1.7 sunt prezentate două exemple de hărți 3D ale unor cladiri și spații scanate cu acest tip de scanner.

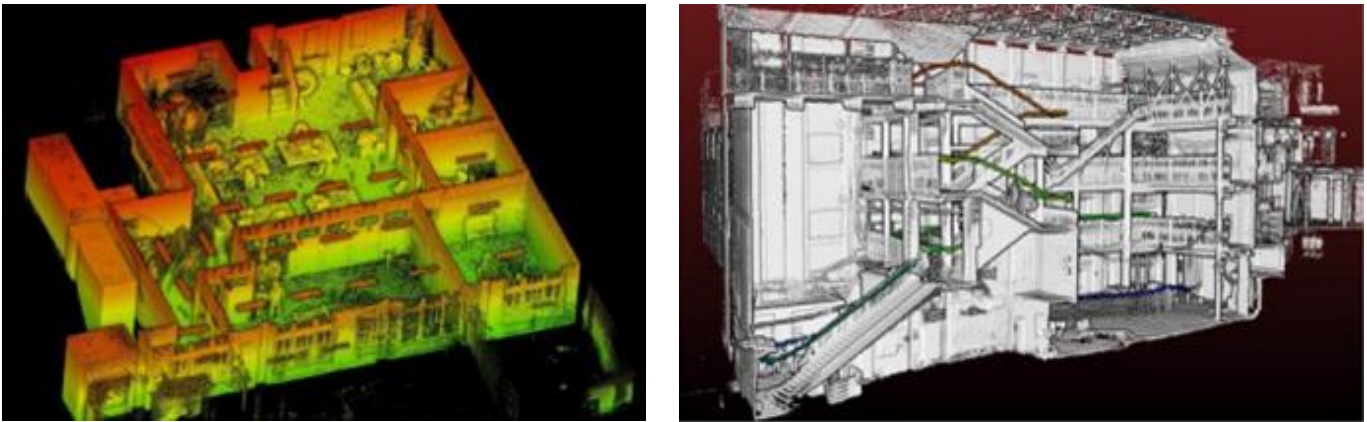


Fig. 5.1.7 Exemple de hărți de scanare 3D, cu ajutorul sistemului Kaarta Contour – Real Time Slam [116]

g) *Sistemul LIFA Surveyors*

Fiind produs de către compania daneză *LIFA A/S*, acest sistem este utilizat cu precădere în servicii de supraveghere, prin intermediul monitorizării prin cartarea, respectiv prin scanarea cu LASER. În cazul scanării pe principiul utilizării radiației LASER, se pot numeriza obiecte de mari dimensiuni, prin reproducere în detaliu, cu precizii de 5 μ m, putând fi folosite cu succes pentru orice tip de aplicație industrială (figura 5.1.8) [117].



Fig. 5.1.8 Sistemul *LIFA Surveyors* [117]

În figura 5.1.9 este prezentat un exemplu de numerizare a unui reper, prin utilizarea sistemului *LIFA surveyors* [117].

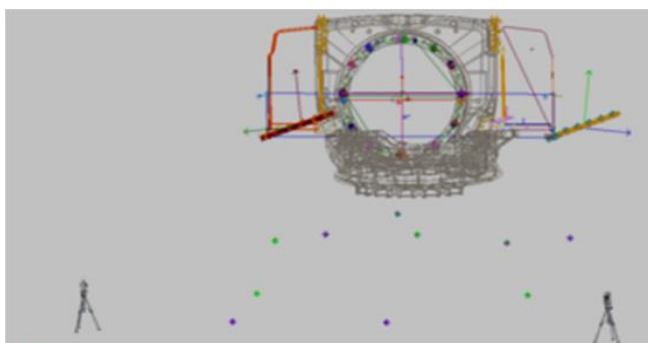


Fig. 5.1.9 Exemplu de aplicație de numerizare a reperelor, prin folosirea sistemului *LIFA surveyors* [117]

Principalele caracteristici tehnico-funcționale și accesorii, din care derivă avantajele folosirii unui astfel de sistem, se regăsesc după cum urmează:

- măsurare pe principiul trasării LASER;
- braț portabil pentru măsurare;
- fotogrametrie digitală;
- sistem pentru analiza măsurărilor;
- consultanță metrologică;

- sistem de optimizare a funcționării mașinii;
- inginerie inversă;
- dispune de configurația mașinii [117].

Printre exemplele de aplicații ale folosirii unui astfel de sistem se pot enumera:

- alinierea și verificarea palelor morilor de vânt;
- alinierea cadrelor ușilor și ferestrelor din aluminiu, în cazul construcțiilor cu structuri complexe;
- determinarea erorilor și alinierea pe 6 axe a mașinilor de frezat, prin utilizarea sistemului de cartare LASER;



Fig. 5.1.10 Exemplu de măsurare pe teren a alinierii și formei palelor unei mori de vânt, cu ajutorul sistemului LIFA surveyors [117]

- inspecția rapidă a palelor morilor de vânt (figura 5.1.10);
- inspecția mașinilor utilizate pe platformele de extracție a petrolului;
- nivelarea și inspecția urmelor, cu ajutorul sistemului de cartare LASER;
- măsurarea și inspecția mașinilor de debitat hârtia;
- măsurări de înaltă precizie a podurilor de cale ferată;

- programarea sesiunilor de măsurare în cadrul mediilor software *PC-DMIS* și *Spatial Analyzer*;
- ingineria inversă în cadrul proiectării / fabricației de cutii de viteze [117].

h) Sistemul LASER scanning (figura 5.1.11) este utilizat pentru cartarea de mare precizie a unor structuri și sisteme de mari dimensiuni, în domeniul naval, rutier, al construcțiilor etc. Avantajul acestui sistem este acela că permite o foarte bună reproducere fotografică în culori, în format 3D a structurilor, oferind o excelentă și flexibilă oportunitate în modelarea și vizualizarea CAD [117].



a)



b)

Fig. 5.1.11 Utilizarea sistemului LASER Scan: a) la scanarea încăperilor; b) la cartarea structurilor de tip pod sau pasarelă [117]

Printre aplicațiile de bază ale sistemului LASER Scan se pot specifica următoarele:

- operațiuni de supraveghere a clădirilor și a instalațiilor tehnice;
- scanarea fațadelor clădirilor;
- scanarea și măsurarea conductelor și a rezervoarelor;
- scanarea navelor;
- cartarea structurilor de tip poduri, drumuri, pasarele etc.

Principalul avantaj este acela că sistemul permite o reproducere fidelă a modelului 3D al structurii scanate [117].



Fig. 5.1.12 Exemplu de utilizare a sistemului LIFA Monitoring Solution în supravegherea clădirilor [117]

i) Sistemul *LIFA Monitoring Solution* permite o monitorizare atentă și precisă a deplasărilor în coordonate carteziene, de-a lungul axelor OX, OY și OZ, în scopul creșterii siguranței în supravegherea clădirilor (figura 5.1.12).

Prin urmărirea pe toate cele 3 axe, sistemul asigură o prevenție totală în a se evita eventuale pagube sau furturi la nivelul construcțiilor și/sau echipamentelor, inclusiv în a se evita producerea de accidente soldate cu victime [117].

Deviza acestui sistem este: “*Prin monitorizarea mișcărilor pe toate cele 3 axe, se garantează siguranța*”. Scopul principal în utilizarea acestui sistem este creșterea siguranței, astfel că, orice deplasare pe o clădire sau pe o pantă poate fi monitorizată, înregistrată, prin transmiterea în timp util a unui semnal de avertizare, în vederea luării de măsuri necesare spre a se evita pagube la nivelul echipamentelor, respectiv pentru a se evita accidentările la locul de muncă. Prin aceasta, se pune în funcțiune sistemul *SHM (Structural Health Monitoring)*, adică sistemul de monitorizare structurală a sănătății, prin care structuri precum clădirile, podurile sau alte construcții sunt monitorizate în mod continuu, în vederea impunerii unor schimbări în ceea ce privește desfășurarea activităților, precum chiar și în ceea ce privește condițiile de lucru [117].

Printre altele, sistemul *LIFA Monitoring Solution* utilizează următoarele echipamente:

- instrumente clasice de supraveghere:
 - stații complet robotizate (*RTS – Robotic Total Station*);
 - senzor GPS;
 - sisteme de cartare;

- senzori geo-tehnici:
 - senzor de înclinare;
 - extensometru;
 - senzor hidrostatic;
 - senzor de forță;
- senzori de monitorizare a condițiilor meteorologice:
 - stație Meteo;
 - senzor pentru măsurarea nivelului apei.

Printre principalele aplicații ale sistemului *LIFA Monitoring Solution*, se pot enumera:

- supravegherea liniilor de cale ferată;
- supravegherea podurilor;
- supravegherea fațadelor secundare ale clădirilor;
- supravegherea alunecărilor de teren [117].

5.2 Tendințe privind tehnologiile de scanare

În ceea ce privește tehnologiile de scanare, s-au dezvoltat diferite tehnologii moderne, printre care cea mai răspândită este tehnologia *Reverse Engineering*, cu aplicații în scanările 3D ale mașinilor în coordonate [118].

Tehnologia *Reverse Engineering* reprezintă un proces prin care un reper sau o componentă a unui ansamblu fără nici un fel de dată sau informație prealabilă este digitizat. O scanare sau un nor de puncte este creat, după care este transformat într-o rețea poligonală de tip *Mesh*. Aceasta, ulterior este folosită pentru crearea unei rețele de suprafețe de tip *NURBS* (figura 5.2.1). Aduse într-un mediu software CAD, aceste modele sunt utile în modificarea (prin modelare CAD) a componentelor, pentru asamblarea virtuală a acestora și pentru generarea datelor privind coordonatele și cotele măsurate ale reperelor numerizate [118].

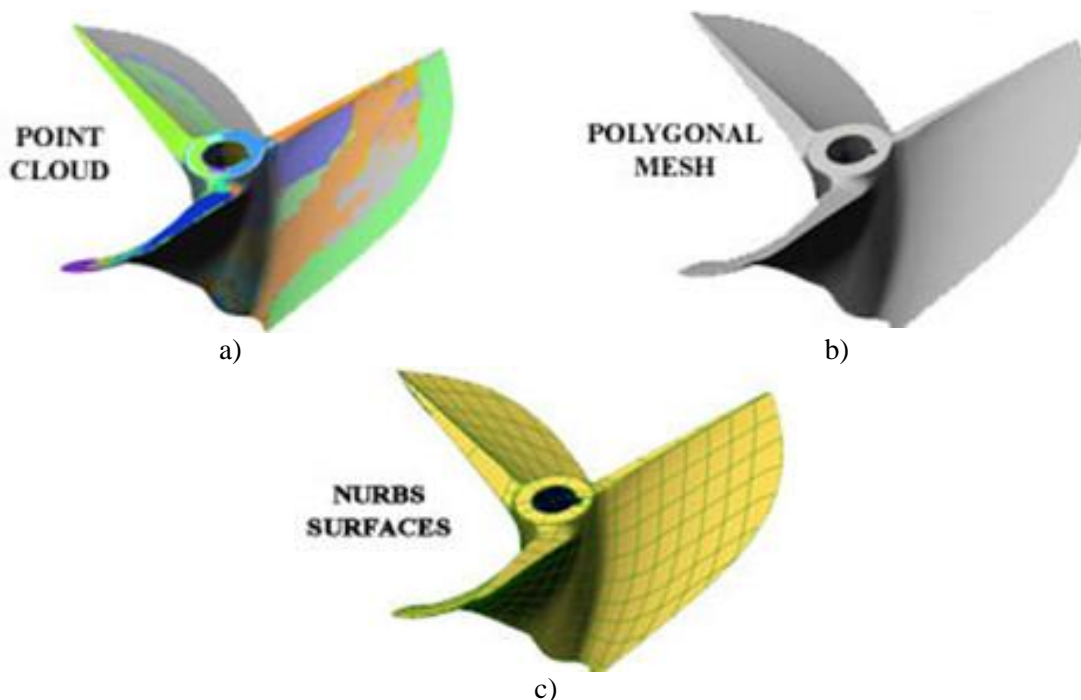


Fig. 5.2.1 Digitizarea unui reper de tip elice, prin utilizarea tehnologiei *Reverse Engineering*: a) etapa obținerii norului de puncte; b) etapa generării rețelei de tip poligonal; c) etapa generării suprafețelor de tip *NURBS* [118]

Prin această tehnică de scanare, cu utilizarea principiului emisiei de radiație LASER, se asigură măsurarea și scanarea de înaltă acuratețe și precizie, cu generarea modelului CAD (virtual) în timpul procesului de numerizare. Ca urmare, se poate spune că această tehnică devine mai eficientă, mai rapidă decât cele utilizate în cadrul mașinilor de măsurare în coordonate clasice, prin folosirea unui sistem de digitizare a norilor de puncte, a unei hărți de comparare. Prin aceasta se garantează o inspecție cu acuratețe înaltă a reperelor scanate, în comparație cu modelele CAD asociate acestora (figura 5.2.2) [118].

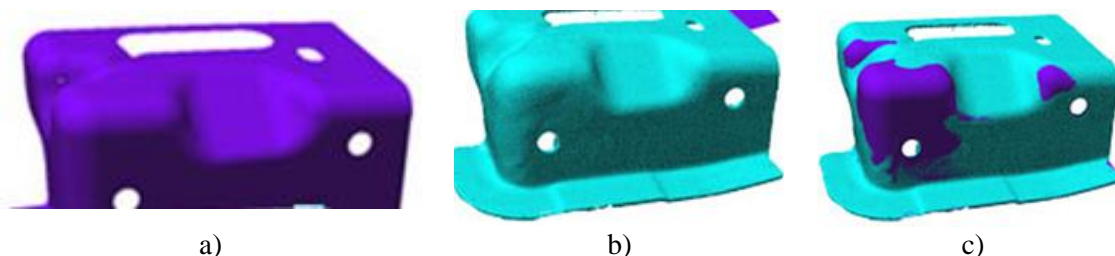


Fig. 5.2.2 Utilizarea hărților de comparare cu un model CAD, în cadrul procesului de numerizare a unui reper de tip carcasă: a) modelul CAD; b) harta de comparare a modelului; c) alinierea prin suprapunere a hărții peste modelul CAD [118]

În figura 5.2.3 este prezentat un exemplu de numerizare a unui reper, cu generarea modelului CAD și a raportului privind inspecția dimensională. În acest exemplu este prezentată tehnica de suprapunere și comparare a modelului CAD, generat în urma numerizării reperului peste modelul CAD obținut ca raport al inspecției dimensionale [118].



Fig. 5.2.3 Suprapunerea modelului CAD peste harta de comparație și generarea rapoartelor inspecției dimensionale, în cazul numerizării unui reper de tip carcasă [118]

Bibliografie:

- [1] Cobliș, C. - *Contribuții privind măsurarea numerică 3D a suprafețelor complexe. Teză de Doctorat*, Brașov, 2011, conducător științific: prof. dr. ing. Ciprian OLTEANU;
- [2] Advancedmcode.org - *Surface reconstruction from scattered points cloud*, <http://www.advancedmcode.org/surface-recostruction-from-scattered-points-cloudmycrust-robust> - accesat în iulie 2010;
- [3] Cobliș, C.; Olteanu, C.; Faluvegi, E. - *Analysis of a turbine wheel inspection process*, Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics, volumul 39, paginile 181 -184;
- [4] COORD 3 Metrology. Metrology in Focus - *Benefits of CMM Laser Scanning*, <http://www.coord3-cmm.com/benefits-of-cmm-laser-scanning/> - accesat în octombrie, 2015;
- [5] Braun, B., Olteanu, C., Cobliș, C. – *Mașini de măsurare în coordonate, vol I*, Editura Universității TRANSILVANIA din Brașov, 2009, ISBN: 978-973-598-646-9-gen., 978-973-598-647-6-vol. I;
- [6] Braun, B. *Contribuții privind optimizarea echipamentului de măsurare de la automatele de control*, teza de Doctorat, conducător științific: prof. dr. ing. Ciprian Justin OLTEANU, 2009;
- [7] ZUMBACH Catalog - <http://www.zumbach.com/products/product-finder/odac/odac-overview.html>, accesat în luna septembrie, 2015;
- [8] Braun, B. - *Non contact displacement transducers implementation as stage in the development of a flexible low cost coordinate measuring machine*, Applied Mechanics and Materials, Vol. 772 pp 312-317, ISSN: 978-3-0385-502-1 (www.scientific.net), iunie 2015;
- [9] Maxime, C.; Samy, F.; Soizic, G.; Minh, H - *Rapport de projet: Les capteurs de déplacement* - INSA Rouen, 2001 – 2002, pag. 7,8, 32;
- [10] Olteanu C. – *Mașini de măsurare în coordonate. Notițe de curs*, 2007;
- [11] Toru, Y - *Handbook of Optical Metrology Principles and Applications*, CRC Press Taylor and Francis Group, Boca Raton, 2008;
- [12] Haibin, Z. - *Multisensor Integration and Discrete Geometry Processing for Coordinate Metrology*, Teză de doctorat, Cachan, France, 2010;
- [13] Josep, F. C. - *New Methods for Triangulation – Based Shape Acquisition Using Laser Scanners*, Teză de doctorat, Girona, Spain, 2004;
- [14] LASER Design - *New advances in 3D laser scanning technologies from Laser Design*, www.laserdesign.com - accesat în februarie 2009.
- [15] Rastogi P.K. - *Topics in Applied Physics. Photomechanics*, Springer, 3540659900, Heidelberg, 1999;
- [16] Optical Metrology Centre, www.optical-metrology-centre.com - accesat în martie 2010;
- [16] Dias-da-Costa D., Jónatas, V., Eduardo N.J. - *Laboratorial test monitoring applying photogrammetric post-processing procedures to surface displacements. Measurement*, vol. 44, pag. 527–538, 2011;
- [18] Rajpal, S. - *Optical Methods of Measurement*, Wholefield Techniques, Second Edition, CRC Press, Boca Raton, 2009;

- [19] Prieto, F. - *Metrologie assistee par ordinateur: apport des capteurs 3D sans contact, Computer assisted metrology: Contribution of the laser range sensors*, Teză de doctorat, Montreal, 2000;
- [20] Manzella I., Labiouse V. - *Extension of the Fringe Projection Method to Measure Shape and Position of the Centre of Mass of Granular Flow Deposit*, The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, India, pag. 4547 – 4554, 2008;
- [21] Wolfgang, O. - *Fringe 2005*, The 5th International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns, Springer, Berlin, 2006;
- [22] Zhaoyang, W., Hua Du, Hongbo, Bi - *Out-of-plane shape determination in generalized fringe projection profilometry*, Optical Society of America, volumul 14, nr. 25, OPTICS EXPRESS, 2006;
- [23] Marek, D. - *Influence of LASER diode wavelength tunability on the range, resolution and repeatability of interferometric distance measurement*, Optics & Laser Technology, vol. 40, pag. 352–359, 2008;
- [24] Quan C., He X. Y., Wang C. F., Tay C. J., Shang H. M. - *Shape measurement of small objects using LCD fringe projection with phase shifting*, Optics Communications, vol. 189, pag. 21 – 22, 2001;
- [25] Zuojun, T., Dejjia H. - *Improve accuracy of laser beam width measurement using a genetic algorithm*, Optics and Lasers in Engineering, volumul 47, pag. 1091–1096, 2009;
- [26] Zonghua, Z., Catherine, E., T. and David P., T. - *Shape and colour measurement of colourful objects by fringe projection*, Techniques, vol. 7063, pag. 1 - 12, 2008;
- [27] Andrew M., W. - *Ultrafast Optics*, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2009;
- [28] Rifat, B. and Cem, U. - *Single Stripe Projection based Range Scanning of Shiny Objects Under Ambient Light*, Computer and Information Sciences, volumul 24, paginile 1 - 6, 2009;
- [29] Jure, R., Justin, C., Marko, M. - *Dimensional measurements of a gray - iron object using a robot and a LASER displacement sensor*, Robotics and Computer, Integrated Manufacturing, vol. 25, pag. 155–167, 2009;
- [30] Ponsar, M., Chicot, J. et al – *Three - dimensional measurement with LASER*, The Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics, volumul 18, nr. 33, paginile 91 - 96, 2008;
- [31] Arai Y., Takegawa T., Yokozeki S. - *Measurement optimum condition of speckle interferometry based on dual-camera technique*, Measurement, vol. 44, pag. 29 – 33, 2011;
- [32] Mahmud, M.; Joannic, D.; Fontaine, J. C.; Gonnet, J. P. - *Analyse de processus de numérisation de pièces tridimensionnelles complexes*, CPI 2005, Casablanca, Morocco, 2005;
- [33] Derigent, W.; Chapotot, E.; Ris, G. – *Contrôle de piece par capteur LASER – definition de fonctions d’aide a la numerisation*, CPI 2005, Casablanca, Morocco, 2005;
- [34] http://www.nikonmetrology.com/en_US/Products/Coordinate-Measuring-Machines/LK-CMM-Technology - *Sistemul de scanare ALTERA 7.5.5* – accesat în decembrie 2015;
- [35] <http://www.leica-geosystems.com/downloads123/hxmt/romer/romer-gscan-rx2/brochures/pdf> - *Sistemul GS Scan RX2, Romer* – accesat în februarie 2010;
- [36] <http://perceptron.com/products/3d-scanning-solutions/> - *CMM Scanning*. Perceptron – accesat în martie 2010;

- [37] <http://www.metris3d.hu/lc15> - *Captorul de măsurare și scanare LC15 Optical Probe* – accesat în ianuarie 2016;
- [38] http://www.metris3d.hu/lc50_eng_1007.pdf - *LC50 Optical Probe* – accesat în ianuarie 2016;
- [39] http://www.metris3d.hu/xc50ls_eng_1007.pdf - *XC 50 – LS Cross Scanner* - accesat în noiembrie 2015;
- [40] <http://www.kreon3d.com/3d-scanners/zephyr25kz> - *Kreon technology scanners* - accesat în iunie 2011;
- [41] http://www.hexagonmetrology.asia/cms-106_812.html - *Hexagon Metrology, CMS 106 – 3D point scanning* – accesat în iunie 2011;
- [42] http://www.nikonmetrology.com/products/cmm_scanners/xc65d/ - *Nikon Metrology, XC65D (LS) Digital Cross Scanner* – accesat în iulie 2011;
- [43] Ruey, T., L.; Fang, J., S. - *Multi-beam laser probe for measuring position and orientation of freeform surface*, Measurement 2011, Vol. 44, pag. 1-10;
- [44] http://www.nikonmetrology.com/products/cmm_scanners/xc65d/ - *Nikon Metrology, XC65D (LS) Digital Cross Scanner* - accesat în mai 2011
- [45] http://www.nikonmetrology.com/cmm_scanners/lc15 - *Nikon Metrology, LC 15 High resolution and high accuracy digitizing* - accesat în decembrie 2010;
- [46] Lehman, J.; Cromer, C.; Shao Yang, S.; Dowell, M. - *Review of ultraviolet and high power laser measurement standards at NIST*, Simposio de Metrologia, Boulder, Colorado, 2006;
- [47] Roșca, I.; Braun, B.; Marosy, Z., I., *Computer aided optimization of quality inspection methods for complex models used in Biomechanics*, Annals of DAAAM Vienna, Zadar, Croatia, 20-23 October 2010, ISSN 1726-9679, ISBN 978-3-901509-73-5, pp 0053, 0054, 2010;
- [48] Braun B.; Roșca, I.; Drugă, C.; Ionescu, I. - *Assisted scanning techniques optimization with application in Biomechanics*, International Conference on Medicine, and Health Care through Technology, MediTECH 2011, Cluj – Napoca, 29 august – 2 septembrie 2011, ISBN: 978-3-642-22585-7, pp. 376 – 379;
- [49] <http://www.laserdesign.com/products/artec-eva-3d-scanner/> - *Artec Eva 3D Scanner* – accesat în ianuarie 2016;
- [50] Braun, B.; Repanovici, A.; Ionescu, M. - *CAD models obtaining for ECO-TECH and Biomechanics*, Annals of DAAAM Vienna for 2010, Zadar, Croatia, 20-23 October 2010, ISSN 1726-9679, ISBN 978-3-901509-73-5, pp 1281, 1282;
- [51] <http://www.laserdesign.com/products/artec-portable-3d-scanners/> - *Dispozitivul Artec Spoider 3D Scanner* - accesat în ianuarie 2016;
- [52] <http://www.laserdesign.com/products/rexcan-3d-scanner/> - *Sistemul Rexscan 4 3D Scanner* - accesat în ianuarie 2016;
- [53] <http://www.laserdesign.com/products/surveyor-space-arm/> - *Sistemul Surveyor Space Arms* - accesat în ianuarie 2016;
- [54] <http://www.laserdesign.com/products/geomagic-capture-scanner/> - *Geomagic Capture Scanner* - accesat în ianuarie 2016;

- [55] <http://www.laserdesign.com/products/rexcan-cs-3d-scanner/> - *Rexscan CS + 3D Scanner* - accesat în ianuarie 2016;
- [56] <http://www.laserdesign.com/products/rexcan-ds3/> - *Rexscan DS3 Scanner* - accesat în ianuarie 2016;
- [57] <http://www.creaform3d.com/en/metrology-solutions/portable-3d-scanner-handyscan-3d> - *Portable 3D Scanners – Handy Scan 3D* - accesat în decembrie 2015;
- [58] <http://www.hexagonmetrology.us/products/portable-measuring-arms/romer-laser-scanners/hp-l-20-8-laser-scanner> - *HP – L – 20.8 Laser Scanner* - accesat în decembrie 2015;
- [59] <http://www.hexagonmetrology.us/products/portable-measuring-arms/romer-absolute-arm> - *Absolute Arm - 6 Axis* - accesat în decembrie 2015;
- [60] <http://www.hexagonmetrology.us/products/portable-measuring-arms/romer-laser-scanners/rs3-integrated-scanner> - *RS3 Integrated Sensor* - accesat în decembrie 2015;
- [61] <http://3dprint.com/49306/smart3d-perceptron-scanning/> - *Perceptron Smart 3D Laser Scanning System* - accesat în ianuarie 2016;
- [62] <http://proto3000.com/3d-laser-scanning.php> - *Proto 3000 - 3D Laser Scanning* - accesat în ianuarie 2016;
- [63] Braun, B.; Baritz, M. – *CAD-CAM procedure using for rapid prototyping with application in Biomechanics*, 6th International Conference Engineering Graphics Design, ICEGD 2015, by SORGING, Brasov, Romania, 11th – 13th June, 2015, Fascicle 3, Section Engineering Computer Graphics, ISSN: 2344-4681
- [64] <http://www.faro.com/products/metrology/faroarm-measuring-arm/overview> - *Brațele de măsurare și scanare Faro Arm products* - accesat în ianuarie 2016;
- [65] <https://www.creaform3d.com/en/portable-3d-scanner-handyscan-3d> - *Handy Scan 3D – EXA Scan* - accesat în ianuarie 2010;
- [66] http://www.nikonmetrology.com/en_EU/ - *Nikon Metrology NV* – accesat în iunie 2016;
- [67] <http://www.faro.com/home> - *The world's most trusted source for 3D measurement technology* - accesat în iulie 2016;
- [68] <http://www.kreon3d.com/scanning-arms-portable-cmm/ace-measuring-arm-portable-cmm/> - *Ace measuring arm, portable CMM*, accesat în iulie 2016;
- [69] <http://perceptron.com/> - *Automated Enterprise Metrology Solutions* - accesat în iulie 2016;
- [70] <http://www.renishaw.com/en/about-renishaw-6432> - *Precision Measurement and Process Control* - accesat în iulie 2016;
- [71] <http://www.hexagonmetrology.co.uk/> - *Hexagon Manufacturing Intelligence* - accesat în septembrie 2016;
- [72] <https://www.artec3d.com/about> - *Handheld 3D Scanners* - accesat în septembrie 2016;
- [73] <http://wenzelamerica.com/> - *Wenzel Innovative Technology* - accesat în septembrie 2016;

- [74] Braun, B., Olteanu, C., Cobliș, C. – *Mașini de măsurare în coordonate, vol II*, Editura Universității TRANSILVANIA din Brașov, 2014, ISBN: 978-973-598-646-9-gen., 978-606-19-0434-1-vol. II.
- [75] Voicu, A., C.; Gheorghe, I. Gh. - *Măsurarea 3D a reperelor complexe din industria auto utilizând scanare LASER*, Buletinul AGIR, nr. 3, pag. 109, 2013;
- [76] Cojocaru, A., F. – *Principiul triangulației, Lucrare de Disertație*, 2016, Universitatea Gh. Asachi din Iași, Facultatea de Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației;
- [77] Braun, B.; Drugă, C.; Baritz, M. - *Virtual Laboratory and Virtual Instrumentation in Engineering Education - 1st International Conference, Computational Mechanics and Virtual Engineering, COMEC 2005, 20–22 October 2005, Brasov, Romania, ISBN 973 – 635 – 593 – 4*
- [78] Bradshaw, G. - *Non-Contact Surface Geometry Measurement Techniques*, Trinity College, Dublin, 1998/1999;
- [79] Lunazzi, J., J., Noemi, R., R. – *3D Shadowgram projection using a simple diffractive screen*, XXIX ENFMC, Annals of Optics, 2006;
- [80] Baritz, M., I., Conte, M., Roșca, I. C.: *Surface Deformations Analysis by Double Exposure Holography Using Guided Waves and Image Processing, Interferometry in Speckle Light*, Springer Berlin Heidelberg, pag. 161-168, 2000;
- [81] K. Hegensbach, F. Koch – *Fachwissen Metall. Grundstufe und Fachstufe I - Stam – Verlag Koln – Munchen*, 1996;
- [82] Fowles G. R. - *Introduction to Modern Optics*, Holt, Rinehart and Winston, Inc., New York, 1968;
- [83] Chambreuil, M; Fouilleux, S. – *Les capteurs de déplacement. Rapport de projet*, INSA Rouen, 2001;
- [84] <https://www.google.ro/tehnucamoire> - *Fenomenul Moiré*, site accesat în noiembrie 2016;
- [85] <http://www.advancedmcode.org/surface-recostruction>, *Surface reconstruction from scattered points cloud*, Advancedmcode.org, , site accesat în iulie 2010;
- [86] Peng, T., Satyandra, G., Kam L., *Algorithms for constructing 3 – D Point Clouds Using Multiple Digital Fringe Projection Patterns*, Computer – Aided Design and Applications, vol. 2, nr. 6, pag. 737 – 746, 2005;
- [87] Mahmud, M., Fontaine, J., F., *Analyse de processus de numerisation de pieces tridimensionnelles complexes*, CPI, Casablanca, Maroc, pag. 5 – 14, 2005;
- [88] Fontaine J.F., Gonnet J.P., Isheil A., Joannic A., *Parameters analysis influencing 3D measurement without contact by LASER scanner to make a compensation model*, Int. Seminar on Computer Aided Tolerancing, CIRP, 2005;
- [89] Contri A., *Qualité géométrique de la mesure de surfaces complexes par moyens optiques, Thèse de doctorat*, ENS de Cachan, 2002;
- [90] Kwan, H., L., Hyun-Pung P., *Automated inspection planning of free-form shape parts by LASER scanning*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 16, nr 4, pag. 201-210, 2000;
- [91] Woo T. C., *Visibility maps spherical algorithms*, Computer-Aided Design, vol. 26, nr. 1, pag. 6-16, 1994;

- [92] Cobliș Cătălin & Olteanu Ciprian, (2009), *LASER scanning for lens edging machines*, Annals of DAAAM for 2009 and Proceedings of the 20 th International Symposium , Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on Theory, Practice and Education, pag. 1275 – 1276;
- [93] Braun, B., Olteanu, C., Corneliu D., *Virtual metrological instrument for the dimensional control accuracy statistics*, Buletinul Institutului Politehnic din Iași, publicat de către Universitatea Tehnică “Gheorghe Asachi” din Iași, Tomul LIV (LVIII), Fasc. 3, secția Construcții de Mașini, 2008;
- [94] Cobliș Cătălin, (2011), *Măsurarea suprafețelor complexe. Lucrare de disertație*, Brașov
- [95] Roșca, I., *Metrologie generală*, Colecția “Universitaria”, Editura “Macarie”, Târgoviște, 1998;
- [96] Roșca, I., Iordache, P., Cristea, L., *Îndrumar de metrologie*, Editura Universității “Transilvania” din Brașov, 1996;
- [97] Franco P., Alistair B., F., *Data Modeling for Metrology and Testing*, in Measurement Science, Birkhauser, Boston. 2009;
- [98] Bleys P., Van Gestel N., Cuypers S., Kruth J.,P., *Uncertainty due to Limited Sampling of Circular Features on Coordinate Measuring Machines*, Proceedings of the 10th CIRP Computer Aided Tolerancing, 2007;
- [99] Cristea, L., Repanovici, A., Curtu, I., Cristea D., *The improvement of performances in automatic dimensional control, an important way to quality assurance in mechanical engineering*, 10th International Research / Expert Conference „Trends in the Development of Machinery and Associated Technology”, TMT, 2006;
- [100] Gestel N. V., Cuypers S., Bleys P., Kruth J-P, *A performance evaluation test for LASER line scanners on CMMs*, Optics and Lasers in Engineering, volumul 47, pag. 336 – 342, 2009;
- [101] Cobliș, C., *Măsurări cu LASER. Proiect de diplomă*, Brașov, 2008;
- [102] Nikon Metrology, *LC60DX / LC50CX digital CMM laser scanners*, link: http://www.nikonmetrology.com/products/cmm_scanners/lc60dx_laser_scanner, accesat în iunie 2010;
- [103] Lassila A., Kari M., Koivula H., Koivula U., Kortström J., Leinonen E., Manninen J., Manssila J., Mansten T., Meriläinen T., Muttilainen J., Nissilä J., Nyblom R., Riski K., Sarilo J., Isotalo H., *Design and performance of an advanced metrology building for MIKES*, Measurement, volumul 44, pag. 399–425, 2011;
- [104] Focus Inspection, *Users Manual*, 2008;
- [105] Huinh C., *How to improve the laser scanning of shiny surfaces which can give unwanted reflections*, CVMT 2010 Aalborg University: Department of Electronic System, Project Group: gr 1025, 2010;
- [106] Faro Measuring Arms, <http://measuring-arms.faro.com/distri/features/>, accesat în iunie 2011;
- [107] Gianfranco Genta, *Methods for uncertainty evaluation in measurement, statistical issues in metrology*, VDM Verlag Dr. Muller, Torino, 2010;
- [108] Cobliș C., Olteanu, C., Faluvegi, E., *Analysis of a turbine wheel inspection process*, Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics, volumul 39, pag. 181 -184, 2011;
- [109] Handy Scan, Catalogue, *Handy 3D Scanners*, link: <http://www.handyscan3d.com/Scan>, accesat în: octombrie 2008;

- [110] Crăciun, M., S., *Analiza structurilor morfo-funcționale pe eșantion de subiecți, cu implicații asupra presiunii plantare. Proiect de Diplomă*, conducător științific: Prof. dr. ing. Ileana Constanța ROȘCA, Universitatea TRANSILVANIA, Facultatea de Inginerie Mecanică, specializarea Mecatronică, Brașov, 2011;
- [111] Braun, B.; Serban, I.; Cotoros, D. - *The Plantar Orthosis Modeling and Simulating Assisted by Computer* - Proceedings of the 3rd International Conference on E-Health and Bioengineering - EHB Iași, 23th – 26th November 2011, ISBN: 978-606-544-078-4, pp. 183 – 186, 2011;
- [112] GoSCAN 3D™, *White-light portable scanner*, site: <https://www.creaform3d.com/pulp/goscan-3d-scanner/>, accesat în septembrie 2017;
- [113] Creaform, *When accuracy meets portability. Introducing Handyscan 3D laser scanners*, site: <https://www.creaform3d.com/pulp/goscan-3d-scanner/>, accesat în septembrie 2017;
- [114] Creaform, *The optical CMM 3D scanner for industrial applications*, site: <https://www.creaform3d.com/pulp/goscan-3d-scanner/>, accesat în septembrie 2017;
- [115] Range Vision, *Scan anything*, site: <http://www.rangevision.eu/profi-3d-scanner/>, accesat în septembrie 2017;
- [116] MicroGeo, *Kaarta - Mobile Scanning Solution*, site: <http://www.microgeo.it/en/prodotti-e-soluzioni/landing-kaarta-stencil.aspx>, accesat în septembrie 2017;
- [117] LIFA Surveyors, *3D Metrology on site*, link: http://website.lifa.dk/Flyer_LIFA_Laser_tracker_UK.pdf, accesat în septembrie 2017;
- [118] FENIXX, Technologies LLC, *CMM and 3D Scanning*, link: <http://www.fenixxtech.com/cmm.php>, accesat în septembrie 2017.

Cuprins:

Prefață	1
Capitolul 1 - Generalități privind măsurarea în coordonate cu ajutorul emisiei de radiație LASER	3
1.1 Generalități. Avantaje și dezavantaje ale măsurării cu sursă LASER.....	3
1.2 Principii fundamentale ale măsurării în coordonate, utilizând sistemele cu sursă LASER.....	3
1.3 Probleme întâlnite la scanarea prin utilizarea radiației LASER.....	5
1.4 Soluții de remediere a problemelor întâlnite la scanarea prin utilizarea radiației LASER.....	8
Capitolul 2 - Sisteme și echipamente pentru măsurarea pe principiul optic, fără contact, din componența MMCO	9
2.1 Tipologia MMCO cu sisteme de numerizare cu sursă LASER.....	9
2.2 Tipuri de sisteme de măsurare cu sursă LASER.....	10
2.3 Sisteme portabile pentru scanarea în coordonate a suprafețelor tridimensionale complexe.....	15
2.4 Companii producătoare de MMCO cu sisteme de numerizare cu sursă LASER... ..	25
2.4.1 Compania Nikon Metrology.....	25
2.4.2 Comapnia FARO.....	27
2.4.3 Compania KREON.....	28
2.4.4 Compania Perceptron.....	29
2.4.5 Compania Renishaw.....	31
2.4.6 Compania HEXAGON Metrology.....	33
2.4.7 Compania Artec 3D.....	37
2.4.8. Compania WENZEL.....	38
Capitolul 3 - Metode de măsurare pe principiul emisiei radiației LASER	42
3.1 Tehnica triangulației LASER.....	42
3.2 Tehnica Radar.....	45
3.3 Tehnica stereoviziunii.....	46
3.4 Tehnica Moiré.....	46
3.5 Tehnici de achiziție a imaginilor.....	46
3.5.1 Studiul datelor de intrare.....	46
3.5.2 Studiul ansamblului punctelor de vedere.....	47
3.5.3 Estimarea preciziei datelor 3D.....	50
3.5.4 Prezentarea optimă a ansamblului X de puncte de vedere.....	51
3.6 Tehnici moderne pentru optimizarea performanțelor sistemelor de scanare cu sursă LASER.....	51
3.6.1. Conceptul de vizibilitate	51
3.6.2. Identificarea punctelor de vedere potențiale în cadrul procesului de numerizare.....	53
3.6.3 Influența culorii suprafeței măsurate asupra preciziei scanării.....	54
3.6.4 Identificarea pozițiilor optime în funcție de precizia de măsurare.....	59
Capitolul 4 - Aplicații ale mașinilor de măsurat în coordonate cu sisteme de scanare cu sursă LASER	63
4.1 Aplicații ale sistelelor de scanare LASER, utilizate în cadrul mașinilor de măsurare fixe.....	63
4.1.1 Exemplu de reper de tip turbină supus procesului de numerizare cu sisteme LASER	63

4.1.2 Exemplu de reper de tip carcasă supus procesului de numerizare cu sisteme LASER	73
4.1.3. Concluzii privind utilizarea capetelor de scanare pe principiul LASER pe mașinile în coordonate fixe.....	77
4.2 Aplicații ale sistemelor de scanare LASER, utilizate în cadrul mașinilor de măsurare portabile.....	78
4.2.1 Descrierea caracteristicilor și a funcționării sistemelor de scanare portabile.....	78
4.2.2 Exemple de aplicații ale utilizării sistemelor portabile de scanare cu sursă LASER.....	80
Capitolul 5 - Tendințe privind utilizarea sistemelor și tehnicilor de scanare cu surse de emisie LASER.....	87
5.1 Tendințe privind sistemele moderne de scanare și aplicațiile acestora.....	87
5.2 Tendințe privind tehnologiile de scanare.....	93
Bibliografie.....	95