

2. EXEMPLE DE SISTEME MECATRONICE

Rolul acestui capitol

Capitolul al doilea este o continuare logică a problemelor prezentate în capitolul introductiv și un preambul al tuturor aspectelor care vor fi detaliate în capitolele următoare. Își propune să prezinte câteva dintre cele mai reprezentative sisteme mecatronice, cu argumente, pentru fiecare caz în parte, legate de includerea în marea familie a sistemelor mecatronice (integrare spațială și funcțională, flexibilitate, inteligență). Prezentarea nu își propune să intre în detalii, ci doar să scoată în evidență unele aspecte mai semnificative, legate de: sistemul mecanic și/sau optic, pe care se bazează întreaga funcționare a sistemului; componentele electrice și electronice (senzori, actuatori, circuite de putere), care servesc la achiziționarea de informații din proces și la comanda adecvată a unor mișcări ale elementelor sistemului mecanic/optic; sistemul de comandă centralizat/descentralizat, care asigură coordonarea întregului ansamblu și conferă gradul mai înalt sau mai scăzut de inteligență al sistemului mecatronic respectiv.

Se va sublinia, acolo unde este cazul, modul în care anumite funcțiuni mecanice sunt preluate de către electronică și software, simplificând foarte mult structura mecanică, modul în care construcțiile rigide, la care precizia este realizată prin toleranțe foarte strânse, pot fi înlocuite cu construcții elastice și ușoare, la care precizia este realizată prin măsurare și bucle de reacție, modul în care problemele de cablare, inerente unor sisteme cu atât de multe componente electrice și electronice, sunt rezolvate prin utilizarea unor magistrale și protocoale de comunicație adecvate (de exemplu, CAN Bus).

Unele din problemele principale evidențiate în acest capitol, vor fi apoi tratate, în detaliu, în următoarele capitole.

2.1 Automobilul

2.1.1 Automobilul modern ® sistem mecatronic: câteva argumente

Apărut în a doua jumătate a secolului al 19-lea, automobilul a revoluționat transporturile și a concentrat cele mai semnificative eforturi științifice și inginerești, pentru continua perfecționare a performanțelor sale. Până în jurul anilor 1970-1980 componentele mecanice, multe dintre ele adevărate „bijuterii” tehnice, reprezentau o pondere covârșitoare în ansamblul unui automobil, partea electrică și electronică rezumându-se la un număr restrâns de motoare (demaror, alternator, ștergătoare de parbriz), senzori (pentru temperatura uleiului și antigelului, presiunea uleiului, nivelul carburantului), relee (pentru semnalizare, aprindere) și becuri.

Dezvoltarea microelectronicii, materializată în circuite integrate logice și analogice, circuite integrate de putere, procesoare numerice (microprocesoare, microcontrollere, DSP-uri), realizarea unor sisteme de acționare, convenționale și neconvenționale,

performante, a unor tipuri noi de senzori etc., au deschis perspective largi pentru rezolvarea unor cerințe care se impuneau tot mai acut, legate de:

- § Siguranța în trafic;
- § Economicitate;
- § Fiabilitate;
- § Confort;
- § Protecția mediului.

În construcția automobilelor moderne și-au câștigat locul tot mai multe sisteme mecatronice (pentru managementul motorului, ABS, ESP, suspensie activă etc.), pentru ca, în final, întreg automobilul să se transforme într-unul dintre cele mai reprezentative sisteme mecatronice (prin interconectarea subsistemelor cu magistrale adecvate – de exemplu, CAN-Bus, sisteme de navigație, X-by Wire, telematică etc.).

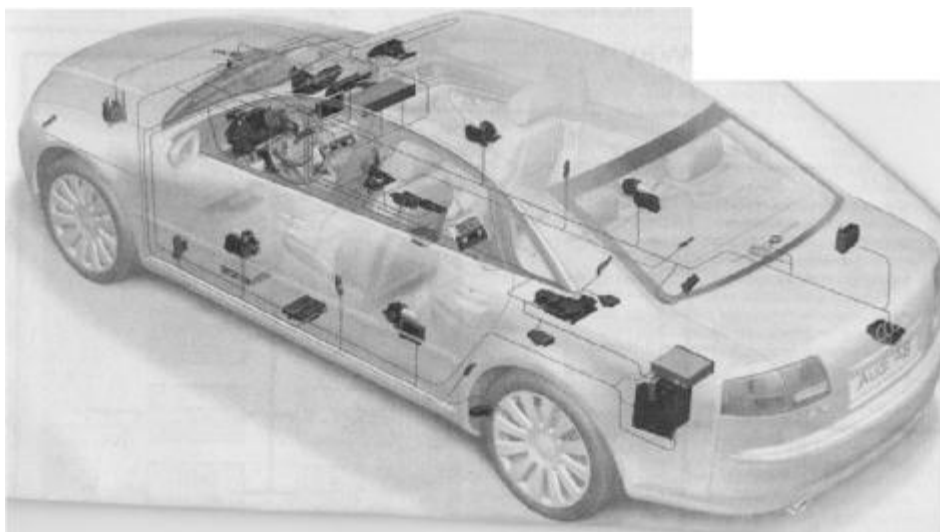


Fig. 2.1 Componente electrice și electronice într-un automobil

Un automobil modern, dintr-o clasă medie, cuprinde circa 60-70 de motoare și un număr asemănător de senzori și sisteme senzoriale (fig.2.1). Un exemplu elocvent îl constituie diferențele majore dintre „broșcuța” de mare succes a firmei Volkswagen, din anii 1960: 136 W – putere maximă consumată, 150 m de cabluri electrice și circa 80 de contacte electrice și urmașul acesteia din 2001, mașina „New Beetle”, cu un consum de 2050 W, 1500 m de cabluri și 1200 contacte electrice.

Creșterea ponderii componentelor electrice și electronice în construcția automobilului a facilitat introducerea unor sisteme noi, permițând creșterea performanțelor și simplificarea componentelor mecanice. Un exemplu este prezentat în figura 2.2, respectiv un ventil cu acționare electromagnetă (Electromagnetic Valve Train – EVT) – un rezonator resort/masă, care înlocuiește clasicul ax cu came destinat acționării ventilelor în sincronism cu mișcarea arborelui motor, și asigură sistemului de management al motorului posibilitatea comenzii libere a ventilelor, în funcție de

algoritmul de optimizare impus. Principalele efecte: îmbunătățirea raportului moment motor/turația motorului, reducerea cu până la 20% a consumului de carburant, reducerea volumului gazelor de eșapament.

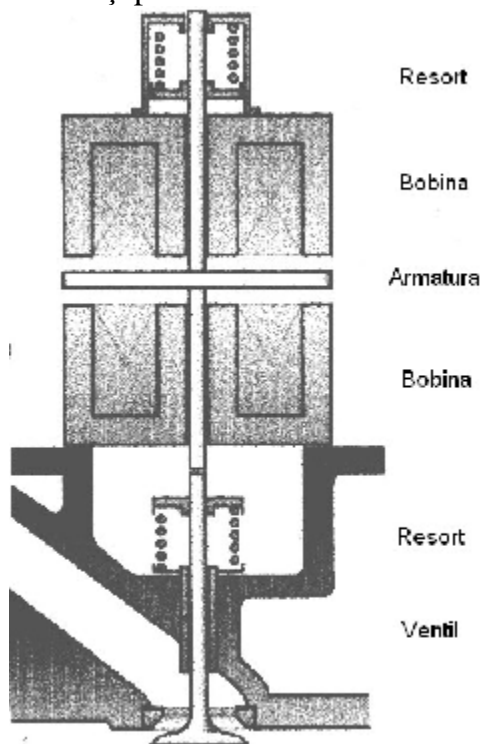


Fig.2.2 Ventil cu acționare electromagnetică

O altă tendință importantă în construcția autovehiculelor constă în îmbunătățirea permanentă a performanțelor sistemelor existente. În figura 2.3, este prezentat un sistem de injecție cu actuator piezoelectric. Utilizează tehnologia HDI (High Diesel

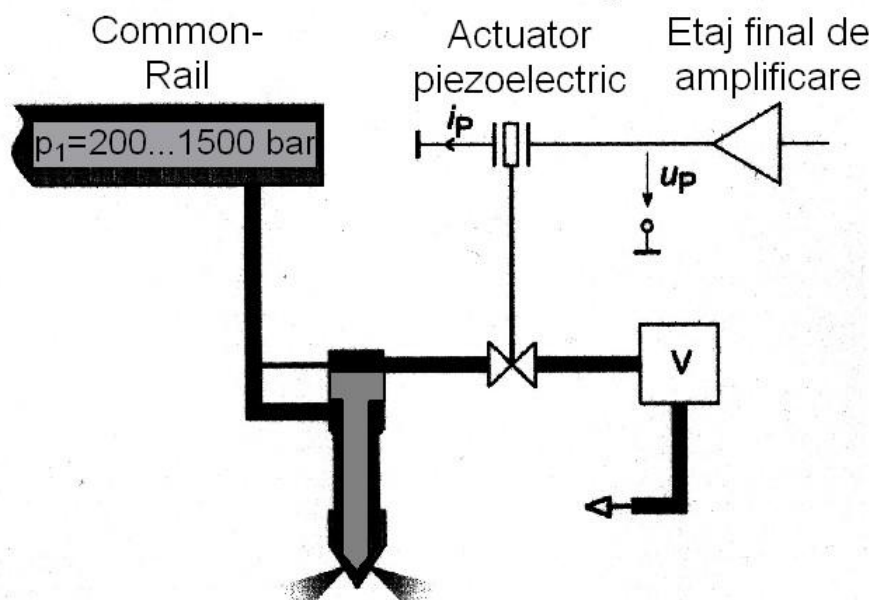


Fig.2.3 Sistem de injecție cu actuator piezoelectric

Injection), în care o pompă alimentează cu motorină o rampă comună, numită „common rail”, la presiuni de până la 1500 bari. Distribuția carburantului din această rampă se realizează cu actuatori piezoelectrice.

Actuatorii piezoelectrice sunt utilizați în multe produse mecatronice, datorită unor caracteristici remarcabile, cum ar fi forțe de acționare mari (de ordinul miilor de N), accelerații de ordinul a 2000g, rezoluții în domeniul nanometrilor etc. Vor fi tratați detaliat în capitolul 5.

Foarte multe eforturi ale proiectanților și constructorilor de vehicule sunt dirijate în scopul creșterii siguranței și confortului pasagerilor și implică subsisteme mecatronice sofisticate.

Sistemele de securitate pot fi active sau pasive și au câteva roluri foarte importante: evitarea eficientă a coliziunilor; minimizarea efectelor coliziunilor și evitarea traumatismelor, atât pentru pasagerii vehiculului, cât și pentru pietonii implicați în accident.

Sistemele de siguranță active servesc la prevenirea coliziunilor și la minimizarea efectelor acestora. Cele mai importante sunt [Continental]:

§ Sistemul electronic de frânare (Electronic Brake System), care include:

- ABS (Anti-locking Brake System) – are rolul de a controla presiunea de frânare, pentru evitarea blocării roților. Procesează informațiile de la senzorii care măsoară viteza roților și controlează motorul pompei hidraulice și valvele care distribuie fluidul la frâne.
- Brake Assist – interpretează informațiile de la senzorii specifici și corectează manevrele de frânare ale conducătorului auto.

§ Sistemul electronic de stabilitate (ESP – Electronic Stability Program), care evaluează în permanență datele măsurate de un mare număr de senzori și compară acțiunile șoferului cu comportarea vehiculului la momentul respectiv. Dacă intervine o situație de instabilitate, cum ar fi cea determinată de o virare bruscă, sistemul reacționează în fracțiuni de secundă, prin intermediul electronicii motorului și a sistemului electronic de frânare și ajută la stabilizarea vehiculului. Sistemul ESP include mai multe subsisteme complexe:

- ABS (Anti-locking Brake System);
- EBD (Electronic Force Brake Distribution);
- TCS (Traction Control System);
- AYC (Active Yaw Control).

§ Sistemul de prevenire a accidentelor, care poate include:

- Controlul adaptiv al coliziunilor (Adaptive Cruise Control - ACC), bazat pe senzori radar de distanțe mari. Începând cu anul 1999, firma Continental Automotive Systems [Continental] a introdus sistemele ACC în producția de serie, devenind primul furnizor global de astfel de sisteme. ACC reglează automat viteza vehiculului, în funcție situația mașinilor din trafic, pentru a asigura o distanță adecvată față de vehiculul din față. Sistemul radar utilizează principiul impulsuri Doppler pentru măsurarea independentă a vitezei și distanței.

- Distanță redusă de frânare (Reduced Stopping Distance), bazată pe un sistem de frânare automată în eventualitatea unei coliziuni;
- Avertizare de distanță (Distance Warning);
- Stop & Go, bazat pe un sistem radar în infraroșu, pentru distanțe mici, destinat asistenței pentru traficul urban sau pentru situațiile de pornire și oprire;
- Sprijin pentru urmărirea axului drumului (Line Keeping System), cu cameră CCD și intervenție activă asupra sistemului de direcție; implică un algoritm de procesare a imaginilor și în cazul devierii de la axul drumului, șoferul este avertizat printr-o ușoară mișcare a volanului, păstrând însă supremația în manevrarea acestuia;
- Controlul global al șasiului (Global Chassis Control);
- Reacție „haptică” de pericol la nivelul pedalei de accelerație (Haptic Danger Feedback) etc.

Sistemele senzoriale și de acționare care asigură managementul motorului, asistența la frânare și controlul stabilității, permit, prin extinderi adecvate, în special în domeniul software-ului, realizarea altor acțiuni, importante pentru siguranța și confortul conducătorului auto. De exemplu, momente foarte dificile apar, în special pentru șoferii mai puțin experimentați, în cazul pornirii pe pante înclinate, a opririlor/pornirilor la semafoare sau în parcări. Programul Hill Start Assist (HAS) este destinat asistenței în astfel de situații: după ce șoferul a eliberat frâna de mână, HAS întreține în sistemul de frânare o presiune care asigură menținerea fermă pe loc a mașinii. Pe parcursul pornirii (accelerării), HAS reduce presiunea de frânare, în corelație cu creșterea momentului motorului. Controlul presiunii de frânare se bazează pe: presiunea de frânare aplicată de șofer; informații privind motorul și transmisia; înclinarea pantei (măsurată de un senzor de accelerație longitudinal).

Din ce în ce mai complexe și sofisticate sunt sistemele de siguranță pasive, care au rolul de a proteja pasagerii și pietonii contra accidentelor suferite în urma coliziunilor. Ele includ o serie de sisteme de protecție: centuri de siguranță, sisteme de tensionare, mecanisme de blocare, airbag-uri frontale și laterale, protecție a capului și genunchilor, protecție contra răsturnării, precum și o serie de senzori și actuatori inteligenți: senzori pentru anticiparea coliziunilor (dectecția și clasificarea pietonilor, sesizarea condițiilor premergătoare impactului pentru acționarea adecvată a sistemelor de protecție), senzori pentru sesizarea și analiza impactului (direcție, intensitate, tip, posibilitatea răsturnării), senzori pentru detectarea și clasificarea pasagerilor, airbag-uri inteligente, a căror expandare depinde de forța și locul de impact, sisteme reversibile de pretensionare a centurilor de siguranță, sisteme pentru optimizarea poziției scaunelor și închiderea automată a ușilor și trapelor pentru minimizarea efectelor coliziunii, sisteme de protecție a pietonilor etc.

Pentru a ilustra modul în care mecatronica a revoluționat construcția automobilului, se va prezenta, ca un ultim exemplu, modulul de comandă a unei uși, care este atât de complex, încât necesită un microcontroller propriu (fig.2.4) [INFINEON].

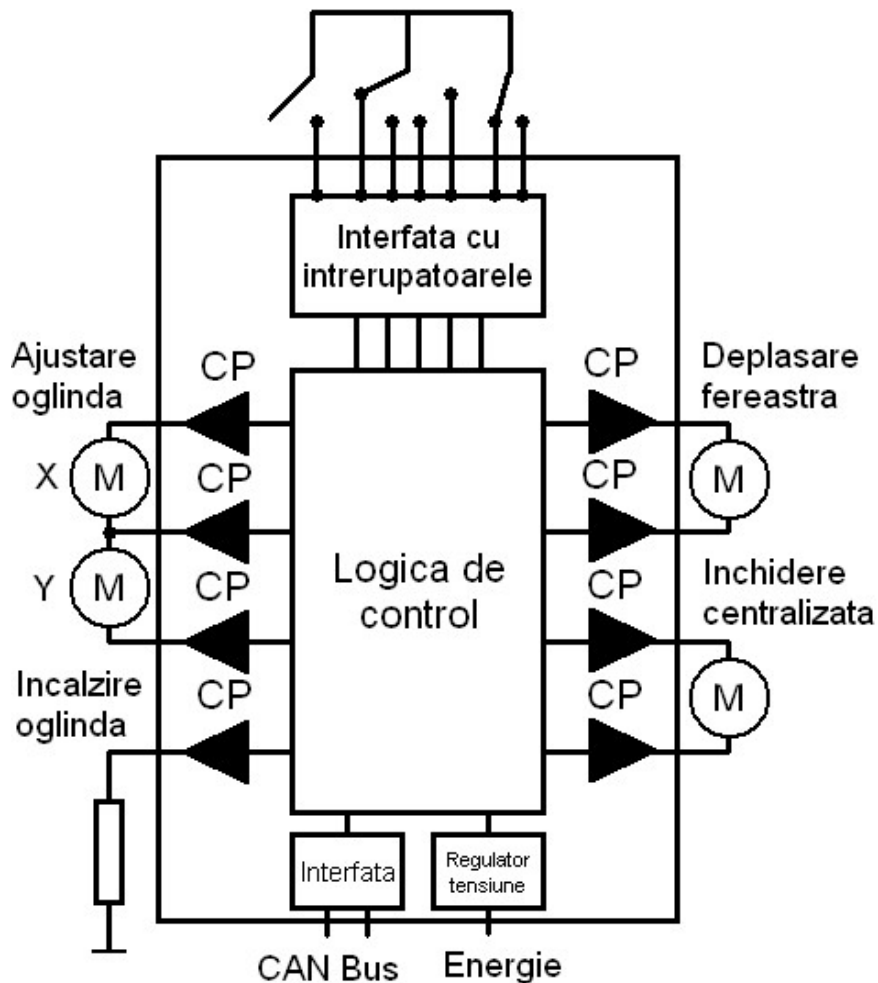


Fig.2.4 Modul de comandă a ușii din față (CP = circuite de putere)

În comanda ușii intervin 4 motoare: unul pentru închiderea/deschiderea ferestrei, unul pentru blocarea/deblocarea ușii în cadrul sistemului de blocare centralizată și alte două pentru poziționarea, după două direcții (x-y), a oglinzii retrovizoare. La acestea se adaugă un sistem pentru încălzirea oglinzii retrovizoare. Un număr de întrerupătoare permit conducătorului auto să efectueze manevrele dorite pentru acționarea celor patru motoare. Multe module de comandă a ușilor includ și senzori, care sesizează gradul de închidere/deschidere a ferestrelor, atingerea limitelor de sus/jos, apariția unor obstacole. Modulul de comandă cuprinde:

- § Interfața cu întrerupătoarele și senzorii;
- § Circuitele de comandă pentru motoare și rezistorul de încălzire a oglinzii: punți în H (complete) pentru fereastră și blocarea ușii și semipunți pentru poziționarea oglinzii, tranzistor de comandă a rezistorului de încălzire;
- § Circuite de comandă: microcontroller și interfață CAN-Bus;
- § Regulator de tensiune.

Implementarea pe scară largă a unor astfel de module, la milioane și milioane de vehicule, a impus proiectarea și producerea de circuite integrate specifice diferitelor funcții. În figura 2.5 este prezentată o schemă din documentația firmei INFINEON, în care fiecare funcție detaliată mai sus este realizată cu câte un circuit integrat dedicat. Comanda este asigurată de un microcontroller de 8 biți, C505, dotat cu interfață CAN. În schemă nu sunt detaliate semnalele de la microîntrerupătoare, dar semnalul de la un senzor de curent din circuitul de putere al motorului pentru închiderea/deschiderea ferestrei (linia A/D) poate fi utilizat pentru a sesiza eventuale obstacole în calea ferestrei sau limitele de închidere/deschidere, materializate prin creșterea curentului în înfășurarea motorului.

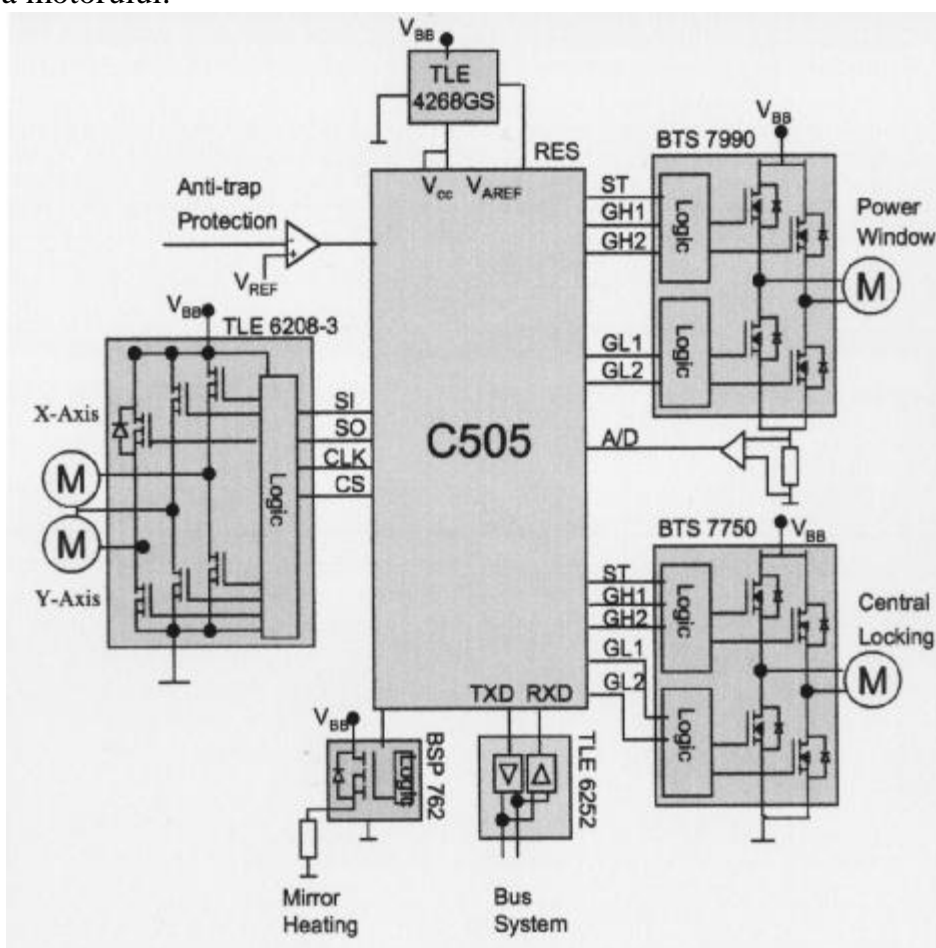


Fig. 2.5 Schemă de comandă a ușii, cu microcontroller C505 și circuite integrate

2.1.2 CAN BUS – exemplu de magistrală serială în automobil [DUM04a]

Dezvoltarea CAN a început odată cu implementarea unui număr tot mai mare de dispozitive electronice în autovehiculele moderne. Exemple de astfel de dispozitive sunt sistemele de management al motorului, suspensiile active, ABS, controlul cutiei de viteze, controlul farurilor, aerul condiționat, airbag-urile și închiderea centralizată (fig.2.6).

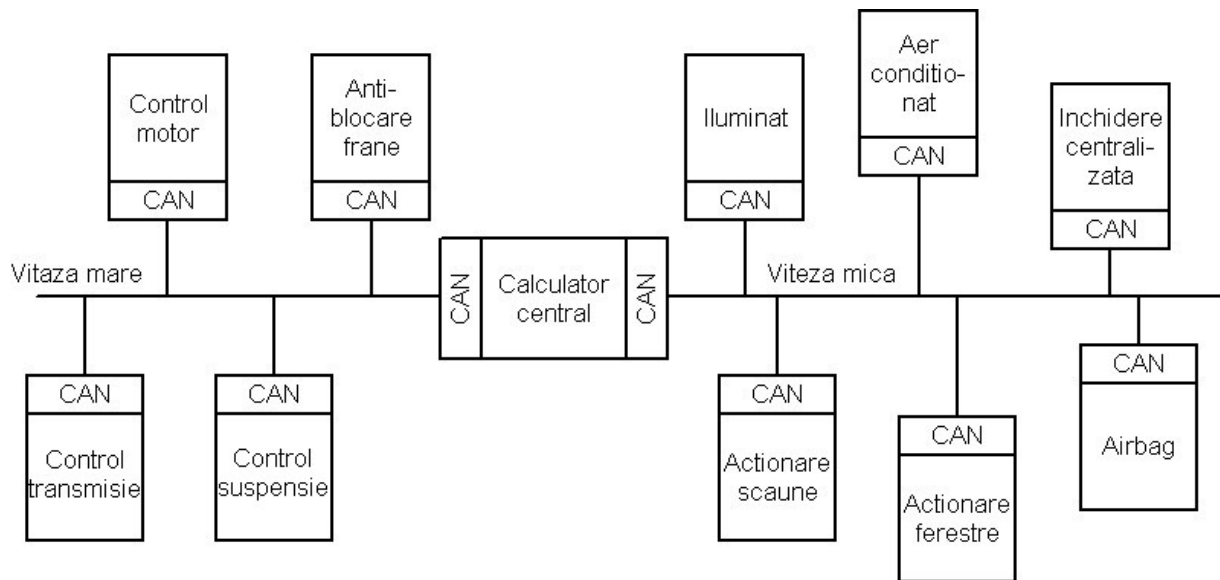


Fig.2.6 CAN Bus pentru conectarea subsistemelor în automobil

Controller Area Network (CAN) este un protocol de comunicație serial, care asigură controlul distribuit, în timp real, cu un mare grad de siguranță. A fost dezvoltat inițial de firma Robert Bosch GmbH, care deține și licența CAN, în ultima parte a anilor 1980.

Este standardizat pe plan internațional de International Standardization Organization (ISO) și de Society of Automotive Engineers (SAE).

- CAN de viteză mare are la bază standardul ISO 11898 (rate de transmisie de până la 1 Mbit);
- CAN de viteză mică (rate de transmisie < 125 Kbit) se bazează pe ISO 11519-2;
- Extensii în specificațiile 2A and 2B (datorită cerințelor producătorilor de hardware) → diferite lungimi ale identificatorilor (2A cu identificatori de 11 biți; 2B cu identificatori de 29 biți);
- Un alt standard este CiA DS-102: standardizează ratele de transmisie (baud-rates) și timpii impuși pentru transmiterea biților și stabilește conductorii, conectorii și liniile de putere.

CAN în autovehicule:

- SAE CAN clasa B (are la bază standardul ISO 11519-2), cu până la 32 de noduri, este implementat în spațiul interior al vehiculului și leagă componente ale șasiului și electronica destinată confortului – vezi ramura din dreapta în fig.2.6;
- SAE CAN clasa C (are la bază standardul ISO 11898), cu până la 30 de noduri, este implementat pentru conectarea și controlul motorului, a transmisiei, a frânării, suspensiei – vezi ramura stângă în 2.6.

CAN este protocolul cel mai utilizat în autovehicule și automatizări. Cele mai importante aplicații pentru CAN sunt automobilele, vehiculele utilitare și automatizările industriale. Alte aplicații ale CAN se regăsesc la trenuri, echipamente

medicale, automatizarea clădirilor, echipamente electrocasnice și automatizarea birourilor.

Concepte de bază

Structura liniilor CAN bus line și nivelele de tensiune care corespund celor două stări ale magistralei – dominant and recesiv, sunt prezentate în figura 2.7.

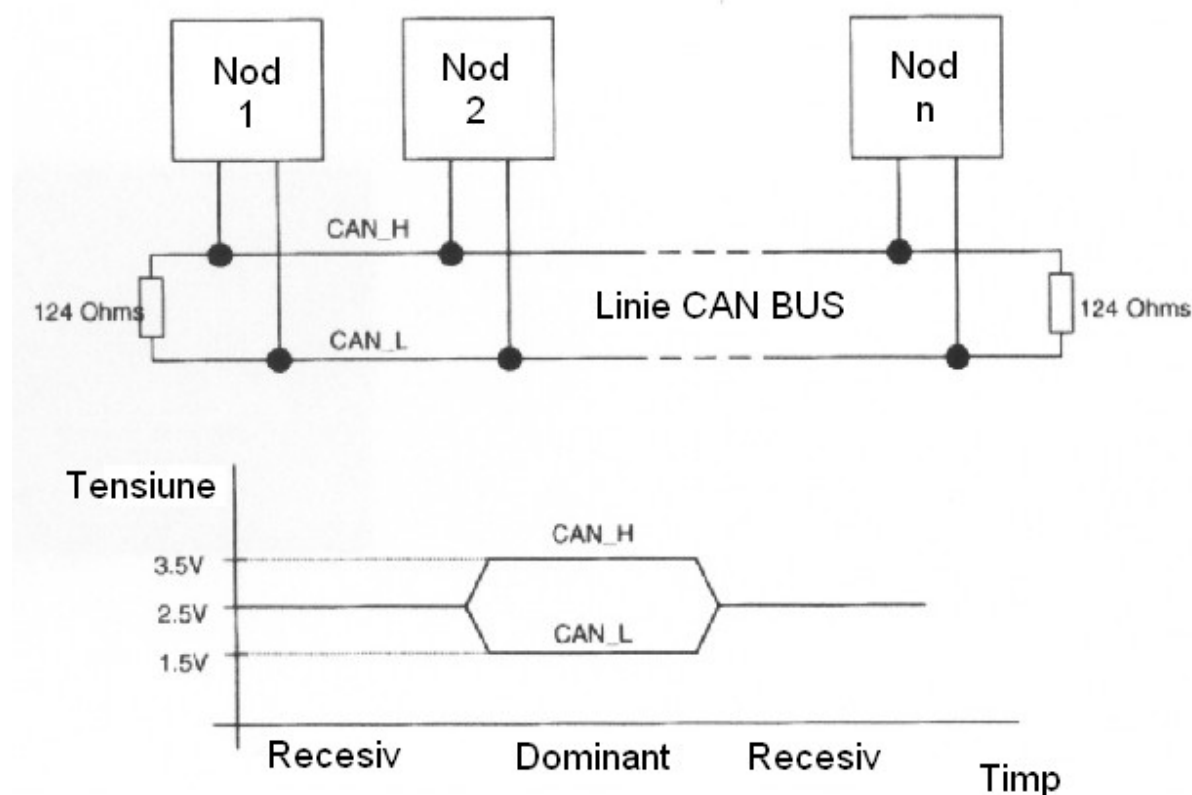


Fig.2.7 Liniile și nivelele de tensiune ale CAN Bus (ISO 11898)

Proprietăți ale CAN

Iată câteva dintre cele mai remarcabile proprietăți ale CAN:

- **Priorizarea mesajelor: Identificatorul (identifier)** definește o prioritate statică a mesajului în timpul accesului la magistrală. Atunci când magistrala este liberă, oricare unitate poate demara începerea unei transmiterii unui mesaj. Dacă încep să transmită simultan două sau mai multe unități, conflictul de acces pe magistrală este rezolvat prin arbitrarea bit cu bit, utilizând identificatorul. Mecanismul arbitrării garantează că nu se pierde nici timp nici vreo informație. Pe parcursul arbitrării fiecare transmițător compară nivelul bitului transmis cu nivelul existent pe magistrală. Dacă nivelele sunt egale, unitatea continuă să transmită. Dacă ea transmite un nivel “recesiv” și magistrala monitorizează un nivel “dominant”, unitatea pierde arbitrarea și trebuie să se retragă, fără a mai transmite un singur bit. Acest sistem de arbitrare, conceput special pentru autovehicule, permite rezolvarea

unor evenimente de importanță mai mare în funcționarea mașinii, care necesită o decizie mai rapidă, prioritar față de evenimente pentru care deciziile mai pot întârzia.

- *Multimaster*: Magistrala nu presupune o ierarhizare a nodurilor; când magistrala este liberă, oricare unitate poate începe transmiterea unui mesaj. Unitatea cu mesajul cel mai prioritar va câștiga accesul la magistrală.
- *Siguranță*: Pentru a realiza cea mai mare siguranță în transferul datelor, în fiecare nod al magistralei CAN sunt implementate mijloace puternice pentru detectarea erorilor, semnalizarea acestora și auto-verificare.
- *Conexiuni*: Legătura serială de comunicație CAN este o magistrală la care pot fi conectate un anumit număr de unități. Acest număr nu are o limită teoretică, limita practică fiind determinată de timpii de întârziere și/sau consumul de putere pe magistrală. Nodurile magistralei nu au adrese specifice, adresa informației fiind conținută în identificatorul mesajului transmis și în prioritatea acestuia. Numărul nodurilor poate fi modificat dinamic, fără ca acest lucru să perturbe comunicația dintre celelalte noduri.
- *Rata de transmisie*: Viteza CAN poate fi diferită în diferite sisteme, dar pentru un anumit sistem rata de transmisie este fixată și constantă.

Soluții pentru conectarea unui nod la CAN Bus

Un nod CAN utilizat pentru controlul unei anumite aplicații constă din diferite circuite (fig. 2.8).

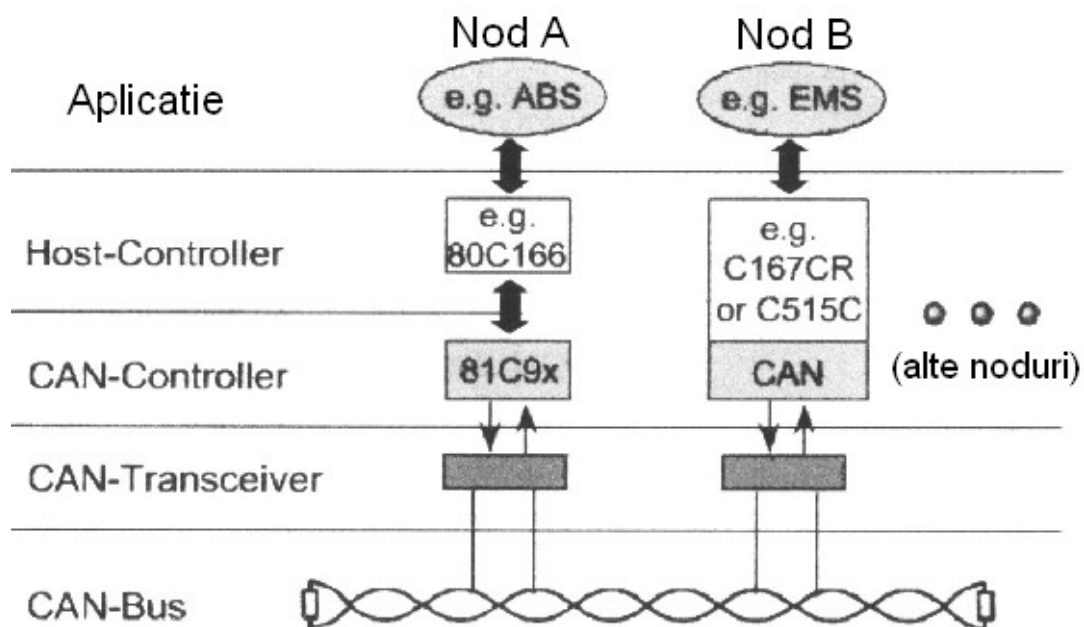


Fig.2.8 Exemple de implementare a CAN [Siemens]

2.2 Roboți industriali

Se vor prezenta câteva dintre cele mai importante probleme legate de utilizarea roboților industriali, a căror implementare a fost inaugurată de robotul UNIMATE în 1961 (vezi capitolul 1). Evoluția roboților industriali poate fi încadrată, cu relativitatea pe care o presupune o astfel de clasificare, în trei generații, care însă, spre deosebire de lumea calculatoarelor electronice, nu au presupus eliminarea reprezentanților mai puțin performanți, ci și-au găsit, fiecare, locul potrivit în automatizarea proceselor industriale. *Generația întâia* este reprezentată de roboți cu o structură mecanică mai simplă, care le permite mai ales operații de manipulare „Point-To-Point - PTP” - punct cu punct, fără sisteme senzoriale externe și, în consecință fără posibilități de adaptare la condiții variabile ale mediului în care funcționează. Sunt superioare *manipulatoarelor* prin faptul că mișcările din diferitele cuple pot fi programate și reproduse rapid și flexibil, fără intervenții mecanice, dar au foarte puține valențe, care să le permită includerea în familia sistemelor mecatronice. *Roboții din generația doua* au sisteme mecanice mai performante, care le permit performanțe cinematice și dinamice superioare, fiind capabili să execute și operații de tip „Continuous Path - CP”, care presupun deplasarea efectorului final de-a lungul unor traiectorii continue, cu precizii mari. Posedă interfețele necesare și instrucțiunile pentru achiziția informației de la senzori externi complecși (senzori vizuali, senzori de forță/moment, senzori tactili etc.) și integrarea acestei informații în programele de lucru, fapt care le conferă o adaptabilitate limitată la mediu. Acești roboți posedă multe dintre caracteristicile sistemelor mecatronice. Roboții din primele două generații lucrează pe baza unui program memorat, ale cărui instrucțiuni detaliază fiecare mișcare și acțiune. De exemplu, inserarea unui arbore într-un alezaj presupune un program, care detaliază toate mișcările necesare preluării arborelui, apropierii lui de alezaj, măsurării forțelor de interacțiune și efectuării, în consecință, a mișcărilor de corecție pentru o asamblare reușită. Roboții din generația treia își desfășoară activitatea pe baza unui scop, de genul „montează ansamblul A”. Baza lor de cunoștințe și motorul de raționament (inferență), cu care este dotat sistemul de comandă, le permite să decidă singure succesiunea operațiilor necesare pentru realizarea scopului impus. Sunt mașini dotate cu sisteme senzoriale complexe, cu inteligență artificială, încadrându-se în totalitate în caracteristicile enunțate pentru sistemele mecatronice.

Sunt câteva definiții ale roboților industriali consacrate pe plan mondial (definiția după norma europeană EN775, definiția conform standardului german VDI 2860, definiția JIRA – Japan Industrial Robot Association etc.). Nu se va apela, textual, la una dintre aceste definiții, ci se va exprima, în sinteză, următoarea frază definitoare: *un robot industrial, este un automat cu posibilități universale de implementare, cu un mecanism cu mai multe cuple (grade de mobilitate), ale căror succesiuni de mișcări și curse pot fi programate liber (fără intervenții mecanice); acest mecanism servește la poziționarea și orientarea efectorului final, în vederea efectuării operațiilor de lucru impuse.*

Noțiunea de efector final (end-effector) desemnează o paletă foarte largă de sisteme de prindere (prehensor \cong gripper \cong Greifer), unelte sau alte dispozitive, în funcție de operațiile pe care le execută un robot:

§ *Manipulări de piese pentru:* deservirea unor mașini de lucru, grupate în celule flexibile; depunerea/extragerea pieselor din magazii; depunerea/preluarea pieselor de pe benzi transportoare; paletizarea/depaletizarea unor cutii și repere; manevrarea de piese în dreptul unor pietre abrazive pentru polizarea/șlefuirea lor etc. O operație interesantă și eficientă de manipulare constă în poziționarea și susținerea de piese, în vederea îmbinării lor prin sudură de către alți roboți. Efectoarele finale sunt sisteme de prindere de diferite tipuri și complexități. Ponderea cea mai mare revine mâinilor mecanice, constituite din două bacuri, acționate pneumatic, care, prin închidere prind piesa (instrucțiunea „grasp” sau „close”), iar prin deschidere o eliberează (instrucțiunea „open”). În situațiile în care trebuie controlată forța de prindere, bacurile sunt acționate cu motoare electrice și sunt dotate cu senzori de forță. În situații rare și speciale pot fi utilizate mâini cu mai mult de două degete, formate din mai multe segmente (vezi subcapitolul 2.3.2). Pentru manipularea unor piese cu suprafața netedă (plăci de sticlă, lemn, furnir, metal, tuburi cinescop, repere din sticlă etc.) sunt utilizate sisteme de prindere cu ventuze, bazate pe diferite principii de generare a unei depresiuni.

§ *Sudură.* Foarte mulți roboți industriali sunt utilizați pentru operații automate de sudură, în principal în industria automobilului. Efectoarele finale utilizate depind de tipul sudurii: clești pentru sudura în puncte; dispozitive cu electrozi de sudură sau cu flacără oxiacetilenică pentru sudura continuă. Sudura în puncte reprezintă un exemplu de traiectorie de tip PTP (punct-cu-punct), care impune poziționarea efectorului final în diferite puncte din spațiul de lucru, dar lasă programului de interpolare al robotului sarcina determinării traiectoriei dintre puncte, în baza unor criterii de optimizare și de ocolire a obstacolelor. Sudura continuă este un exemplu de traiectorie CP (Continuous Path = traiectorie continuă), în care robotul trebuie să deplaseze efectorul final de-a lungul unei traiectorii definite printr-o succesiune continuă de puncte, memorate, determinate pe baza unor calcule, sau sesizate cu ajutorul unor sisteme senzoriale externe. În figura 2.9 este prezentat un sistem de urmărire a rostului la roboții de sudură [DUM96a], care întrunește toate elementele unui sistem mecatronic. Baleierea secțiunii urmărite se realizează cu ajutorul unei oglinzi basculate de un motor. Unghiul de basculare este măsurat cu un senzor de poziție și poate fi variat în limite foarte largi, la fel ca și frecvența de baleiere. Pentru o aplicație normală de sudură robotizată unghiul de baleiere este de 40° , frecvența de 10 baleieri/sec, fiecare profil fiind reconstituit prin 200 de distanțe măsurate într-un domeniu cuprins între $80\div 140$ mm față de axa de baleiere, cu o rezoluție de 0,3 mm. Prelucrarea informațiilor presupune citirea, la fiecare 400 ms, a senzorului CCD, comprimarea datelor, reconstituirea profilului și comanda acțiunilor corespunzătoare, legate de corecția traiectoriei și de adaptarea parametrilor procesului de sudură.

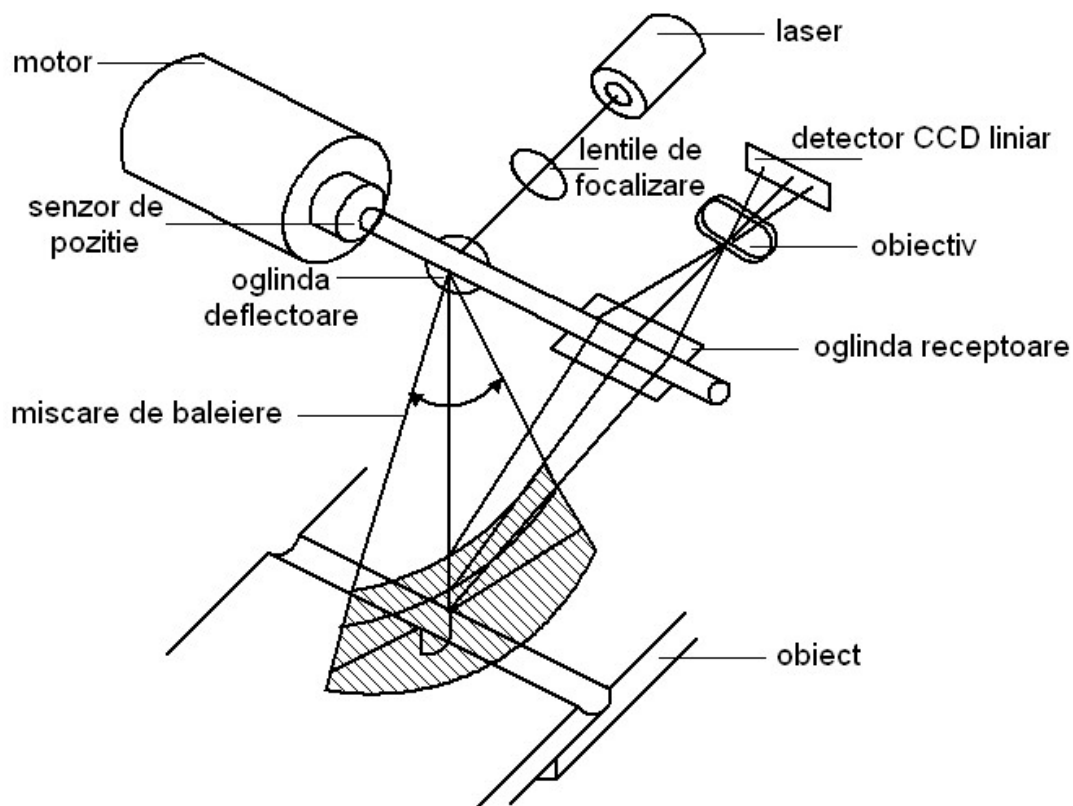


Fig.2.9 Sistem senzorial pentru urmărirea rostului la roboții de sudură

- § *Tăierea* este operația opusă sudurii; poate fi realizată și cu un dispozitiv cu flacără oxiacetilenică, cu parametri de lucru diferiți de cei de la sudură, dar soluțiile de tăiere cele mai des folosite presupun utilizarea unor dispozitive cu fascicul laser sau cu jet de apă la presiuni foarte mare (cîteva mii de bari).
- § *Aplicarea unui strat de material adeziv/material de etanșare*, în vederea lipirii unor repere (piese de tablă la portierele automobilelor, geamuri de parbriz/lunetă) sau a etanșării unor zone ale unor repere. Efectorul final este, în aceste cazuri, un dispozitiv care include un rezervor cu materialul care trebuie aplicat și un sistem de duze/ventile pentru distribuirea acestuia;
- § *Vopsirea* presupune pulverizarea unui jet de vopsea de-a lungul suprafeței care trebuie acoperită. Efectorul final este un dispozitiv de pulverizare a vopselei. Roboții de vopsire impun cerințe deosebite: protecție anticorozivă, protecție antiexplozivă și sunt proiectați și construiți exclusiv în acest scop, fără a avea caracteristica de universalitate.
- § *Prelucrări tehnologice ale unor repere: frezare, debavurare, șlefuire, gravare etc.* Au ca efect final dispozitivul tehnologic (freză, piatră abrazivă, electrod pentru electro-eroziune etc.), care realizează prelucrarea.
- § *Montajul automat* presupune asamblarea unor repere de către robot. Efectorul final este, în general, un sistem de prindere, completat, însă, de o unitate specializată pentru montajul automat [DUM86]: fie pasivă – cu o structură elastică ale cărei deformații, determinate de forțele de interacțiune dintre reperele implicate în operația de asamblare („complanța” structurii elastice), asigură corecțiile pozițiilor

și orientărilor pieselor, fie activă – cu un senzor de forță/moment, care măsoară forțele de interacțiune, pe baza cărora sistemul de comandă determină și asigură mișcările fine de corecție.

§ *Controlul automat*, presupune, ca efector final, un palpator (inductiv, capacitiv, pneumatic etc.), care palpează un reper în diferite puncte, în vederea determinării unor coordonate, care asigură controlul dimensional. Roboții pentru control impun precizii de poziționare în domeniul micrometrilor, și implicit, construcții speciale, cu ghidaje, lagăre și mecanisme de mare precizie. Sunt, în general, roboți specializați, fără a exclude, însă, posibilitatea utilizării unor roboți universali în anumite operații de control.

2.3 Roboți mobili

2.3.1 Considerații; variante; aplicații

Roboții mobili reprezintă, probabil, cea mai spectaculoasă și reprezentativă categorie de sisteme mecatronice, mai ales datorită încercării de a copia și de a se apropia de modele din lumea vie. În multe universități în care se studiază mecatronica, testul de maturitate al unui student este dat de proiectarea și construcția unui robot mobil, de un anumit tip, cu o structură mecanică mai mult sau mai puțin complexă, cu motoare de acționare care asigură deplasarea în mediul înconjurător, cu senzori care îi permit orientarea, identificarea și evitarea obstacolelor și cu un „creier”, constituit dintr-unul sau mai multe procesoare numerice, care asigură comanda întregului sistem. Supremația între universități, dar și între firme, este disputată în cadrul unor concursuri de roboți mobili. Există o paletă foarte largă de concursuri:

- § Lupte între roboți „războinici”, cum sunt prezentate pe „Discovery”, în care scopul este eliminarea adversarului de pe ringul de joc;
- § Competiții internaționale între roboții casnici și de curățenie;
- § Competiții sportive cu roboți mobili etc.

Federația RoboCup organizează campionate mondiale anuale de fotbal (soccer). în diferite ligi:

- § Simulation league;
- § Small sized league;
- § Middle size league;
- § Legged league;
- § Humanoid league.

Campionatele se desfășoară începând cu ediția din 1997 de la Nagoya, urmată de 1998 Paris, simultan cu Cupa Mondială; 1999 Stockholm, simultan cu Conferința Internațională de Inteligență Artificială, 2000 Melbourne; 2001 Seattle; 2002 Fukuoka; 2003 Padova.

Complexitatea jocului și regulile de joc diferă de la ligă la ligă. În cadrul „Small Size League” (roboți de dimensiuni mici), principalele elemente care caracterizează jocul sunt (fig.2.10):

- § Teren de dimensiunile unei mese de tenis de masă;
- § Câte cinci roboți mici, de circa 15cm diametru;
- § Timp de joc: 2 x 10 minute, cu o pauză de 20 de minute pentru intervenții tehnice.

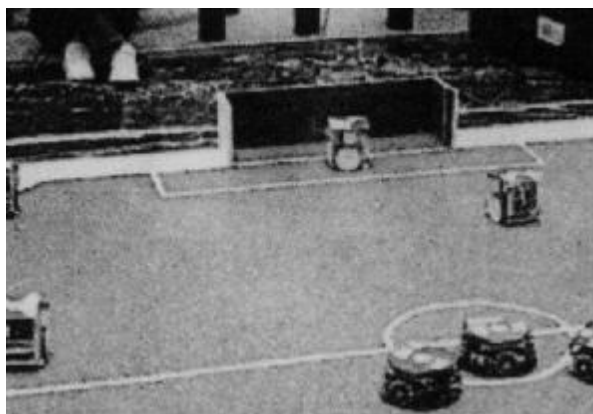


Fig.2.10 Roboți din „Small Size League” pe terenul de joc

Sunt roboți pe roți, care nu au sisteme proprii de orientare în teren, coordonarea lor fiind realizată de un calculator extern, în baza imaginilor recepționate de la o cameră video, plasată deasupra câmpului de joc.

Mult mai spectaculoasă este „Middle Size League”, care impune următoarele reguli:

- § Teren cu dimensiuni de 10 x 5 m;
- § Maxim 5 roboți cu diametrul de 50 cm /echipă;
- § Cod al culorilor cu: minge portocalie; porți în culorile galben și albastru deschis; roboți negri, cu pălării roșii și albastre; teren verde cu marcaje albe.

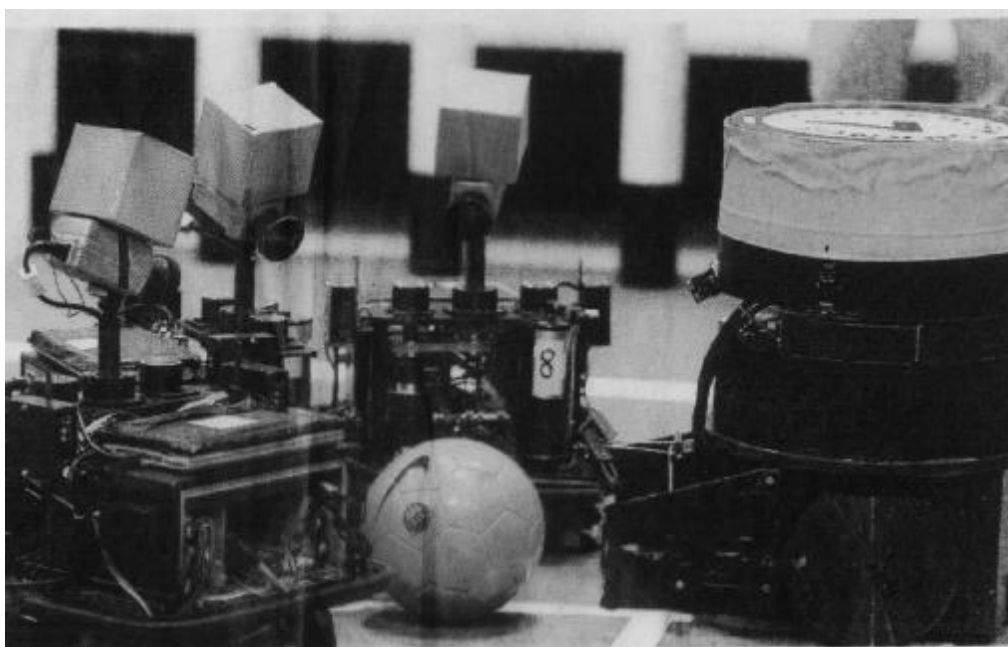


Fig.2.11 Roboți din categoria „Medium Size League”

Fiecare robot este echipat cu o cameră video (fig. 2.11), care îi permite să interpreteze scena de joc și să întreprindă acțiuni pe cont propriu. Acești roboți trebuie să fie capabili să rezolve probleme complexe cu interferențe largi în domeniul inteligenței artificiale, cum ar fi:

- § Percepția lumii reale, pentru a lovi mingea și a identifica jucătorii;
- § Comunicația și sinteza informațiilor obținute de la parteneri, pentru a crea un model dinamic al lumii;
- § Comportare reactivă pentru a realiza acțiunile de bază ale jocului;
- § Dezvoltarea unei strategii pentru a decide care acțiune este optimă într-un anumit moment.

În Leged League jocul se desfășoară, pe un teren puțin mai mare decât cel de la Small-Size League, între echipe de câte patru roboți AIBO ai firmei Sony, roboții mobili patrupezi, cu înfățișare de câine, foarte apreciați și vânduți ca jucării. Întrucât fiecare echipă utilizează aceeași roboți, diferențierile între echipe, pe parcursul jocului, sunt determinate de software-ul folosit.

Liga roboților umanoizi – Humanoid League utilizează roboți pășitori, de tip umanoid, care lovesc balonul în mod asemănător cu jucătorii de fotbal (fig.2.12). Specialiștii optimiști apreciază că, în jurul anilor 2050, o echipă de roboți umanoizi va înfrunta, de la egal la egal, o echipă formată din cei mai buni jucători pământeni.



Fig.2.12 Jucători din liga roboților umanoizi

Începând cu anul 2000, cu ediția de la Amsterdam, se organizează și campionatul european RoboCup. Există, de asemenea și un campionat RoboCup Jr., destinat cu prioritate studenților.

Există multe alte competiții între roboți tereștri (International Ground Robotics Vehicle Competition), zburători (International Unmanned Aerial Vehicle Competition) etc., dar câteva amănunte merită o competiție între roboți, a căror utilitate în viața de zi cu zi este mult mai palpabilă, respectiv roboții casnici și de curățenie. Campionatele mondiale între astfel de tipuri de roboți au fost inaugurate între 1-3 octombrie 2002, la Lausanne, incluzând două concursuri, care au presupus:

- § Curățirea covoarelor – sarcina impusă roboților fiind de a curăța în 10 minute o suprafață cât mai mare dintr-o camera obișnuită, fără să se ciocnească de obiecte;

§ Spălarea geamurilor – scopul fiind spălarea unei suprafețe cât mai mare într-un timp impus.

Cele câteva detalii despre competițiile între roboți au reușit, poate, să formeze o imagine asupra mării diversității de variante și tipuri de roboți mobili și a amplei palete de utilizări. Există:

§ *în funcție de dimensiuni:* macro-, micro- și nano-roboți.

§ *în funcție de mediul în care acționează:* roboți terești – se deplasează pe sol, roboți subacvatici – în apă, roboți zburători – în aer, roboți extraterestri – pe solul altor planete sau în spațiul cosmic;

§ *în funcție de sistemul care le permite deplasarea* în mediul în care acționează, există, de exemplu, pentru deplasarea pe sol:

- roboți pe roți sau șenile;
- roboți pășitori: bipezi, patrupezi, hexapozi, miriapozi;
- roboți cățărători;
- roboți târători: care imită mișcarea unui șarpe, care imită mișcarea unei râme etc;
- roboți săritori, care imită deplasarea broaștelor, cangurilor etc.;
- roboți de formă sferică (se deplasează prin rostogolire) etc.

Utilizările pentru care au fost, sunt și vor fi concepuți roboții mobili sunt dintre cele mai diverse și nu pot fi epuizate într-un spațiu atât de restrâns. Mulți roboți din zona micro își găsesc utilizarea în medicină, fiind capabili să se deplaseze de-a lungul vaselor și tuburilor corpului omenesc, în scopul investigațiilor, intervențiilor chirurgicale, dozării și distribuirii de medicamente etc. La fel de spectaculoase sunt și multe utilizări ale macro-roboților:

§ *În domeniul industrial, agricol, forestier:* în domeniul industrial roboții mobili sunt reprezentați de AGV-uri (Automated-Guided Vehicles), vehicule pe roți, cu ghidare automată, care transportă și manipulează piese, constituind o alternativă flexibilă la benzile de montaj; în agricultură există tractoare și mașini agricole fără pilot, capabile să execute singure lucrările pe suprafețele pentru care au fost programate; în domeniul forestier roboții mobili pot escalada copacii înalți pentru asanarea lor de crengile uscate etc.;

§ *În domeniul militar:* este luată în considerare de către armata americană perspectiva înlocuirii soldaților combatanți cu roboți, pentru a reduce riscul pierderilor umane în luptă; roboți mobili de cele mai ingenioase și robuste configurații sunt aruncați în clădiri și incinte din zone de conflict, în scopuri de investigare și chiar anihilare a inamicului;

§ *În domeniul utilităților publice:* una dintre cele mai utile și economice utilizări ale roboților mobili o reprezintă inspectarea conductelor de combustibili gazoși și lichizi și a canalelor de canalizare. De exemplu, rețeaua de canalizare a Germaniei însumează 400.000 km, iar inspectarea și curățirea acesteia este presupune costuri de 3÷6 Euro pe metru. Numai 20% din conducte sunt accesibile, iar utilizarea roboților poate reduce costurile cu un sfert. Problemele pe care le au de rezolvat

astfel de roboți sunt complexe, într-un mediu parțial necunoscut, modificat permanent prin sedimentare, surpare, coroziune, racorduri ilegale;

§ *În domeniul distractiv și recreativ:* sunt roboții-jucării, roboții pentru competiții etc.;

§ *În domeniul serviciilor:* Există posibilități deosebit de largi de implementare. Sunt roboți pentru: deservirea bolnavilor în spitale; ajutorarea persoanelor bătrâne sau cu diferite handicapuri; ghidarea și informarea publicului în muzee; aspirarea și curățirea încăperilor; spălarea geamurilor și a pereților clădirilor; executarea de activități casnice.

§ *În domeniul securității:* Multe operații de inspectare și dezamorsare a unor obiecte și bagaje suspecte sunt executate de roboți;

§ *În domeniul operațiilor de salvare:* Roboții salvatori (Rescue robots) sunt utilizați în operațiile de salvare a victimelor unor calamități: cutremure, incendii, inundații.

2.3.2 Roboții umanoizi: problematică; perspective

Din vasta tematică a roboților mobili se vor expune succint câteva aspecte din domeniul roboților umanoizi și al roboților LEGO, menite să scoată în evidență principalele probleme pe care le ridică construcția și funcționarea acestor sisteme și pe care specialistul în mecatronică trebuie să le stăpânească și să le rezolve. Considerațiile privind roboții umanoizi sunt preluate dintr-un studiu foarte interesant, de previzionare a dezvoltării în viitor a acestor roboți, finanțat de Comisia Europeană [REG03]. Autorii împart principalele componente tehnice studiate în șase grupe (fig. 2.13).

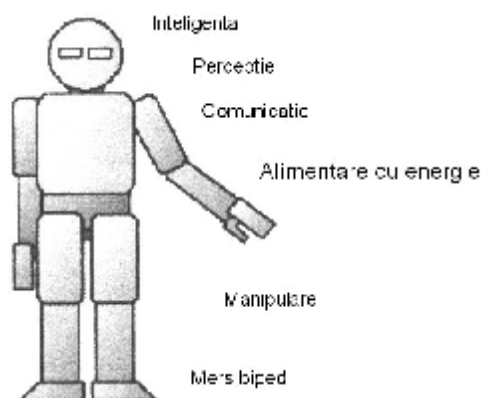


Fig.2.13 Principalele componente tehnice ale unui robot umanoid

Dintre cele șase componente se vor detalia două, care reprezintă domenii deosebit de interesante de studiu și inovație pentru mecatroniști: mersul biped și manipularea. Detalii despre celelalte componente pot fi regăsite în [DUM06].

2.3.2.1 Mersul biped

Chiar dacă un robot pe roți este mai rapid, mai ieftin și mai puțin complex decât un robot pășitor, abilitatea mersului biped, în poziție dreaptă, este considerată ca o condiție esențială pentru ca el să fie tratat, mai degrabă ca partener, decât ca mașină, în relațiile cu oamenii cu care cooperează. Pentru impactul emoțional al robotului, acest

tip de mers este un mare avantaj, spre deosebire, de exemplu, de cel asemănător unui păianjen, care poate genera multor oameni frică și dezgust. Alte avantaje ale mersului biped constau în mobilitatea mai mare pe terenuri accidentate, facilitatea de a se deplasa în medii construite pentru oameni, punctul înalt al sistemului de vedere, posibilitatea utilizării picioarelor și în alte scopuri decât pentru deplasare și facilitarea utilizării membrelor anterioare pentru operații de manipulare. Astfel roboții umanoizi pot lovi o minge, pot acționa pedalele unui vehicul, pot urmări podeaua, utilizând picioarele, sau pot deschide uși, pot manevra obiecte de pe rafturi, pot acționa butoane și comutatoare cu mâna. În ceea ce privește viteza, mobilitatea, stabilitatea sau complexitatea, mersul cu patru sau mai multe picioare este mult mai eficient. Animale cu picioare mai mici și mai puțin puternice pot alerga mult mai rapid ca omul, utilizând patru picioare, iar insectele, care utilizează principii de deplasare foarte simple, se pot mișca extrem de eficient, utilizând multe picioare și un centru de greutate plasat foarte jos. Mersul biped de tip uman are dezavantajul unui centru de greutate înalt cu o suprafață mică de contact cu solul, rezultând un poligon mic de echilibru al corpului, cu consecința pericolului permanent de pierdere a echilibrului, lucru evident, de exemplu, la copii mici care învață să meargă.

Ciclul de control pentru mișcările picioarelor unui robot biped este sintetizat în figura 2.14. Pornește de la informațiile primite de la senzori (senzorii interni măsoară poziția și orientarea tuturor elementelor robotului, iar senzorii externi furnizează informații despre forma și structura mediului și terenului înconjurător), care sunt utilizate de algoritmul de control pentru generarea noilor tipare de mers, executate de actuatorii robotului.

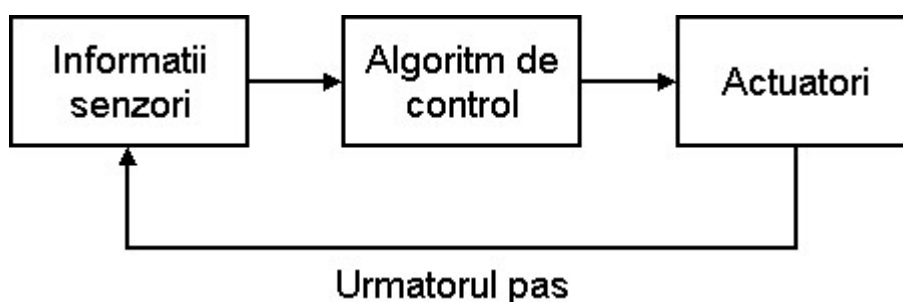


Fig.2.14 Ciclu de control pentru mișcările picioarelor

Senzorii interni – giroscopae, senzori de accelerație etc. sunt suficient de rapizi pentru a facilita, singuri, o bună stabilitate la mersul lent (static). Informații suplimentare, legate de distribuția eforturilor în picioare, pot fi furnizate de senzori tactili și de forță, montați în tălpi. Odată cu creșterea vitezei de deplasare și utilizarea mersului dinamic, sunt necesari senzori externi, în principal camere video, care să transmită date despre mediu și sol. Procesarea imaginilor și complexitatea algoritmilor de control, impun timpi de calcul foarte mari, care limitează vitezele de deplasare. Specialiștii consideră că eficiența senzorilor vizuali și a procesării imaginilor va crește spectaculos în viitorul apropiat, întrucât constituie obiectul cercetărilor asidue în foarte multe domenii.

Actuatorii sunt elementele de acționare care realizează mișcările în articulațiile picioarelor. Trebuie să asigure viteze și accelerații mari, în condițiile dezvoltării unor forțe și momente capabile să controleze un robot greu, care se deplasează rapid. Pot fi luate în considerare trei tipuri de actuatori:

- § *Motoare electrice:* sunt precise și fiabile, asigură precizii și rezoluții mari, iar momentul motor și viteza pot fi determinate cu mare precizie. Dezavantajele rezidă în momente și viteze relativ mici, care limitează și viteza robotului și impun o îmbunătățire a performanțelor motoarelor electrice în viitor. Majoritatea roboților bipezi actuali, inclusiv cei mai rapizi, se bazează în totalitate pe motoare electrice.
- § *Acționări pneumatice și hidraulice.* **Acționările pneumatice** utilizează aerul comprimat ca agent motor și asigură numai mișcări de translație, care pot fi însă convertite ușor în mișcări de rotație ale articulațiilor, datorită curselor limitate ale acestora. Au un timp de reacție scurt, ideal pentru reflexe rapide ale robotului, dar necesită un compresor greu și zgomotos, cu tot sistemul de filtrare și distribuție a aerului comprimat și au o precizie redusă, datorită compresibilității aerului, motive pentru care sunt utilizate foarte rar la roboții umanoizi. Un caz aparte îl constituie mușchii cu aer, încadrați în categoria mușchilor artificiali. **Acționările hidraulice** sunt similare cu cele pneumatice, dar utilizează ulei în locul aerului comprimat, fiind mai stabile, mai precise, mai puternice, dar mai lente. Se utilizează rar la roboții umanoizi și numai în măsura în care acționarea hidraulică servește și pentru funcțiile de manipulare.
- § *Mușchi artificiali.* Sunt actuatori care simulează comportarea mușchilor naturali, cu posibilitatea de a comuta între două stări de operare: relaxat și contractat. În consecință, pentru fiecare cuplă sunt necesari doi sau mai mulți mușchi pentru realizarea mișcării dorite. Mușchii cu aer sunt accesibili în comerț și sunt constituiți din tuburi de cauciuc, care se contractă când se introduce aer comprimat. Sunt ușori și dezvoltă forțe și viteze mari, dar au precizii scăzute, proprietăți elastice și necesită aer comprimat. Alte soluții au la bază mușchi electrochimici, dar sunt încă în faza de cercetare: mușchii din compoziții polimer ionic/metal sunt fâșii de polimer, care se contractă când se aplică o tensiune electrică; mușchii din poliacylonitril se contractă când se modifică valoarea PH-ului; mușchii electro-activi funcționează pe baza stimulării materialelor elastomerice electro-actives etc.

2.3.2.2 Manipularea și prinderea

Un robot, umanoid sau de alt tip, n-are nici un sens dacă nu interacționează cu mediul său înconjurător. În această interacțiune un rol important revine funcțiilor de manipulare, care servesc la prinderea, transportul și manipularea obiectelor. Modelul robotului umanoid - omul este înzestrat cu metode sofisticate de manipulare, ajutându-se de brațe și de mâini. Fiecare braț reprezintă un lanț cinematic deschis (care a constituit un motiv de inspirație pentru roboții industriali de tip braț articulată), legat printr-o articulație sferică de umăr, și posedă 7 grade de mobilitate: 3 din umăr, 2 din cot și 3 din încheietura mâinii.

Mâna omului, compusă din oase, mușchi, cartilajii și tendoane, conectate în încheietura mâinii, are în total 21 de grade de libertate [DUM00]. Fiecare deget, cu excepția celui mare, are 4 grade de libertate, două la conexiunea cu palma, unul la

capătul primului segment, iar altul la capătul celui de-al doilea segment al degetului. Degetul mare are o dexteritate deosebită și este mult mai complicat, întrucât o mare parte din acest deget este integrată în palmă. Multe modele de studiu ale mâinii umane aproximează degetul mare cu un manipulator cu 5 grade de libertate. Mâna este acționată de circa 40 de mușchi, unii localizați în mână, dar cei mai mulți dintre mușchii care servesc la ridicarea obiectelor sunt plasați în antebraț și sunt conectați prin tendoane la articulațiile mâinii. Realizarea unor mâini artificiale, care să se apropie cât mai mult de mâna omului, reprezintă o provocare deosebită pentru specialiștii în mecatronică, iar eforturile sunt dirijate, mai ales, în sensul realizării unor proteze performante, care să asigure funcții de manipulare normale persoanelor cu handicap. Nu toți roboții umanoizi au nevoie de brațe și mâini sofisticate; mulți se pot descurca cu sisteme de prindere cu două bacuri, care se închid și deschid, sau cu mâini cu 2-3 degete mai simple.

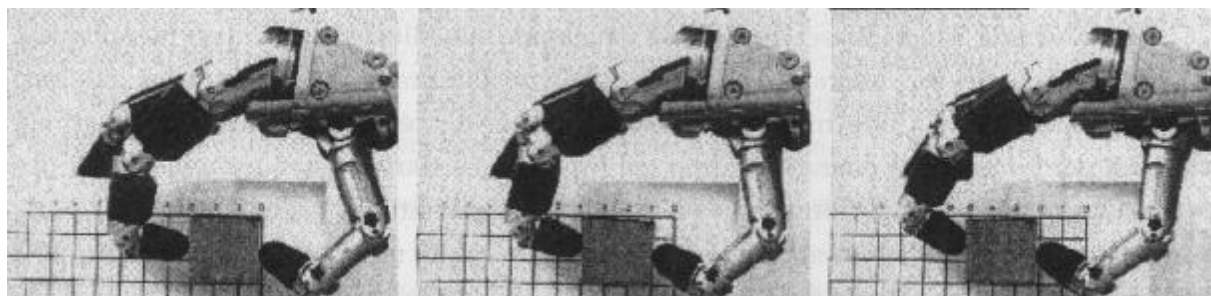


Fig.2.15 Mâna Utah/MIT

Mâna Utah/MIT din figura 2.15 este constituită din 3 degete cu câte 4 de mobilitate și un deget mare, cu alte 4 grade de mobilitate. Articulațiile sunt acționate cu ajutorul unor mușchi artificiali pneumatici, de mare viteză, prin intermediul unor tendoane rezistente din polietilenă. Pentru fiecare articulație se folosesc 2 mușchi și 2 tendoane, rezultând un total de 32 de mușchi și 32 de tendoane. Este unul din modelele cele mai apropiate de mâna umană.

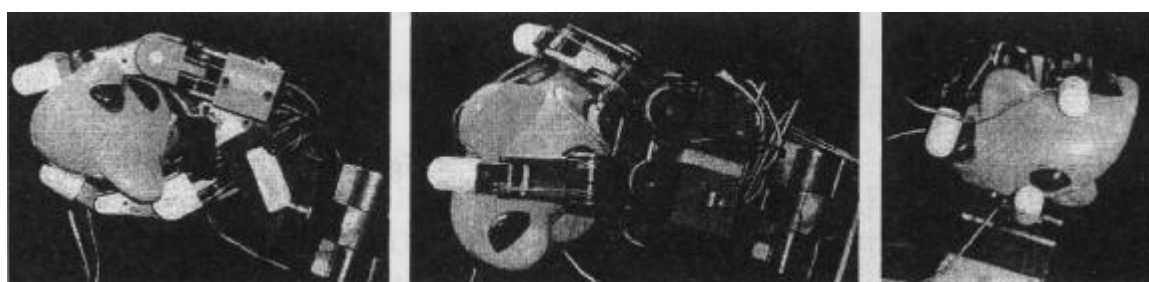


Fig.2.16 Mâna lui Salisbury

Mâna lui Salisbury, prezentată în figura 2.16 are 3 degete, cu câte 3 grade de mobilitate. Primele două articulații ale fiecărui deget permit curse de câte 90° , în timp ce a treia articulație asigură deplasări de $\pm 135^\circ$. Acționarea articulațiilor unui deget se face cu două motoare, prin intermediul unor cabluri de oțel. Fiecare cablu dispune de

un mecanism de tensionare, iar tensiunea din cablu este măsurată prin intermediul forței exercitate asupra unei role de ghidare. Pozițiile și vitezele din articulații sunt determinate cu ajutorul senzorilor incrementali montați pe axele motoarelor.

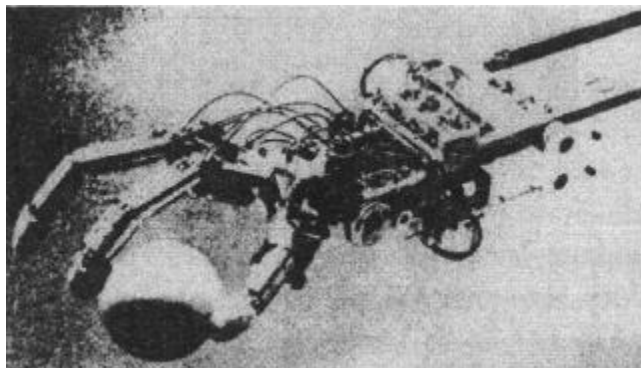


Fig.2.17 Mâna Hitachi

Mâna Hitachi (fig.2.17) este constituită din 3 degete, cu câte 3 segmente, care permit mișcări de abducție-aducție și flexie-extensie, asigurând 12 grade de mobilitate. Acționarea segmentelor se face cu 12 actuatori cu memorie a formei (SMA Shape-Memory Alloy), din aliaj de nichel-titan. Acești actuatori (care vor fi tratați în capitolul 5) își modifică forma când sunt parcurși de curenți electrici (încălziți), iar deplasările determinate de deformarea lor sunt transmise la segmente prin intermediul unor cabluri. Revenirea segmentelor este asigurată de arcuri.

Fiecare din cele trei mâini descrise, reprezintă un sistem mecatronic, iar alegerea lor pune în evidență ingeniozitatea și diversitatea soluțiilor, de la clasicele motoare electrice, la actuatori cu memorie a formei și mușchi artificiali.

Realizarea mecanică a unor mâini complexe, asemănătoare mâinii umane, este încadrată de estimările specialiștilor într-un orizont de timp de circa 5-6 ani, dar nu rezolvă întreaga problemă a manipulării, rămânând deficitare programele de control inteligent a planificării manipulării. Mâna umană are un număr mare de grade de libertate: 4x4 pentru cele patru degete, 5 pentru degetul mare și 3 din încheietura mâinii. Datorită acestei mari dexterități, investigarea spațiului tuturor pozițiilor posibile de prindere a unui anumit obiect este foarte costisitoare și consumă mult timp de calcul. Salisbury a demonstrat, de exemplu, că o mână cu cinci degete, cu câte trei segmente, poate prinde o minge în 840 de moduri diferite.

Oamenii rezolvă aceste probleme prin antrenament și prin experiența de o viață, memorată în baza de cunoștințe a creierului, care au la bază cel puțin două principii majore [DUM00]:

- Identificarea obiectelor și clasificarea obiectelor 3D în tipuri primitive de obiecte: blocuri, sfere, cilindrii, conuri, piramide etc. Obiectele sunt comparate cu diferitele tipuri primitive, ținând cont de dimensiuni, volum, centru de greutate, găuri și cavități, orientare. Când s-a identificat un tip primitiv, se estimează o serie de atribute.

- Când se efectuează o operație specifică de prindere, mișcările sunt influențate de scopul operației: o sticlă cilindrică va fi prinsă în moduri diferite, în funcție de faptul că se dorește umplerea, golirea, ducerea la gură, punerea într-o navetă etc.; un ciocan va fi prins într-un fel pentru a bate și în alt fel pentru a scoate cuie.

Sunt, pe de altă parte, câteva proprietăți importante, legate de tendința oamenilor de a prinde obiecte [DUM00]:

- Oamenii tind să prindă obiectele cu degetele plasate pe părți opuse. Pare un lucru normal, din punct de vedere fizic, întrucât forțele exercitate astfel asupra obiectului, pentru a asigura o prindere stabilă, sunt mai mici decât pentru alte variante de prindere ;
- În procesul prinderii, omul folosește, aproape întotdeauna, degetul mare. Operațiile de prindere fără ajutorul acestuia sunt rare și nu par naturale. Prinderea unui obiect, cu degetele pe fețe opuse, folosește degetul mare pe una din fețe și celelalte degete pe fața opusă.

În figura 2.18 sunt prezentați doi roboți umanoizi, realizați de cercetătorii japonezi.

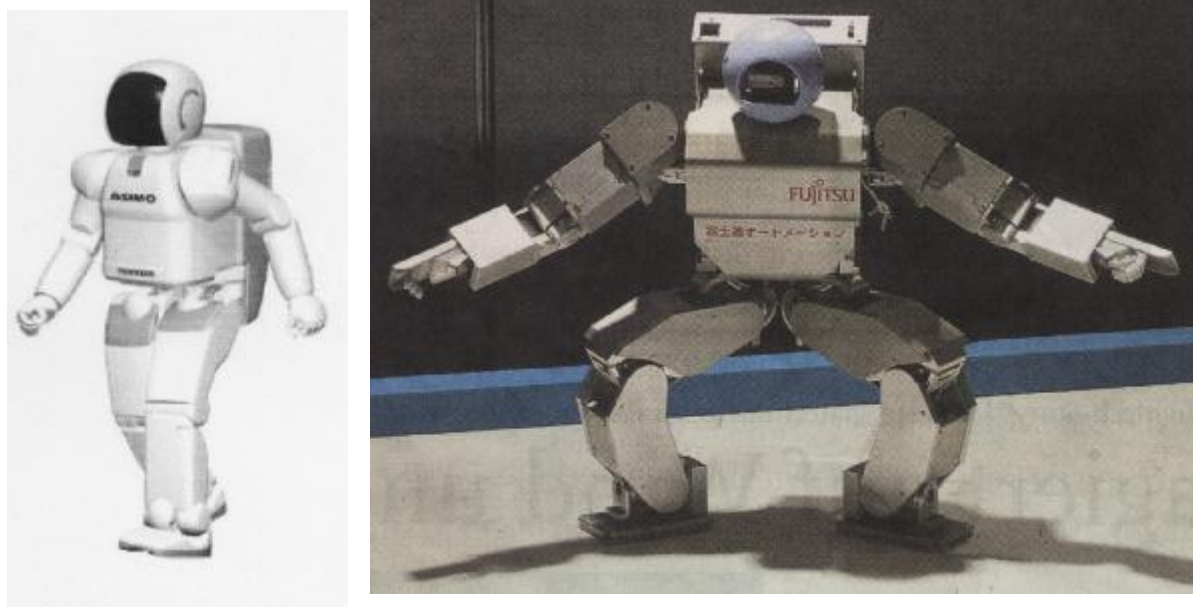


Fig. 2.18 Roboți umanoizi: a) robotul Asimo-Honda; b) robotul SUMO-Fujitsu

2.3.3 Roboții LEGO

Studiul mecatronicii reprezintă o problemă foarte complexă, întrucât, pe lângă cunoștințe temeinice din domeniul mecanicii, electronicii și tehnicii de calcul, studentul trebuie să învețe și cum să integreze aceste părți în sistemele mecatronice, pentru a genera efectele sinergetice. Întrebarea este: care sunt sistemele cele mai adecvate acestui scop? Experiența multor universități prestigioase din lume a confirmat faptul că roboții mobili și, în special, roboții LEGO programabili sunt sisteme

mecatronice ideale, care pot fi utilizate pentru a emula competențele ingineresti, interesul științific, ideile generale și creativitatea studenților.

Sistemul LEGO DACTA [LEGO Dacta] asigură un mijloc facil și eficient de a configura și reconfigura structuri de roboți mobili. El conține:

- § Elemente mecanice, incluzând piese LEGO utilizate pentru a construi structuri mecanice, dar și diferite tipuri de cuple (articulații), pinioane, curele etc. [MAR95];
- § Elemente electrice și electronice: motoare, diferite tipuri de senzori, sisteme de comandă cu microcontrollere, interfețe om-mașină, interfețe între PC și microcontroller;
- § Software pentru dezvoltarea programelor de comandă a structurilor LEGO.

Unul dintre cele mai recente produse ale firmei LEGO este RCX, un microcalculator autonom, integrat într-o piesă LEGO (fig. 2.19), care poate fi programat pentru a servi ca un “creier” al oricărei construcții LEGO. Pachetul educațional pentru RCX se numește ROBOLAB, și este rezultatul parteneriatului dintre LEGO DACTA (divizia lui LEGO care distribuie materiale pentru educație), Tufts University’s College of Engineering (S.U.A.) și National Instruments, creatorul software-ului LabVIEW. ROBOLAB este un limbaj de programare vizual, bazat pe LabVIEW, în care utilizatorul leagă o serie de pictograme pentru a genera un program. Ultima completare a pachetului ROBOLAB constă în facilitățile de procesare a imaginilor, incluse în paleta multimedia, care oferă posibilitatea realizării unor aplicații foarte complexe.

Pachetul LabVIEW (National Instruments) reprezintă un instrument de programare grafică extrem de puternic și eficient pentru instrumentația bazată pe tehnica de calcul (instrumentație virtuală), care trebuie însușit de toți specialiștii în mecatronică. Instrumentele virtuale create prin programare pot fi simple aparate de măsură sau diferite dispozitive care permit controlul unor instalații de automatizare. Programele construite cu ajutorul unor pictograme („icons”) se numesc „virtual instruments (VIs)” și cuprind o fereastră care afișează panoul cu instrumente virtuale (front panel) și o fereastră care afișează programul propriu-zis la aplicației (diagram).

Roboții LEGO sunt utilizați pe scară foarte largă în procesul de instruire a tinerilor de la vârstele cel mai fragede. Studenții trebuie să abordeze probleme complexe, cum ar fi, de exemplu, urmărirea unei traiectorii desenate pe podea, cu ajutorul unuia sau a doi senzori. Se vor prezenta câțiva algoritmi elaborați în acest scop în cadrul activităților de laborator la disciplina “Bazele sistemelor mecatronice”. Cele mai complexe probleme care pot fi rezolvate cu ROBOLAB, sunt cele care implică utilizarea senzorilor vizuali și procesarea imaginilor [DUM05].

2.3.3.1 Configurația robotului mobil

a. Structura mecanică

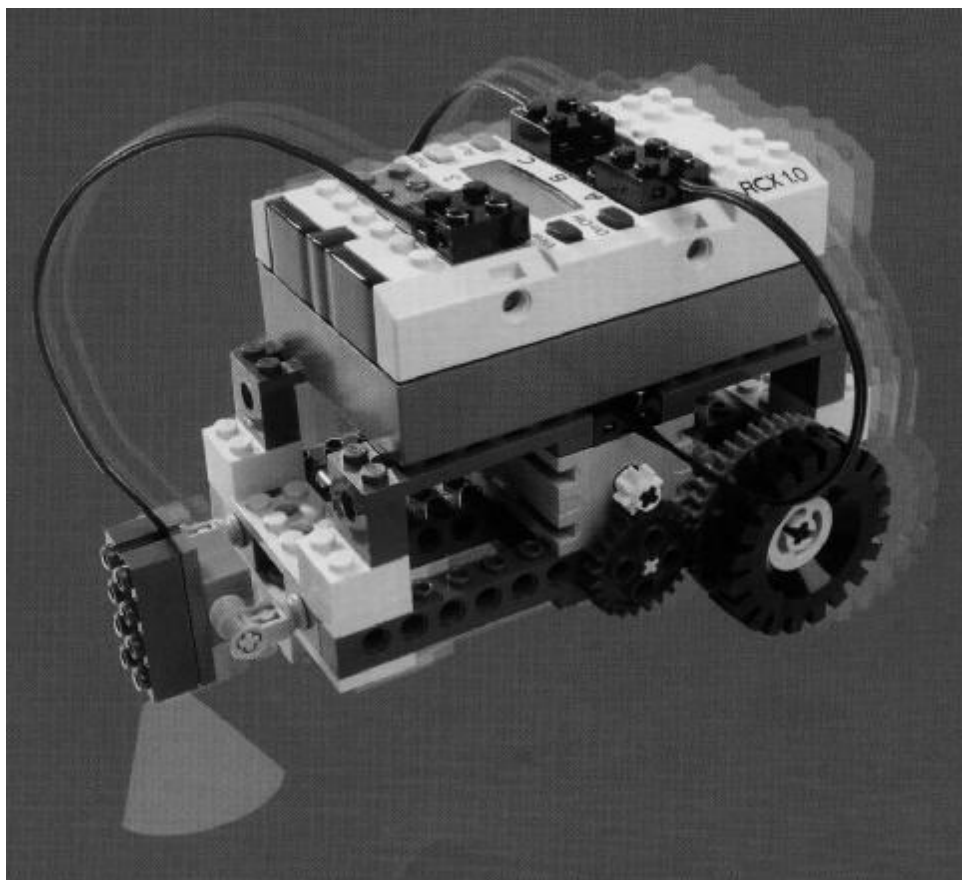


Fig.2.19 Robot mobil utilizat pentru teste

Una dintre principalele structuri de robot mobil, construită și utilizată în cadrul testelor, este prezentată în figura 2.19. Include două roți active în partea din spate, acționată fiecare de câte un motor de curent continuu montat într-o piesă LEGO, și o roată pasivă în partea din față. În vârful construcției este amplasată unitatea de comandă, RCX, conectată la cele două motoare (A și C în programele prezentate) și la senzorul de lumină din frunte (senzor 1 în programe). Acest senzor este constituit dintr-un LED (diodă luminescentă), care generează un fascicul de lumină roșie, și un fotodetector care recepționează lumina reflectată de podea și generează la ieșire o tensiune electrică, proporțională cu intensitatea luminii reflectate.

Roțile active sunt acționate prin intermediul a două trepte de angrenaje cu roți dințate. Prima include un pinion cu 8 dinți, montat pe axul motorului (pinionul de culoare deschisă din fig.2.19) și o roată dințată cu 24 de dinți, iar a doua, este realizată prin angrenarea roții intermediare de 24 de dinți cu o roată de 40 de dinți, care antrenează axul roții active. Raportul de transmitere poate fi calculat cu formula:

$$i = (24/8) * (40/24) = 5,$$

și asigură o reducere de 5 la 1 a vitezei unghiulare a motorului și o amplificare de 1 la 5 a momentului dezvoltat de motor. Direcția de deplasare a robotului este controlată, fie prin mișcarea roților active în sensuri opuse, fie prin deplasarea acestora cu viteze unghiulare diferite. În cadrul capitolului 3 vor fi prezentate câteva dintre principalele noțiuni legate de cinematica și dinamica sistemelor mecatronice, cu prezentarea principalelor tipuri de mecanisme de acționare și a rolului și efectelor acestora.

b. Comunicația dintre RCX și PC

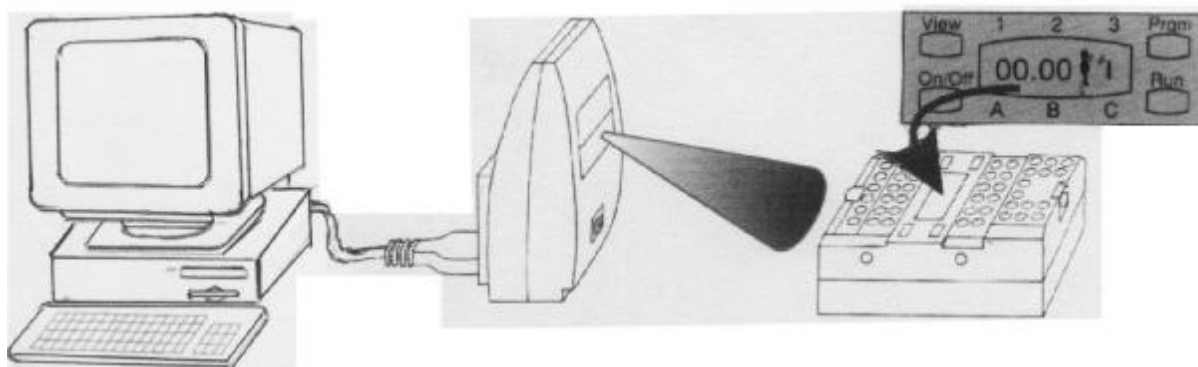


Fig.2.20 Comunicația dintre RCX și PC

RCX este o piesă LEGO, care poate fi programată pentru comanda motoarelor și achiziția și prelucrarea informațiilor de la senzori. Este echipată cu un procesor de 100 Hz și are trei ieșiri de câte 9 Volți (A÷C) și trei intrări A/D (analog/numeric) de 10 biți (1÷3). Ieșirile sunt utilizate pentru comanda motoarelor sau a becurilor, în timp ce intrările pot fi conectate la o varietate foarte mare de senzori, cum ar fi, senzori de lumină, de temperatură, de contact, de depasare etc. Utilizatorul poate memora maxim 5 programe de lucru în RCX, având opțiunea protejării primelor două la rescriere. Datele sunt transmise de la PC la RCX printr-o unitate în infraroșu, conectată la calculator printr-un cablu USB. Interfața om-mașină a RCX (HMI – Human-Machine Interface) include patru butoane și un afișaj (detaliul din dreapta în fig.2.20).

Programele dezvoltate în ROBOLAB pe PC sunt compilate și transmise în infraroșu către RCX, unde sunt memorate și executate în mod independent. Când se utilizează Vision Center pentru achiziția de imagini cu ajutorul unei camere USB, conexiunea dintre PC și RCX este permanentă, pentru a transmite către RCX detaliile selectate și caracteristicile imaginii prelucrate.

Structura LEGO prezentată în fig.2.19 conține numai două motoare și un sensor de lumină. Motoarele sunt comandate prin intermediul unor semnale PWM în cinci trepte de viteză (modificatorii de viteză 1÷5 în ROBOLAB), în timp ce ieșirea analogică a sensorului este convertită într-un număr proporțional cu intensitatea luminii reflectate. Este un exemplu concludent al efectelor sinergetice care pot fi obținute într-un sistem mecatronic. O structură mecanică simplă, dotată cu elemente mecanice și electronice modeste, este “înobilată” prin puterea RCX, dar mai ales a ROBOLAB, permițând realizarea unor aplicații surprinzător de complexe.

2.3.3.2 Algoritmi și programe pentru urmărirea traiectoriei cu un senzor de lumină

Capacitățile de programare ale ROBOLAB sunt împărțite în două secțiuni, pentru a armoniza necesitățile și competențele extrem de diferite ale elevilor și studenților: **Pilot**, secțiunea elementară de bază, și **Inventor**, secțiunea mai evoluată [POR98]. Ambele utilizează pictograme (“icons”) pentru a reprezenta comenzi și structuri de program. Este elementul de mare noutate și eficacitate introdus de LabVIEW, pionierul și liderul limbajelor de programare grafică, care a revoluționat programarea și a pus bazele instrumentației virtuale. În secțiunea Pilot, destinată mai ales copiilor, începând cu vârsta de 5 ani, numărul de pictograme este restrâns. Se utilizează imagini simple de tipul luminilor de trafic, a săgeților, a ceasurilor, pentru a permite construcția unor structuri de program simple și intuitive. Pentru a satisface necesitățile elevilor din ciclurile superioare și ale studenților, precum și ale programatorilor mai ambițioși, secțiunea Inventor oferă un nivel superior de flexibilitate și putere. În secțiunea Inventor, opțiunile sunt selectate din paleta de funcțiuni și conectate între ele pentru a constitui un program. Această secțiune oferă structuri de programare de nivel superior, ca multitasking, cicluri de program, variabile, instrucțiuni condiționale și facilitatea de a crea subrutine. Programatorii în Inventor au access la toate capacitățile RCX.

O problemă mai complexă, cum ar fi cea a urmării unei traiectorii, poate fi rezolvată numai în secțiunea Inventor. O soluție, folosită mai des, presupune utilizarea a doi senzori de lumină, plasați simetric față de conturul curbei urmărite, care are o culoare care contrastează față de culoarea podelei. Această soluție este similară cu cea utilizată de AGV-uri (Automated Guided Vehicles), pentru a urmări un cablu electric montat sub podea, în baza tensiunilor electrice induse în două bobine plasate de fiecare parte a cablului. Orice variație în intensitatea luminii/tensiunea indusă determină o schimbare adecvată a direcției, pentru a re poziționa vehiculul de-a lungul traiectoriei.

În măsura în care se folosește un singur senzor de lumină (fig.2.19), o soluție utilizată a presupus configurarea traiectoriei urmărite din fâșii de hârtie cu trei culori diferite: albastru în mijloc, negru și galben (culoarea podelei) pe cele două părți. Aceste culori au fost selectate în funcție de reacția senzorului la fâșii de hârtie de culori diferite, testată cu ajutorul secvenței extrem de simple de instrucțiuni, prezentată în figura 2.21 [LEGO]. Prima pictogramă (un semafor verde) reprezintă începutul programului. A doua pictogramă presupune încărcarea în containăru galben (un registru al procesorului) a valorii senzorului de lumină, urmată de generarea unui sunet (pictograma 3) și afișarea valorii containăruului pe display-ul RCX. După 2 secunde (penultima pictogramă), un semafor roșu determină sfârșitul execuției programului.

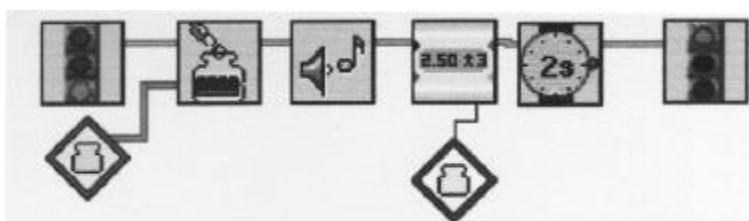


Fig.2.21 Testarea reacției senzorului de lumină la hârtii de diferite culori

În scopul elaborării unui program mai complicat, sunt utile testările unor secvențe mai simple de program, care să verifice reacțiile robotului la modificări ale intensității luminii, sesizate de senzor. Secvența de comenzi din figura 2.22 pornește ambele motoare cu viteza prezumată, folosește comanda “wait for darker” (intensitate mai mică a luminii) pentru a reduce viteza la nivelul 1 și comanda “wait for brighter” (intensitate mai mare a luminii) pentru a accelera motoarele la nivelul 5 al vitezei, timp de 6 secunde, după care oprește motoarele și încheie programul.

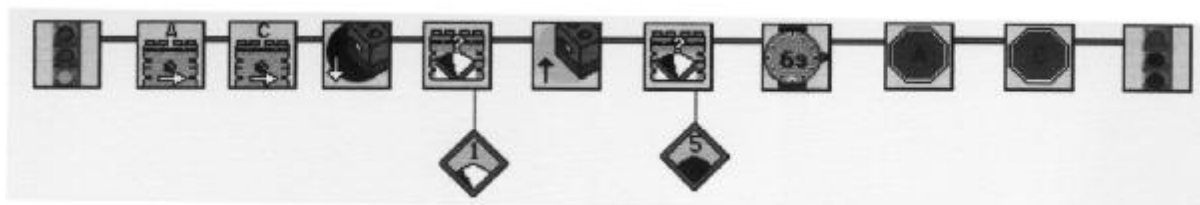


Fig.2.22 Modificarea vitezei motoarelor în funcție de valorile senzorului de lumină

Secvența de instrucțiuni din figura 2.23 este foarte asemănătoare cu cea din figura 2.27, dar utilizează comanda “wait for brighter” pentru a schimba direcția robotului (rotirea în jurul jurul axei), prin inversarea sensului de rotație a motorului A.

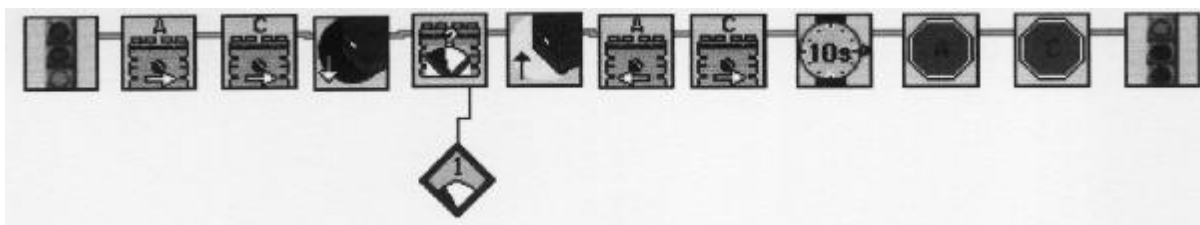


Fig.2.23 Schimbarea direcției în conformitate cu valorile senzorului de lumină

Aceste secvențe simple de program au fost utilizate pentru a dezvolta o secvență mai complexă de comenzi, prezentată în figura 2.24, care servește la urmărirea unei traiectorii imprimate pe podea, realizată din fâșii de hârtie de diferite culori (albastră, galbenă, neagră).

Programul folosește două structuri de programare de un nivel mai înalt: un ciclu “while”, care este repetat de un anumit număr de ori (200 de cicluri) și o ramificație în program care declanșează două ramuri simultane. Robotul pornește ambele motoare cu nivelul 2 de viteză și se deplasează, dintr-o poziție oarecare, până când întâlnește linia albastră (pragul de lumină 48). Continuă să se deplaseze în aceeași direcție până când întâlnește fie linia galbenă – vezi ramura de sus (pragul de lumină 50) – și se răsucește spre dreapta spre linia albastră, fie linia neagră – vezi ramura de jos – când se întoarce spre stânga pentru a întâlni linia albastră.

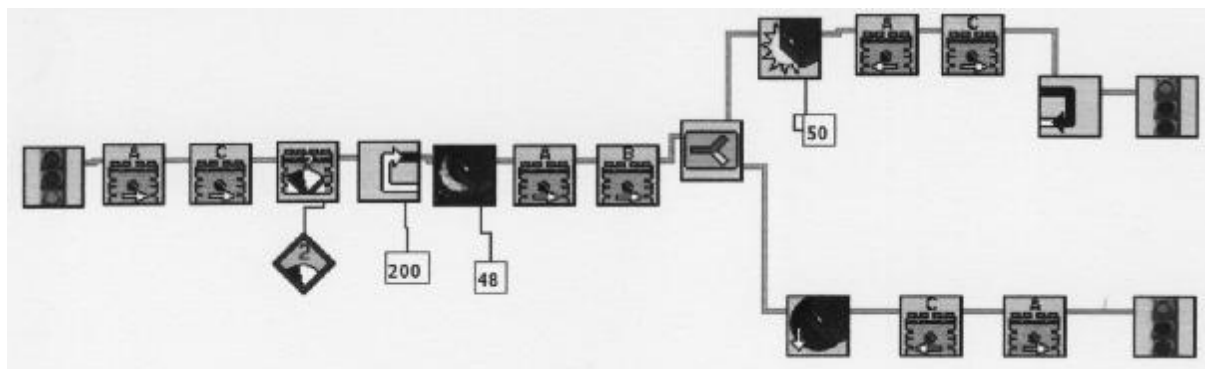


Fig.2.24 Secvență de instrucțiuni pentru urmărirea unei traiectorii

Robotul execută mișcări în zig-zag, dar se menține întotdeauna pe traiectorie, în sensul în care a pornit inițial. Secvența de program poate fi modificată cu ușurință pentru a obține o mișcare mai lină, sau pentru a schimba direcția de deplasare a robotului prin apăsarea unui senzor de contact (touch sensor).

2.3.3.3 Urmărirea traiectoriei cu ajutorul unei camere video și a Vision Center

Cele mai complexe și spectaculoase experimente, care pot fi realizate cu un robot LEGO, sunt cele care folosesc senzorii vizuali (camere de luat vederi). Utilizatorul poate folosi senzorii puși la dispoziție de componenta Vision Center a ROBOLAB sau poate să își definească senzorii proprii. Senzorii realizează anumite operații de prelucrare, pentru a reduce o imagine la un singur număr. Acest număr poate reprezenta una din multiplele proprietăți ale imaginii. Cu Vision Center activ, unul dintre cei 8 senzori standard (Brightness; Darkness; Bright Location; Motion Row; Motion Column; Motion Location; Blobs1; Blobs2) poate fi atașat unui container (registru) al RCX. Prin contactul permanent, în infraroșu, dintre RCX și PC, valoarea conținutului este actualizată în permanență cu valoarea senzorului vizual, iar RCX poate reacționa în funcție de imaginile achiziționate de cameră.

ROBOLAB oferă o paletă amplă de pictograme (comenzi) pentru procesarea imaginilor:

- § Inițializarea unei imagini mici (Init Small Image);
- § Inițializarea unei imagini mari (Init Large Image);
- § Inițializarea unei imagini prin Internet (Init Internet Image);
- § Achiziția unei imagini pe un anumit fond de culoare: Grab RGB; Grab Red; Grab Green; Grab Blue; Grab Grey;
- § Extragerea unui plan (Extract Plane);
- § Conversii: Convert to Picture; Convert to Image; Convert to Array;
- § Reducerea imaginii (Shrink Image);
- § Obținerea unor detalii dintr-o imagine (Get Image Subset);
- § Selectarea unei zone de interes (Select ROI - Region of Interest) etc.



Fig.2.25 Camera WEB utilizată pentru preluarea imaginilor

Camera utilizată pentru experimente este o Creative WebCam (fig.2.25), conectată la un PC printr-un port USB. Are o frecvență maximă a cadrelor de 30Hz și o rezoluție maximă de 320 (pe orizontală) x 240 (pe verticală) pixeli, în perfectă concordanță cu rezoluția maximă asigurată de comenzile ROBOLAB de achiziție a imaginilor. Frecvența maximă a imaginilor achiziționate cu ROBOLAB este variabilă, dar este sub 30Hz. Se situează, în general, în jurul a 15Hz și depinde de mărimea imaginii și de complexitatea operațiilor de prelucrare a acesteia.

Experimente utile, pentru înțelegerea unor principii importante de prelucrare a imaginilor, pot fi dirijate spre folosirea de:

- § **Plane de culoare:** sunt utile pentru identificarea obiectelor colorate. Un obiect colorat este mai luminos în planul său de culoare. Un bloc LEGO albastru va fi mai luminos într-un plan albastru decât în unul roșu sau verde.
- § **Praguri:** aplicând un prag unei imagini, utilizatorul poate izola părți ale imaginii, în funcție de intensitatea unor pixeli. Acest lucru este util pentru separarea obiectelor de fundalul lor.

2.4 Sistemele compact disc

Ultimul exemplu de sistem mecatronic prezentat în acest capitol este unitatea compact disc (CD), produsă în zeci și sute de milioane de exemplare la nivel mondial. Unitățile de compact disc audio digital (CD-DA) au început să fie comercializate din anul 1982, iar cele de stocare a informației numerice pentru calculator (CD-ROM) au apărut pe piață în 1987. O unitate compact disc include un sistem mecatronic ingenios pentru: introducerea/extragerea discului; rotirea acestuia cu viteza impusă; deplasarea sistemului optic în dreptul pistei citite; focalizarea fasciculului laser cu precizii de μm ; citirea informației optice în care este codificată informația stocată pe

disc. Față de exemplele prezentate anterior, un rol principal revine la unitățile CD sistemului optic de citire/înregistrare a informației. Se prefigurează astfel puntea către sisteme mecatronice în care prim-planul revine opticii și optoelectronicii, cum ar fi camere foto, camere video, aparate optice de măsură și analiză (de exemplu, spectrofotometre). Schema de principiu a sistemului de poziționare și citire a CD este prezentată în figura 2.26 [SZE01].

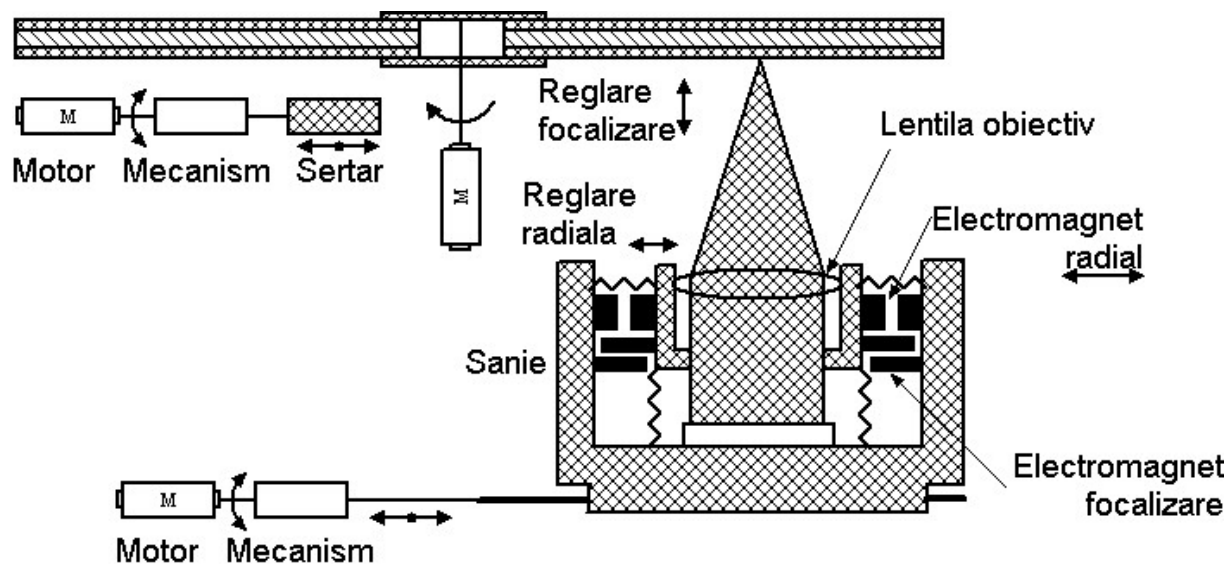


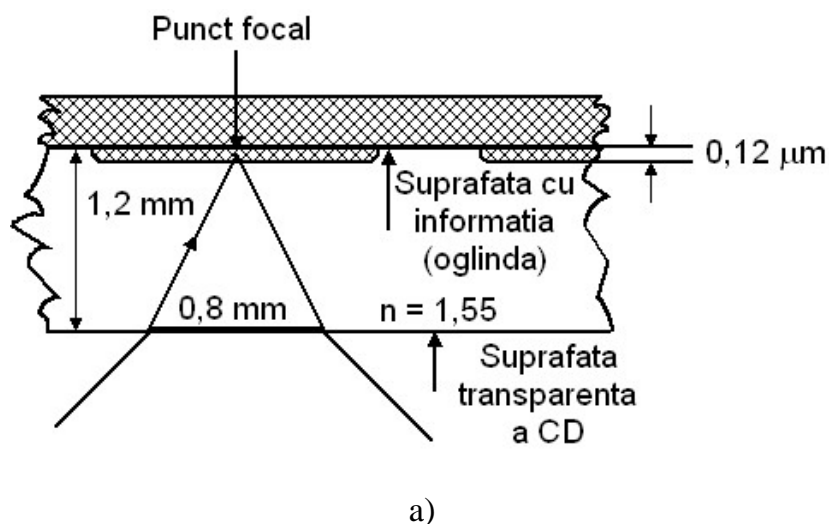
Fig.2.26 Schemă de principiu

Sistemul de acționare include trei motoare și doi electromagneți :

- § Un motor electric asigură mișcarea principală de rotație a discului. În standardul de bază viteza liniară a compact discului în dreptul cititorului laser este de 1,2 m/s sau 1,4 m/s, viteză care nu s-a modificat, pe parcursul timpului, la discurile audio, întrucât redarea sunetului trebuie să corespundă cu condițiile de înregistrare. La discurile care înmagazinează date s-a tins spre creșterea vitezei liniare, pentru creșterea ratei de transfer. Există un factor X, care arată de câte ori este mai mare viteza liniară a CD-ROM față de viteza de bază a CD-ROM față de viteza de bază de 1,2÷1,4 m/s a CD-DA. La un factor X de 50, caracteristic unităților actuale, rata de transfer a datelor este de circa 5,2 Megabiți/secundă (MBps). Primele tipuri de sistem CD-ROM utilizau acționarea cu servosisteme ce asigurau o viteză liniară constantă (CLV –Constant Linear Velocity) ; servosistemele actuale lucrează cu viteză unghiulară constantă (CAV –Constant Angular Velocity) sau cu profil de viteză predefinit, plasat între CLV și CAV.
- § Un motor acționează sertarul culisant în care se așează discul, în vederea introducerii/extragerii acestuia din unitate. Mișcarea de rotație a motorului este convertită în mișcare de translație a sertarului printr-un mecanism delicat din plastic, care include o transmisie cu curea, un reductor cu roți dințate și un angrenaj pinion-cremalieră. Acest mecanism asigură și ridicarea unui ansamblu, care cuprinde capul de citire și rola de antrenare, realizând solidarizarea discului cu axul de rotație, prin intermediul unui tampon superior.

- § Al treilea motor deplasează capul de citire cu laser, într-o mișcare de translație, de-a lungul a două coloane de ghidare, prin intermediul unui mecanism reductor și a unui angrenaj pinion-cremalieră, în direcție radială, în dreptul pistei citite, fie în salturi, pentru poziționarea în dreptul unei piste corespunzătoare unui fișier selectat, fie continuu, pentru citirea informației de-a lungul spiralei pe care această este codificată.
- § Un electromagnet radial cu un sistem de amortizare a mișcării, asigură reglajele fine ale poziției radiale a spotului, fie prin corecții de $\pm 5 \div 10 \mu\text{m}$, fie prin deplasări mai ample de $50 \div 200 \mu\text{m}$, care reprezintă salturi de $30 \div 120$ de piste pe direcție radială.
- § Un electromagnet, cu sistemul lui de amortizare, asigură reglajele de corecție a focalizării spotului în direcție verticală, prin deplasarea lentilelor care servesc la focalizare cu distanțe de până la sute de microni.

Pentru a înțelege cum funcționează sistemul optic de citire, sunt necesare câteva amănunte despre configurația și structura unui compact disc (fig.2.27, a). Acesta este un disc din material plastic, cu diametrul exterior de 120 mm, cu o gaură centrală de 15 mm diametru, pentru fixarea pe axul de rotație și cu excentricitatea maximă de $\pm 50 \mu\text{m}$. Pe suportul de plastic este depus un strat de aluminiu de $0,04 \mu\text{m}$, care reprezintă suprafața reflectorizantă a razei laser. Informația este înscrisă pe o spirală unică, care începe de la diametrul mic și continuă spre diametrul mare, și formează piste în care purtătoarele de informație sunt pit-urile, respectiv niște proeminențe în lungul pistei cu dimensiuni bine definite. Citirea discului se realizează dinspre partea inferioară a discului; raza laser parcurge stratul de plastic transparent și se reflectă pe pista de citire, unde alternează ridicăturile (pit-urile) și zonele dintre ridicături.



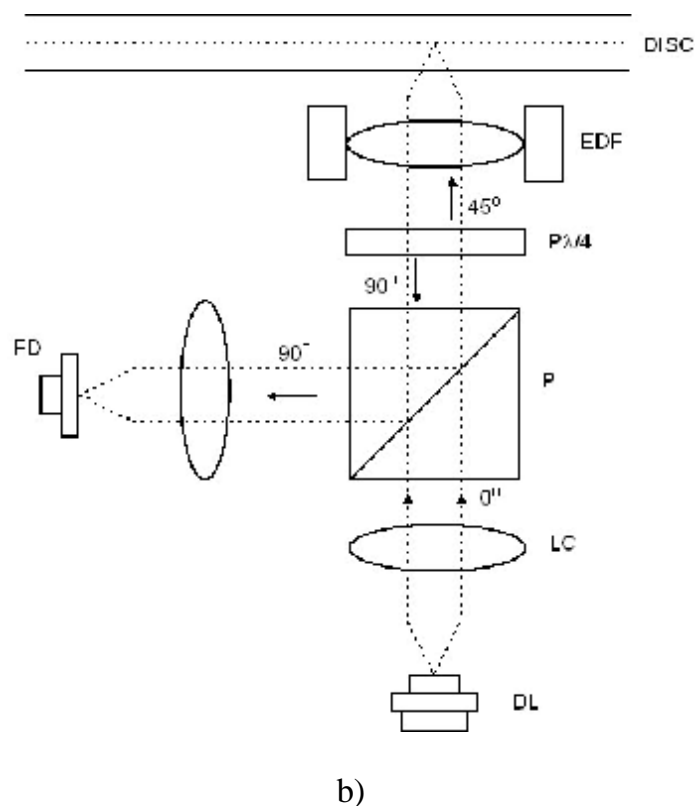


Fig. 2.27 Modul de memorare și citire a datelor la CD [SZE01]

Un pit (fig.2.27, a) are lățimea de $0,6 \mu\text{m}$, iar lungimea lui variază între $0,833 \mu\text{m}$ și $3,56 \mu\text{m}$. Distanța între două piste vecine este de $1,5 \div 1,7 \mu\text{m}$. Astfel în zona de pe disc destinată înmagazinării informației (între 50 mm și 116 mm diametru) se obține o densitate de 16.000 de piste pe inch, asigurând o spirală unică pe CD cu o lungime de 6000 m, în care încap circa 2×10^9 pituri.

Citirea informației se face cu un fascicul laser, care este generat de dioda laser DL (Al Ga As) și pregătit, în mod adecvat de o serie de componente optice (fig.2.27, b): un sistem de tip colimator, LC, care transformă fasciculul divergent într-un fascicul paralel, prisma de polarizare, P, care polarizează liniar radiația laser, placa transparentă, din cristale anizotrope, $P\lambda/4$ (lamă sfert de undă), care, datorită grosimii de $\lambda/4$, produce o rotație a planului de polarizare cu 45° și introduce un defazaj de 90° și, în final, sistemul de focalizare, EDF, cu lentila de focalizare și sistemul cu electromagneți pentru poziționarea acesteia.

Raza reflectată de pe suprafața cu informație a CD-ului parcurge din nou placa $P\lambda/4$, unde suferă o nouă rotire a planului de polarizare cu 45° și este reflectată de prisma de polarizare înspre fotodetectorul FD. Semnalul electric obținut de la fotodetector se numește Eye-Patten-Signal (EPS) și este supus unui proces de formare, procesare numerică, conversie numeric-analogică și amplificare audio.

Radiația laser are lungimea de undă de $0,78 \mu\text{m}$ în aer, și $0,5 \mu\text{m}$ în stratul transparent de plastic al CD, care are indicele de refracție $n = 1,55$. Întrucât un pit are înălțimea de

0,12 μm , deci circa un sfert din lungimea de undă a radiației în stratul de plastic, unda reflectată de pe un pit interferă cu unda incidentă și se anulează reciproc (rezultanta zero, lipsa undei reflectate). La fotodetectori un pit este receptat ca lipsă de radiație reflectată (zonă întunecată), iar intervalul dintre pituri ca zonă luminoasă (reflexie totală). În tehnica CD se utilizează codul EFM (Eight to Fourteen Modulation), care presupune că orice front, care reprezintă trecerea de la lumină la întunecat, sau vice-versa, este interpretat ca "1" logic, iar zonele de întuneric sau lumină sunt citite ca "0" logic. În acest fel informația este înregistrată și citită de pe disc sub forma unui flux de biți seriali. Modurile în care se realizează codificarea informației în vederea înregistrării pe CD și citirea și recuperarea informației de pe acesta, sunt foarte ingenioase și complexe [SZE01] și depășesc obiectivele pe care și le-a propus acest capitol.

Acest ultim exemplu, cel al unui sistem compact disc, concentrează într-o carcasă, de dimensiuni reduse, multe din elementele și cunoștințele pe care trebuie să le studieze și să le stăpânească un specialist în mecatronică:

- § Un sistem mecanic, cu motoare electrice și actuatori (electromagneți) și mecanisme de acționare complexe, care trebuie să asigure precizii de poziționare de ordinul micronilor și o comandă a vitezei unghiulare în limite impuse și riguroase;
- § Un sistem de citire optoelectronic cu fascicul laser, dispozitive optice pentru adaptarea fascicului și fotodetector pentru achiziția informației de la CD;
- § Circuite integrate, care implementează algoritmi complecși pentru prelucrarea informației numerice și analogice etc.