

# Robotica en Menselijke Motoriek\*

drs. L.R.B. Schomaker

(verschenen als hoofdstuk in boek, 1988)

## 1 Inleiding

Uit de geschiedenis van de psychologie valt op te maken dat er een sterke wisselwerking bestaat tussen de stand van de techniek en de modelvorming binnen die psychologie. Meestal beïnvloedt de techniek de wijze van denken binnen de psychologie (Vroon en Draaisma, 1986). Soms treedt echter ook het omgekeerde op: terwijl de Gestalttheorie bij de behavioristen in diskrediet was geraakt, werd deze herontdekt door onderzoekers die bezig waren met automatische beeldherkenning. De robotica is een aspect van de techniek dat zich mag verheugen in toenemende aandacht bij onderzoekers van de menselijke motoriek. Tevens wordt het aan veel onderzoekers op het gebied van de robotica duidelijk dat er veel te leren valt van de motoriek bij mens en dier, als we tenminste de nodige voorzichtigheid in acht nemen. Een inmiddels klassiek voorbeeld maakt dit laatste duidelijk. Pogingen tot het maken van vliegende machines mislukten jammerlijk wanneer de bewegende vleugels van vogels geïmiteerd werden. De redenen zijn evident: er was (en is) nog geen lichtgewicht energiebron voor een dergelijke vorm van voortbeweging, gewicht en stevigheid zijn een probleem, en er is een krachtig centraal besturingssysteem voor evenwicht en coordinatie nodig. Pas na het aanvaarden van de beperking van de vaste, onbeweeglijke vleugels konden de eerste werkende vliegtuigen worden gebouwd. Tot zover dit voorbeeld, dat gebruikt wordt in literatuur op het gebied van de kunstmatige intelligentie om aan te geven dat het soms nodig is om andere wegen te bewandelen dan de "natuurlijke", om technische resultaten te verkrijgen. Er zijn echter enkele kanttekeningen nodig. In de eerste plaats waren de eerste werkende vliegtuigen zeer merkwaardige constructies, bijvoorbeeld "dubbeldekkers", met hoogteroeren aan de neus in plaats van aan de staart. In de loop van de technische ontwikkeling zien we, dat de vorm van de vliegtuigen toch weer meer de vogelvorm benadert, tot en met bijvoorbeeld speciale voorzieningen aan de voorkant van de vleugels om langzaam vliegen en steil stijgen mogelijk te maken. Kortom, technische ontwikkelingen kunnen in een stroomversnelling komen door bepaalde beperkingen te aanvaarden, maar de verdere ontwikkeling zal nog steeds worden bepaald door dezelfde (natuur)wetten (hier: aerodynamica), die ook de evolutie van een vergelijkbaar biologisch organisme in banen hebben geleid.

We kunnen ons er niet aan onttrekken dat de voortbrengselen van de evolutie vaak gekenmerkt worden door een grote flexibiliteit en een breed werkzaam gebied. Dit laatste speelt een grote rol in de robotica. Het grote verschil tussen robots en traditionele machines is nu juist, dat men met robots algemeen toepasbare machines hoopt te maken, in plaats van machines die een specifieke taak uitvoeren. En hier stuiten we op problemen. Sommige van die problemen zijn van zuiver technische aard, en dus naar alle waarschijnlijkheid ook oplosbaar met gangbare technische methoden, terwijl andere problemen van meer fundamentele aard zijn. Voor het oplossen van deze meer fundamentele problemen is het zinnig dat de technicus zich richt op andere vakgebieden, zoals de neurofysiologie (Harmon, 1985) of zelfs op de filosofie (Janlert, 1987). In dit hoofdstuk wil ik wat dieper ingaan op de stand van zaken in de techniek van de robotica, de problemen waarvoor men zich gesteld ziet op dit gebied, en de mogelijke wisselwerking tussen bevindingen op het technische vlak, neurofysiologische en neuropsychologische bevindingen en psychomotorische theorieën.

## 2 Een korte beschrijving van een industriële robot

We zullen het in dit hoofdstuk voornamelijk hebben over de meest voorkomende robot: de permanent opgestelde robot met een arm waarin meerdere gewrichten, en een grijper. Aan de hand van dit type robot

---

\*Schomaker, L.R.B. (1988). Robotica en menselijke motoriek. In P.J.G. Keuss, G. Ten Hoopen & A.A.J. Mannaerts (Eds.), Psychonomische Publikaties: Menselijke Motoriek (117-140). Amsterdam: Swets en Zeitlinger.

kunnen een aantal lage-orde aspecten van motoriek goed geïllustreerd worden. Numeriek bestuurd machines en gewrichtsloze robots vallen buiten beschouwing. Een speciale plaats wordt ingenomen door het type robot dat zich kan voortbewegen (bijvoorbeeld op wielen). Meestal zijn deze machines echter niet uitgerust met een flexibele arm. Dit laatste type robot is in het kader van het huidige hoofdstuk alleen geschikt om hoge-orde aspecten van de motoriek zoals taakplanning te verduidelijken.

## 2.1 Het bewegingsapparaat

Een veel voorkomend type robot bestaat uit een roterende romp met daaraan een "bovenarm", een "onderarm" en een "grijper". De verschillende ledematen zijn scharnierend met elkaar verbonden (Figuur 1).

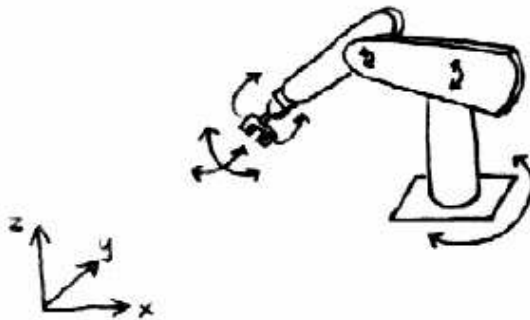


Figure 1: Schematische afbeelding van een industriële robot.

### De arm

De beweging rond een gewricht wordt verzorgd door een elektromotor die werkt met een servomechanisme. Dit wil zeggen dat er een zelfcorrigerende werking is als een gemeten gewrichtshoek afwijkt van de ingestelde gewrichtshoek. Een robot wordt onder andere gekenmerkt door het aantal vrijheidsgraden ("degrees of freedom" of "df")\*

In principe komt het aantal vrijheidsgraden van een robot overeen met het aantal elektromotoren in de gewrichten. Een vrijheidsgraad geeft een beweging rond een enkele as in de ruimte aan. Een bij robots veel voorkomend aantal vrijheidsgraden is zes: rotatie van de romp rond de verticale as (1 df), scharnieren in het schoudergewricht (1 df), scharnieren in het ellebooggewricht (1 df), horizontaal scharnieren in het polsgewricht (1 df), verticaal scharnieren in het polsgewricht (1 df), en roteren van de pols (1 df). Als we dit vergelijken met de menselijke arm, met uitsluiting van de hand, geldt het volgende. Ons schoudergewricht is een kogelgewricht, en heeft dus drie vrijheidsgraden (3 df). Het menselijke ellebooggewricht omvat een enkele vrijheidsgraad (1 df). Het polsgewricht is een uitzondering, want we kunnen de pols zelf alleen in twee richtingen scharnieren (2 df). Door de samengestelde constructie met de afzonderlijke gewrichten van spaakbeen en ellepijp kan de pols ook nog geroteerd worden (1 df) zodat we in totaal toch drie vrijheidsgraden hebben voor het bewegen van de pols. De menselijke arm heeft dus 7 vrijheidsgraden, de hand niet meegerekend. Het begrip vrijheidsgraden is van belang omdat het aantal daarvan bepaalt hoe flexibel het mechanische deel van een motorisch systeem complexe bewegingen kan uitvoeren. Tevens geldt echter dat een groot aantal vrijheidsgraden veel meer eisen stelt aan de besturing.

### De hand

In vergelijking met de menselijke hand (20 df) is de grijper van de industriële robot slechts een primitief apparaat, niet meer dan een gemotoriseerde combinatietang.

\*De term vrijheidsgraden geeft aanleiding tot verwarring. Behalve de statistische betekenis van deze term (a), is er nog de definitie zoals die in de robotica en in deze tekst gehanteerd wordt (b). Een ruimere definitie geldt in het jargon van het motoriekonderzoek waar een vrijheidsgraad staat voor elke door het centraal zenuwstelsel gestuurde parameter in een beweging (c).

## 2.2 Het waarnemingsapparaat

Vanuit het standpunt van de industriële robotica heeft de robot sensoren nodig

- om het tijdstip van beginnen en eindigen van een beweging te bepalen,
- om de identiteit van voorwerpen te kunnen bepalen,
- om te kiezen tussen handelingsalternatieven en
- om zich aan te passen aan externe beperkingen.

De moderne robot heeft maar een beperkt aantal zintuigen.

### Sensoren voor de bepaling van gewrichtshoeken

Een van zijn "zintuigen" is indirect al aan de orde geweest. Het betreft de sensor van het servosysteem dat een gewrichtshoek constant houdt. Het biologische bewegingsapparaat heeft een soortgelijk meetinstrument in de vorm van de spierspoeltjes. Deze receptoren registreren veranderingen in de lengte van een spier en doen dienst bij de reflexbeweging. Dit biologische systeem is echter maar ten dele met het technische servosysteem te vergelijken.

### Sensoren voor het registreren van kracht

De kracht over een gewricht kan direct gemeten worden met sensoren, of indirect, bij benadering, afgeleid worden uit de signalen van de hoeksensoren of de stroom door de elektromotor van een gewricht. Het biologische bewegingssysteem heeft voor het registreren van kracht de peeslichaamjes van Golgi.

### Tastzin

Verder heeft een robot soms sensoren voor kracht of contact in de grijper.

### Gezicht

De visuele sensoren van eenvoudige robots betreffen meestal lichtcellen die het passeren van een voorwerp op de lopende band aangeven. Soms wordt er gebruik gemaakt van een videocamera, maar het hangt sterk van de complexiteit van de robot af hoeveel informatie uit de videobeelden kan worden afgeleid.

### Positiebepaling

Omdat er nog zoveel problemen zijn met de verwerking van visuele gegevens wordt er voor positiebepaling soms een technische oplossing gebruikt: de sonar. Hiermee kunnen de afstanden tussen de robot en obstakels bepaald worden. We zien deze sensor vaak bij de zich op wielen voortbewegende robots.

Zelden zijn al deze zintuigen goed geïntegreerd in een enkele robot ondergebracht. De stand van zaken is dat er veel werk verricht wordt aan het oplossen van deelproblemen bij de diverse sensoren. Er is echter nog geen theorie over het "intelligent" samenvoegen van de verschillende vormen van informatie.

Vergeleken met het bewegings- en waarnemingsapparaat van mens en dier is de industriële robot maar een eenvoudige en beperkte machine. Desondanks zijn de zes vrijheidsgraden voldoende om in het werkveld een ruim scala van bewegingen en benaderingen en manipulaties van voorwerpen mogelijk te maken. Het blijkt echter al een zeer complex probleem te zijn om een dergelijk apparaat vloeiend, gecoördineerd en met een bepaalde mate van handigheid te laten werken. In het volgende onderdeel zullen we zien hoe getracht wordt zo'n robot in beweging te krijgen.

### 3 Het programmeren van robotbewegingen

Totnutoe gaat de programmering van industriële robots nog vrij omslachtig. De oudste methode is die van het "voordoen". Iemand die goed bekend is met de te automatiseren taak aan de lopende band laat met een eenvoudige afstandsbediening een robotarm stap voor stap deelbewegingen van de werктаak doen. Soms gebeurt dit ook door het leiden ("guiding") van de grijper. Het systeem onthoudt de ingevoerde posities en speciale handelingen (grijper open/dicht, verfspuit aan/uit, lasstroom aan/uit etc.). Herhaaldelijk moet de totale taak worden uitgevoerd om te controleren of er geen fouten of ongewenste discontinuïteiten zijn ingeslopen. Bij herhaalde bewegingen op verschillende plaatsen, zoals het stapelen van voorwerpen op "pallets" moeten alle deelhandelingen met de hand ingevoerd worden terwijl een computer ze gemakkelijk had kunnen berekenen. Deze vorm van programmeren is te vergelijken met het aanmaken van draairollen voor een draaiorgel. Als het programma klaar is, kan het worden afgedraaid, en de robot zal alle handelingen op dezelfde wijze verrichten, ongeacht de omstandigheden, net als de pijpen, trommels en poppen in een draaiorgel. Men zal er dus zorg voor moeten dragen dat alle voorwerpen op exact de juiste plaats en op het juiste moment daar zijn, waar de robot ze verwacht. Dit gebeurt door speciale toevoermachines die precies zijn ingesteld op de taak van de robot. Deze gang van zaken leidt ertoe dat het doel waarvoor men de robot heeft aangeschaft, namelijk flexibiliteit, gemist wordt. Bij een veranderde werктаak moet dan niet alleen de robot opnieuw geprogrammeerd worden, maar moeten er ook wijzigingen en vernieuwingen worden aangebracht aan de toevoersystemen. De genoemde nadelen (moeizame programmering en gebrek aan flexibiliteit) maakten al snel duidelijk dat er naar andere manieren gezocht moest worden om een robot te besturen. De oplossing voor een groot deel van de genoemde problemen lijkt te liggen in het gebruik van speciale programmeertalen voor robots. Met behulp van een programmeertaal kunnen complexe problemen in principe opgelost worden door die problemen hiërarchisch op te delen in kleine stukjes. Voor elk deelprobleem wordt vervolgens een programma=module geschreven. Een kenmerk is bovendien dat de uitvoering van een programmamodule afhankelijk wordt gemaakt van parameters die tezamen een context definiëren. Zo kan een zelfde stukje programmacode in een veranderende context gebruikt worden. Verder kan men er in een dergelijk hiërarchisch systeem voor zorgen dat hogere niveaus niet alles hoeven te weten wat zich op lagere niveaus afspeelt en omgekeerd. Dit lijkt de ideale oplossing voor de besturing van robots: bedenk een formele taal waarmee het uitvoeren van bewegingen, het omgaan met voorwerpen en het waarnemen van voorwerpen geprogrammeerd kan worden. In het vervolg zal naar ik deze vorm van programmeren verwijzen met de term "tekstueel programmeren" wanneer verwarring met het begrip "handmatig programmeren" moet worden voorkomen. De voordelen:

- Als we de handelingen van de robot afhankelijk willen maken van de omstandigheden kunnen we de robotbesturingstaal gebruiken om het systeem beslissingen te laten nemen op basis van de meetresultaten van zijn sensoren.
- Een doelmatige koppeling van CAD (het ontwerpen met behulp van de computer) met CAM (het produceren met behulp van een computer) kan alleen tot stand komen wanneer men de beschikking heeft over een dergelijke programmeertaal.
- Met een programmeertaal kunnen we er bovendien voor zorgen dat een bepaald programma op verschillende merken en typen robots draait.

Het praktische nut is dus duidelijk aanwezig. Het probleem zit hem echter in de specificatie van een dergelijke taal: op basis van welke theorie komen we tot een definitie en aan welke eisen moet de taal voldoen? Hier komen we op een vlak, dat zeker interessant is voor de onderzoeker van de menselijke motoriek.

### 3.1 Problemen bij het ontwikkelen van een besturingstaal voor robots

De eerste robots van de zestiger jaren werden met de hand geprogrammeerd op de hierboven beschreven wijze ("guiding"). In de zeventiger jaren begint de ontwikkeling van talen ter besturing van robots, voornamelijk in het kader van research naar theoretische aspecten van de robotica. De problemen waar men op stuit betreffen onder andere:

- de mathematische vorm waarin bewegingen en besturingen zijn vastgelegd: kinematica en inverse kinematica,
- de parallelle besturing,
- geometrische modellering,
- krachten en compliantie,
- het beschrijvingsniveau van de robotbesturingstaal.

In het volgende stuk wordt wat dieper ingegaan op deze problemen.

#### Kinematica en Inverse Kinematica

Laten we nog eens stilstaan bij de mechanische structuur van een (biologische of technische) arm. Het gaat bij een arm om een aantal starre, langwerpige onderdelen, die onderling scharnierend verbonden zijn. Als simpel tweedimensionaal voorbeeld kunnen we ons een "meccano" werkstuk voorstellen, bestaande uit vier rechte stukken. Het eerste stuk is los op de tafel geschroefd, de andere stukken zijn aan de uiteinden losjes aan elkaar geschroefd. We hebben nu een arm met vier vrijheidsgraden. We tekenen een willekeurige krabbel op de tafel. De bedoeling is nu dat het vrije uiteinde van onze constructie, de "hand", deze tekening volgt. We noemen deze tekening het af te leggen *pad*. Als we de "hand" langs de getekende lijn leiden, neemt onze constructie allerlei grillige vormen aan. We kunnen met de gegeven arm op ontelbare manieren de tekening volgen: het verloop van de gewrichtshoeken is onbepaald. We kunnen echter punten in het pad markeren en eisen dat de hand elke punt bereikt op een voor dat punt vastgesteld tijdstip. We krijgen dan een kromme van de positie van de hand als functie van de tijd. Deze kromme noemen we het af te leggen *traject*. Het probleem is nu enigzins gereduceerd omdat we de beperkende factor "tijd" hebben ingevoerd. Nog steeds is het echter niet mogelijk om eenvoudig te bepalen hoe de gewrichtshoeken in de tijd moeten veranderen. Een volgende beperking helpt al een stuk meer: zorg voor een gelijkmatige verandering van hoek over alle betrokken gewrichten. Dit voorbeeld is een illustratie van het probleem van de "inverse kinematica". Hoe kan ik de gewrichtshoek van elk gewricht in de tijd laten veranderen zodat ik de hand zo efficiënt mogelijk een gegeven ruimtelijk patroon, een *traject* kan laten volgen. Het is een transformatieprobleem: hoe vertaal ik coördinaten in een drie-dimensionaal Cartesiaans stelsel, naar hoeken in een n-dimensionaal stelsel van gewrichten. Bij de mens wordt dit probleem continu opgelost gedurende het bewegen, zonder dat we ons ervan bewust zijn. In de robotica wordt getracht het probleem op te lossen met behulp van mathematische procedures (Luh & Lin, 1984; Paul, 1979; Hollerbach & Sahar, 1983). Het blijkt dat deze procedures zeer rekenintensief zijn, ondanks het gebruik van diverse rekenkundige trucs en het opleggen van beperkingen aan de mechanische configuratie van de robot. Hierdoor is het nauwelijks mogelijk om een robotsysteem met zes vrijheidsgraden deze berekeningen gedurende het werk ("on line"), te laten doen. Dat geeft meteen al aan dat het gebruik van een robotbesturingstaal in de huidige stand van de techniek ook zijn beperkingen heeft. Bij het handmatig invoeren van een robotprogramma heeft de mens het probleem van de inverse kinematica van te voren moeten oplossen. Bij het tekstueel programmeren van robots moet de computer tijdrovende voorbereidende berekeningen doen om het verloop van de gewrichtshoeken in de tijd te bepalen. Daarom is het ook bij tekstueel geprogrammeerde robots nog maar in beperkte mate mogelijk om de robot zelf gedurende het werk bewegingsplannen te laten genereren. Er wordt hard aan gewerkt om de rekentijd te bekorten door de berekeningen te vereenvoudigen of door speciale chips te maken die de nodige berekeningen razendsnel doen. Het is de vraag of hiermee het probleem is opgelost. Met het toenemen van het aantal vrijheidsgraden van een robot neemt namelijk de complexiteit van de berekeningen sterk toe. Hoewel dit natuurlijk ook weer is op te lossen door gebruik te maken van de techniek, is het goed mogelijk dat we door te kijken naar biologische systemen een meer fundamentele oplossing van het probleem vinden. Moeten we

bijvoorbeeld veronderstellen dat onze hersenen op een overeenkomstige manier berekeningen doen om de letterlijk honderden vrijheidsgraden in ons lichaam te besturen of zijn er andere manieren denkbaar? Later komen we hier kort op terug.

### **Parallele Besturing**

In de eerste plaats moet een robotsysteem gelijktijdig de hoekveranderingen van elk gewricht sturen om een vloeiende armbeweging te verkrijgen. Voor een aantal soorten werk zou het echter bovendien handig zijn als meerdere armen gelijktijdig en goed gecoördineerd een taak konden uitvoeren. Het idee van de gelijktijdigheid strookt echter niet goed met taal: taal betreft een seriële lijst van symbolen, die door de computers van vandaag net zo gelezen wordt zoals wij lezen: van voor naar achter. We zullen dus speciale constructies zoals buffering moeten bedenken waardoor een groep symbolen weliswaar achter elkaar in het programma staan, maar gedurende de uitvoering toch tot simultane acties leiden. Een interessanter aspect van gelijktijdigheid is de coördinatie: hoe coördineren we de veranderingen van gewrichtshoeken binnen een enkele arm, en hoe coördineren we de bewegingen van meerdere armen onderling. In de techniek wordt in dit verband vaak gesproken over de "architectuur" van het systeem: de rangschikking van subsystemen en hun onderlinge communicatiekanalen. We kunnen er bijvoorbeeld voor zorgen dat de armen door zelfstandige systemen worden bestuurd. Deze systemen communiceren met elkaar op de momenten dat dat nodig is (netwerkarchitectuur). Een andere oplossing is het gebruik van een overkoepelend systeem. In dit geval is er geen communicatie nodig omdat het systeem zelf beide armen bestuurt en daardoor op de hoogte is van alle gegevens die nodig zijn voor coördinatie (hiërarchische architectuur).

### **Geometrische Modellering**

Een programmeerbaar robotsysteem moet een interne representatie hebben van de omgeving: wat is de plaats en de vorm van de objecten in het werkveld, welke objecten zijn vast, en welke objecten zijn verplaatsbaar? Verder moet er een interne representatie zijn van de eigen mechanische structuur. Neem bijvoorbeeld het geval dat twee robotarmen samen vanuit een willekeurige uitgangspositie een voorwerp moeten grijpen. Het systeem moet volledig op de hoogte zijn welk deel van de ruimte door de armen in beslag wordt genomen gedurende de reikbeweging, om aldus botsing en beschadiging te voorkomen. Direct gerelateerd aan de geometrische modellering is het gebruik van visuele informatie. De interne modellen van objecten in het werkveld moeten voortdurend aangepast worden aan de feitelijke omstandigheden. De problemen die zich hierbij voordoen zijn kolossaal en vallen buiten het bestek van dit verhaal. Industriële systemen maken tot op heden nog maar in zeer beperkte mate gebruik van visuele informatie. Er zijn bijvoorbeeld operationele systemen waarbij de grijpbeweging wordt aangepast aan de visueel afgeleide snelheid van voorwerpen op de lopende band: een vorm van oog/hand coördinatie. Verder wordt soms een camera gebruikt voor inspectie van kleuren en van laskwaliteit. Ook bij het grijpen van voorwerpen door een robothand spelen interne (geometrische en mechanische) modellen een rol. Als mensen een voorwerp willen pakken zien ze aan de vorm van het voorwerp wat de meest "handige" manier is, met andere woorden welke manier het meest aansluit bij de vorm en de stand van de handen. Bovendien maken mensen een schatting van het gewicht van het op te tillen voorwerp, van de meegaandheid/stijfheid en van de mate van kwetsbaarheid. Wolter, Volz en Woo (1985) beschrijven een procedure waarmee een robotsysteem zelf de grijpbeweging naar een object genereert. De procedure gaat uit van een zeer eenvoudige gripper (Figuur 2). Er wordt gebruik gemaakt van geometrische modellen van de gripper zelf en van het te grijpen object. Op basis

van de geometrische gegevens wordt een aantal alternatieven voor de grijpbeweging gegenereerd, elk met een eigen benaderingshoek, plaats van contact en grijpstrategie. Deze alternatieven worden getoetst aan een aantal regels, waaronder regels die de kans op losglijpen en wiebelen proberen te minimaliseren. Zo moet de plaats van contact niet te ver van het geschatte zwaartepunt af liggen. Een probleem met deze procedure is onder andere dat niet goed duidelijk is wat het gewicht van de afzonderlijke regels moet zijn: welke regel is het meest belangrijk. Verder maakt het systeem nog geen gebruik van schattingen van de massa van het te grijpen object om te weten of de grip op het object voor een gegeven grijpstrategie ook voldoende is om het voorwerp vast te houden als de arm beweegt, en dus versnellingen ondergaat. Een deel van deze problemen is bij de mens natuurlijk opgelost omdat de hand mechanisch zo goed in elkaar zit. Door meerdere vingers te gebruiken die het voorwerp omsluiten en die zich aan de vorm aanpassen wordt de kans op losglijpen sterk verkleind. Het principe dat het motorisch systeem zijn bewegingsplannen moet maken op basis van geometrische modellen en op basis van kennis over de mechanische eigenschappen van de te grijpen voorwerpen geldt even sterk

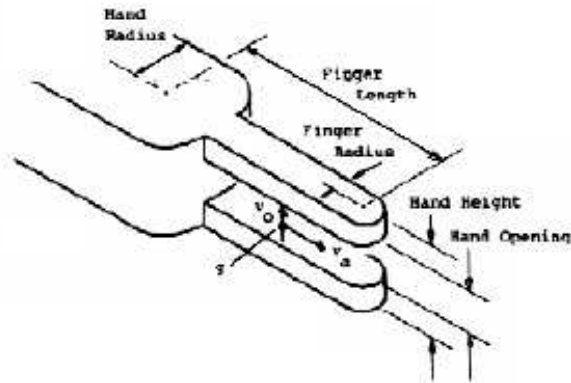


Figure 2: De interne geometrische representatie van de grijper van een robot [zie benoeming onderdelen] (Wolter, Volz en Woo, 1985).

bij de mens als bij een kunstmatig motorisch systeem. Het is echter niet principieel zo dat een grijpstrategie tot in alle details uitgewerkt moet zijn. De menselijke hand beschikt over een groot aantal receptoren zodat een globale grijpstrategie in een terugkoppelingslus aangepast en verfijnd kan worden op het moment dat er contact is tussen hand en voorwerp. Al met al blijkt het een hele klus om dergelijke faciliteiten in een technisch systeem na te bootsen, maar het interessante is dat men door te proberen een robot te laten bewegen stuit op problemen die de natuur in de loop van de evolutie ook heeft moeten oplossen.

### Krachten en compliantie

Jammer genoeg zijn we niet helemaal klaar als we met behulp van de computer het verloop van de gewrichtshoeken hebben berekend. In een imaginaire wereld zonder massa en krachten voldoen de verkregen gegevens wel. We kunnen met de computer een grafische simulatie van een robot precies laten bewegen zoals we dat gepland hadden. Het wordt echter wat anders als een echte robot reële voorwerpen moet manipuleren. Dan blijkt dat het feitelijke traject ernstig kan afwijken van het geplande traject. Door de inertie van de robot zelf en het voorwerp in de grijper komen bewegingen trager op gang en gaan ze langer door dan gepland was. Verder zijn er nog "parasitaire" krachten zoals de Corioliskracht die de beweging verstoren. Het servomechanisme dat probeert de gewrichtshoeken volgens plan te laten veranderen moet nu, post hoc, compensaties uitvoeren. We kunnen er echter voor zorgen dat de robot de krachten anticipeert. Hierdoor is de beweging nauwkeuriger en gaat er minder energie verloren. Ook dit is weer een fysisch/mathematisch probleem: welke krachten moeten de motoren van de gewrichten leveren, gegeven het geplande traject en de massa van zowel de robot als het te manipuleren voorwerp? Dit is niet zo maar een technisch probleem. Als voorbeeld nemen we de ervaren slagman bij een sport als honkbal. De beschikbare tijd voor een slag is veel te kort om de benodigde kracht per gewricht af te leiden gedurende de beweging. De ervaren slagman beschikt over een intern vastgelegd bewegingspatroon, en hij past de krachtingsinstelling aan voordat de beweging is begonnen (Schmidt, 1982). Ook bij het manipuleren van voorwerpen komen krachten om de hoek kijken. De industriële robot beschikt over een enorme kracht. Voorwerpen kunnen ernstig beschadigd worden als het systeem werkt met vast ingestelde krachten van arm en grijper. Dit probleem kan worden opgelost door de compliantie (meegaandheid, de inverse hiervan is de mechanische stijfheid) te regelen. Een passieve oplossing is bijvoorbeeld het aanbrengen van veren in de grijper. Bij het vastpakken van een voorwerp geeft de grijper mee in plaats van het star vast te pakken en eventueel te beschadigen. De actieve oplossing is echter veel breder toepasbaar. In dit geval registreren sensoren de (tegen)krachten als de grijper een voorwerp omsluit of als de arm op een obstakel stuit. De beweging wordt vloeiend aangepast totdat een voorgeschreven krachtniveau is bereikt (Lozano-Pérez, 1983). Op deze manier kan men bijvoorbeeld de robot bouten laten vastdraaien totdat een bepaald moment (=kracht) is bereikt. Ook kan een onregelmatig golvend oppervlak op deze manier gelast worden. We kunnen er met het programmeren van actieve compliantie bijvoorbeeld voor zorgen dat de laslijn kaarsrecht is in de Y-richting. We definiëren dan een hoge stijfheid langs de X-as, terwijl de stijfheid langs de Y- en Z-as laag mag zijn om de arm te laten meegeven.

## Het beschrijvingsniveau van de robotbesturingstaal.

Inmiddels heeft het onderzoek op dit terrein een aantal commerciële verkrijgbare programmeertalen opgeleverd (Tabel 1). Hoewel het programmeren van robots in deze talen al een hele vooruitgang is ten opzichte van het domweg invoeren van een vast bewegingspatroon, moet men zich niet voorstellen dat het vastleggen van een productietaak in een programma nu een eenvoudige zaak is geworden. Hoewel het handmatig invoeren van deelhandelingen zeer tijdrovend is, heeft de handmatige "programmeur" het voordeel dat hij direct ziet wat de arm doet. Tekstuele programma's worden in een veel tragere cyclus gecorrigeerd. Een ander probleem is dat programma's weliswaar in principe in een hiërarchie van modules kunnen worden opgeslagen, maar deze faciliteit is in de commerciële verkrijgbare robottalen maar zeer beperkt toepasbaar (Gruver, Soroka, Craig & Turner, 1984). Het *beschrijvingsniveau* blijft mede hierdoor zeer laag: het komt er op neer dat slechts een aantal knopdrukken uit de handmatige programmeermethode in een enkele tekstuele programmaregel ondergebracht kunnen worden. De volgende voorbeelden laten een aantal typen commando's zien, in volgorde van dalend beschrijvingsniveau:

1. ruim je kamer op
2. zet dit bouwpakket in elkaar volgens de handleiding
3. pak het volgende voorwerp van de lopende band
4. draai bout(423) vast met sleutel(15), moment is 20 Nm
5. ga met de hand naar positie  $x=50$  cm,  $y=30$  cm,  $z=10$  cm
6. roteer gewricht(5), hoek is 60 graden.

In de industriële robotica vindt de specificatie van bewegingen meestal plaats op de niveaus 5 en 6. Voor niveau 5 geldt veelal de restrictie dat het verloop van de gewrichtshoeken van te voren door een computer moet zijn berekend omdat de rekentijden te lang zijn om dit gedurende het werk te doen. In de betere systemen kan men in de laboratorium=situatie de veel algemenere commando's van niveau 4 en 3 geven. Commando's van de niveaus 1 en 2 kunnen vooralsnog alleen door een mens geïnterpreteerd worden. Programmeren op de niveaus 1 tot en met 3 noemt men "task-level programming" omdat in de specificatie alleen taakaspecten aan de orde komen. Programmeren op de niveaus 5 en 6 wordt "robot-level programming" genoemd. Niveau 4 neemt een tussenplaats in omdat er zowel taak- als robotafhankelijke instructies gebruikt worden.

Mensen hebben voor de laagste beschrijvingsniveaus geen natuurlijke taal tot hun beschikking. In feite hebben we in onze alledaagse taal maar een beperkt aantal termen om lichaamsbewegingen te omschrijven, en deze termen zijn vrijwel altijd onvoldoende om de beweging exact te repliceren. Mensen leren een nieuwe motorische handeling door de beweging van een ander te volgen, te vertalen naar een eigen interne en ontoegankelijke bewegingstaal, en vervolgens door te oefenen. In diverse vakgebieden (anatomie, sport, dansen) zijn voor bewegingen speciale termen in zwang, maar altijd gaat het om een globale beschrijving, niet om een exacte specificatie van de beweging. Ook bij de tussenliggende niveaus schieten woorden vaak tekort. Dit wordt duidelijk als je bijvoorbeeld over de telefoon moet uitleggen hoe een autoband verwisseld moet worden. De hogere beschrijvingsniveaus veronderstellen de aanwezigheid van een aanzienlijke hoeveelheid voorkennis en aangeleerde of beschikbare procedures voor de deeltaken. Wat is er bijvoorbeeld nodig om een groot voorwerp, laten we zeggen een ladder, van de kelder van het woonhuis naar de zolder te verplaatsen, terwijl gang en overloop bezaaid zijn met meubilair? De hoge-orde beschrijving is duidelijk:

vervoer LADDER van KELDER naar ZOLDER

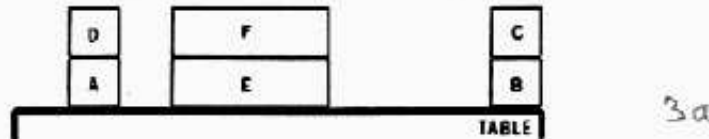
Hoe vertalen we dit naar motorische acties? Onderzoek op het gebied van de kunstmatige intelligentie geeft aanknopingspunten voor het volgende scenario. Op het hoogste niveau van planning gaat het erom de huidige omstandigheden en de wenselijke omstandigheden (het doel) zo goed mogelijk te representeren. Op dit niveau worden van het systeem algemene probleemoplossende vaardigheden verwacht. Hieronder valt ook logica en temporele logica. De wereld is op dit niveau gerepresenteerd in gerelateerde concepten. Geometrie en mechanica zijn impliciet aanwezig, maar niet expliciet beschreven. Elk concept heeft een aantal attributen. Zo is een attribuut van *< deuren >* dat ze geopend kunnen worden, dat ze op slot kunnen zijn. Een attribuut van *< meubels >* is dat ze verplaatsbaar zijn. Verder is er op dit niveau sprake van een grove,



globale kwantificatie van attributen zoals gewicht en wrijving. Op basis van dit soort informatie kan een plan gemaakt worden voor de gevraagde handeling. Er kunnen subdoelen gedefiniëerd worden en de haalbaarheid van plannen kan worden overwogen. Het klassieke voorbeeld van een computerprogramma dat in een wereld van blokken plannen voor handelen kan genereren is "Hacker" (Sussman, 1975). Dit systeem kan "mentaal" plannen maken voor het stapelen van blokken door te controleren of een blok direct opgepakt kan worden, of dat eerst de eropliggende blokken in de goede volgorde moeten worden verwijderd (Figuur 3).

**Figuur 3.**

**Plannen maken in een wereld van blokken. Figuur 3a geeft de uitgangssituatie.**



**De instructie was, formeel:**

**(zet (samen (D op A)(B op E)(A op E)(C op E)(F op D)))**

**Het resulterende plan werd:**

- 1: maak een plan om dingen op E te zetten.  
F wordt op tafel gezet.
- 2: zet A op E, na D op tafel te hebben gezet.
- 3: zet B op E, na C op tafel te hebben gezet.
- 4: zet C op E.
- 5: zet D op A.
- 6: zet F op D.

**Figuur 3b geeft het resultaat (Sussman, 1975).**

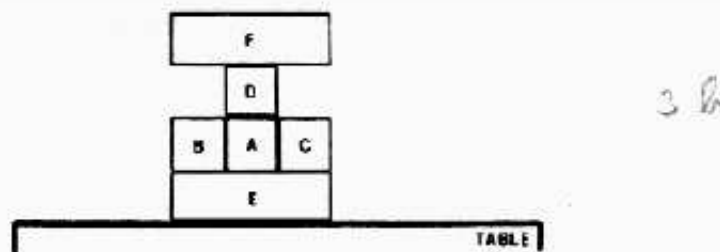


Figure 3: Plannen maken

Een wat recentere poging om dit soort cognitieve vaardigheden met behulp van een computer te simuleren is bijvoorbeeld het werk van Sarrazin en collega's. Zij proberen de manier waarop een squash-speler plannen maakt en beslissingen neemt te formaliseren en onder te brengen in een computersimulatie (Sarrazin, LaCombe, Alain & Joly, 1983). Op dit niveau is er echter nog geen sprake van motoriek (sec), maar van cognitieve faciliteiten die aan het handelen gerelateerd zijn.

Naarmate het globale plan duidelijker wordt is het zinnig om de *geometrie* van de wereld in de planning te betrekken. Zoals we al gezien hebben is het voor een "intelligent" robotsysteem nodig een interne representatie te hebben van zijn omgeving en van objecten in die omgeving. Aangezien de ladder uit ons voorbeeld langwerpiger is, en lang in verhouding tot de breedte en hoogte van deuren en obstakels, moet er rekenwerk verricht worden om een pad (n.b. nog geen traject!) te bepalen. Momenteel zijn er onderzoeken gaande naar de mogelijkheden om een robot zelf het pad te laten berekenen waarlangs een object gemanoeuvreed moet worden om obstakels te vermijden. Een tweedimensionaal voorbeeld is te zien in Figuur 4 (Brooks & Lozano-Pérez, 1985). Het berekenen van een dergelijk pad kost een

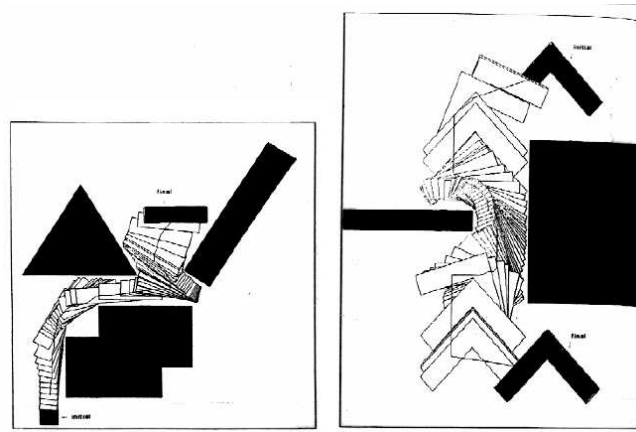


Figure 4: Een tweetal berekende paden (twee-dimensionaal), gegeven een te verplaatsen object, een beginpositie, een eindpositie en een aantal obstakels (Brooks & Lozano-Perez, 1985).

computer ongeveer vijf tot 10 minuten rekentijd. Het probleem van het vermijden van obstakels wordt bij veel operationele robots dan ook gereduceerd door het werkveld aan te passen in plaats van ze uit te rusten met een systeem voor geometrische modellering. Bij het mobiele type robots berusten geometrische modellen op een simpele blokkenwereld, waarin in essentie rechtlijnige trajecten worden afgelegd. De planning van het pad is dan stukken gemakkelijker. Om obstakels te vermijden vereenvoudigt men de vorm van de robot zelf en worden er contactschakelaars of sonar gebruikt om de bewegingen gedurende de uitvoering van de taak te aan te passen aan de fysische realiteit.

Op een nog lager niveau gaat de factor *tijd* een rol spelen. In deze fase wordt het pad omgezet in een traject. Welke snelheden moeten er gehanteerd worden op verschillende plaatsen in het pad? Waar moeten de bewegingen langzaam uitgevoerd worden (bijvoorbeeld omdat er breekbare voorwerpen zijn)? De parameters voor dit soort beslissingen komen van de hogere niveaus. Als het traject bekend is, en daarmee de kinematische parameters, kan begonnen worden met de inverse kinematica, of de berekening van het verloop van de gewrichtshoeken. Gelijktijdig of hierop volgend moeten de benodigde *krachten* berekend worden. Bij deze berekening maakt een motorisch systeem gebruik van a) de kinematische parameters, b) de massa van de ledematen en de geschatte of geanticipeerde massa van de te manipuleren objecten, c) geschatte of geanticipeerde wrijving en d) kennis over "parasitaire" krachten als de Corioliskracht. Gedurende de uitvoering zorgen terugkoppelingslusen op lage niveaus voor een vloeiende afhandeling en voor het corrigeren van kleine verstoringen. Terugkoppelingslusen op hoge niveaus zorgen voor het bereiken van het doel van de taak.

De overgang van hoger beschrijvingsniveau naar lager beschrijvingsniveau gaat altijd gepaard met een sterke toename van het aantal instructies. Tegelijkertijd is er een sterke afname van de algemene toepasbaarheid van die instructies. Hoe lager het niveau, des te sterker de afhankelijkheid van context-invloeden en van het gebruikte motorische uitvoer=systeem. Figuur 5 geeft een idee hoe de stroom van sturings=gegevens zou kunnen verlopen.

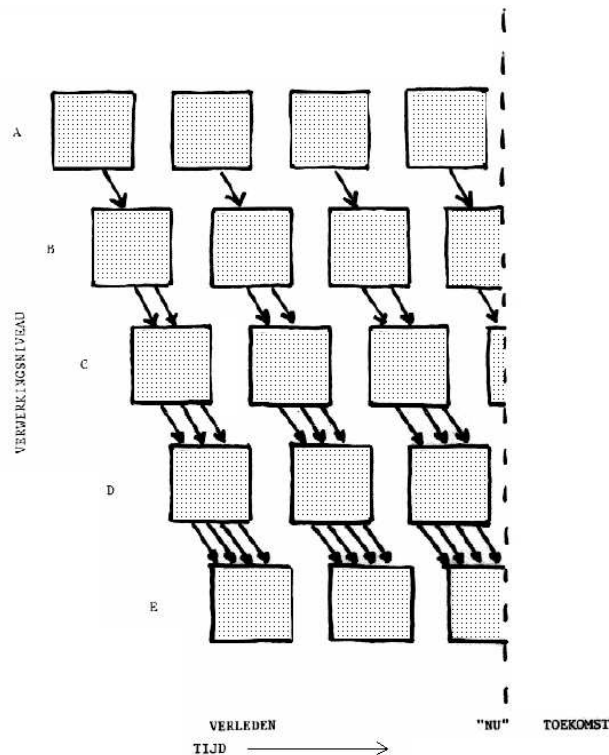


Figure 5: De stroom van informatie gedurende het plannen en uitvoeren van een beweging. De verticale as geeft het verwerkingsniveau aan, de horizontale as het verloop in de tijd. Niveau A betreft de hoge-orde taakplanning, B betreft de geometrische modellering en de bepaling van het ruimtelijke pad, niveau C betreft de berekening van het traject in termen van gewrichtshoeken, D betreft de bepaling van krachten en compliantie en op niveau E vindt de handeling plaats middels de einaffectoren, die een zekere mate van zelfregulerende werking hebben.

## 4 Robotica en onderzoek naar motoriek: een confrontatie

In sommige opzichten heeft de theorie van de motoriek vele jaren voorsprong op de theorie van de robotica. Vanuit verschillende invalshoeken (anatomie, biomechanica, neurologie, fysiologie en psychologie) is de motoriek van mens en dier immers onderzocht. In andere opzichten heeft de robotica een sterke voorsprong: als er praktische resultaten bereikt moeten worden wordt men met fundamentele problemen geconfronteerd waar nog geen theorie een oplossing voor biedt. Men is dan gedwongen om zelf een werkend systeem te bedenken en te toetsen. Dit stimuleert op zijn beurt de theorievorming weer. Het bestuderen van de menselijke motoriek gebeurt met uiteenlopende technieken. De in de psychonomie veel gebruikte technieken zijn het (half-)automatisch analyseren van bewegingen die op een film zijn opgenomen, video technieken, Selspot (Woltring, 1977) of, bij de motoriek van het schrijven, het elektronisch schrijftablet. Bij het Selspot-systeem worden er op de proefpersoon knipperende infrarood-leds bevestigd, waarvan de positie berekend kan worden op basis van de tijdinformatie. Met twee camera's kan een drie-dimensionale reconstructie van de bewegingen verkregen worden. Nieuwere technieken zijn in ontwikkeling, zoals Coda-3 (Woltring, 1986), of het zogenaamde "high speed video". We zullen nu een aantal van de eerder genoemde problemen op het gebied van de robotica bezien vanuit het standpunt van het motoriekonderzoek. Een aantal andere problemen uit de robotica is tot op heden nog niet systematisch onderzocht bij de menselijke motoriek. Dit soort problemen geven wellicht een nieuwe richting van onderzoek aan.

### 4.1 De kinematica bij de menselijke motoriek

Als we kijken naar het snelheidspatroon van menselijke bewegingen zoals mikbewegingen en schrijfbewegingen, is er een telkens terugkerende wetmatigheid. Een enkelvoudige beweging of haal, rechthoekig of gekromd, maar zonder veranderingen van draairichting, heeft maar een enkele piek in het snelheidsprofiel (Figuur 6. Dit is des te opvallender als men zich realiseert dat

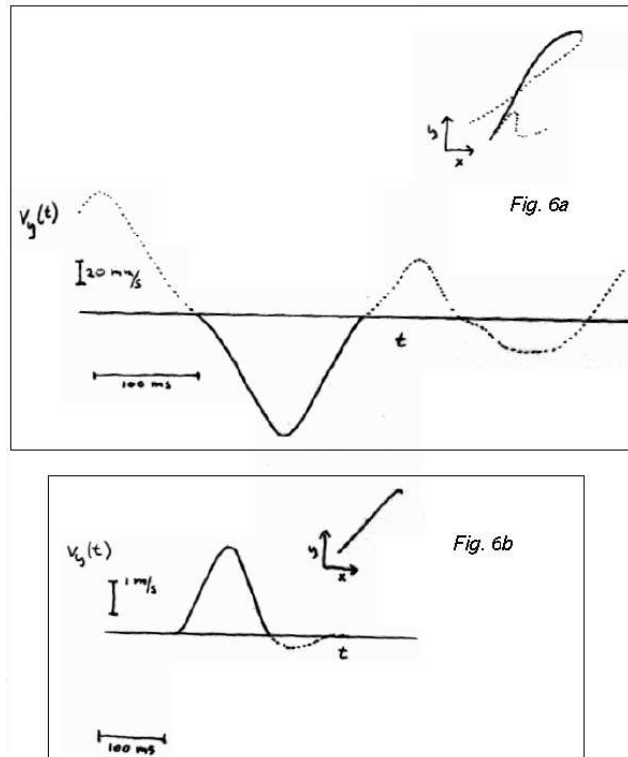


Figure 6: Snelheidsprofielen van twee enkelvoudige bewegingen. a. Een neerhaal in de letter "h" b. Een mikbeweging met de arm.

deze wetmatigheid evenzeer opgaat voor bewegingen waarbij een groot aantal gewrichten (vrijheidsgraden) is betrokken als bij eenvoudige bewegingen over een of twee gewrichten. Een tekenmachine zoals een plotter kan in principe zo bestuurd worden dat deze één en hetzelfde pad tekent, met een aantal willekeurige snelheidsprofielen. Het biologisch bewegingsapparaat heeft echter blijkbaar een voorkeur voor zo'n enkelvoudig snelheidsprofiel. Een ander opvallend gegeven is, dat de duur van een beweging binnen een vrij groot gebied veel minder afhangt van de grootte van die beweging dan men zou verwachten. Er is bij verschillende typen motoriek (lopen, schrijven, spraak) een duidelijk voorkeurs=tempo waarin de deelbewegingen worden geproduceerd. De deelbewegingen worden gescheiden door momenten waarop de snelheid van de eindeffector een minimum aanneemt. Deze bevindingen wijzen op een voorkeur van het menselijke motorische systeem om deelbewegingen van de eindeffector, meestal de hand, als afzonderlijke eenheden te produceren. In een reeks ingenieuze experimenten met apen (Bizzi, 1980; Bizzi & Abend, 1983) werd aangetoond dat bij snelle mikbewegingen het doel wordt bereikt, ook als de apen geen visuele en sensorische informatie konden krijgen over het verloop van de beweging nadat deze eenmaal begonnen is. Zelfs als de beweging kortdurend verstoord werd in zijn verloop werd het doel nog bereikt. De conclusie van de experimenten was dat de apen bij dit soort bewegingen een doelpositie bereiken omdat ze de verhoudingen van de contractieniveaus voor die doelpositie schatten. Het uiteindelijke contractieniveau van de betrokken spieren is dus ingesteld om de hand op de doelpositie te krijgen. Het gevolg van een tussentijdse verstoring is dat het systeem afwijkt, net zoals een gewicht dat aan een veer hangt afwijkt als je het een ruk geeft. Na de verstoring bereikt zo'n mechanisch systeem automatisch zijn evenwichtspositie, zonder dat er actief hoeft worden ingegrepen. Uit dit onderzoek blijkt ook dat de belangrijkste parameters in het programma van een dergelijke mikbeweging niet de grootte (afstand tussen uitgangspositie en doel) of de duur van de beweging zijn, maar voornamelijk de spierlengteverhoudingen. De verhouding van spierlengtes rond een gewricht staat in directe relatie tot gewrichtshoek en daarmee is ook de positie van de ledematen "voorbij" dit gewricht bepaald. De vraag die zich nu voordoet is: programmeert het biologische systeem in termen van gewrichtshoeken of in termen van posities? We weten nu dat uiteindelijke spierlengteverhoudingen van belang zijn bij het maken van bewegingen. Dit zou kunnen impliceren dat het programmeren van die bewegingen gebeurt in termen van gewrichtshoeken, want er is een direct verband tussen de contractieniveaus van twee spieren rond een gewricht en de resulterende gewrichtshoek. Het is echter evengoed mogelijk dat de planning gebeurt in termen van drie-dimensionele posities. In dit geval is het verband tussen het motorische programma en de spieractiviteit minder direct: de gewrichtshoeken moeten berekend worden uit de

vereiste positie. Het programmeren in het stelsel van gewrichtshoeken heeft het voordeel van directheid. Het programmeren in ruimtelijke termen heeft het voordeel van de eenvoudigere vertaling tussen externe ruimte en interne motorische plannen. Het nadeel is het "rekenwerk", net zoals we in het voorgaande stuk over inverse kinematica bij robots zagen. Om dit vraagstuk op te lossen redeneerden Hollerbach & Flash (1982) als volgt. Als we een proefpersoon een groot aantal mikbewegingen in diverse richtingen laten uitvoeren, moet het bewegingspatroon ons een indicatie kunnen geven over de onderliggende programmeermethode. Immers, als het systeem zijn bewegingen programmeert in de interne ruimte van de gewrichten, dan moet de consistentie van de beweging in termen van gewrichtshoeken het grootst zijn. Als de bewegingen daarentegen geprogrammeerd worden in termen van de drie-dimensionale ruimte, dan moet de consistentie van de bereikte posities het grootst zijn. De inverse kinematica transformatie is niet lineair. Dit betekent dat een lineair toenemen van de gewrichtshoeken van een aantal gewrichten over het algemeen zal leiden tot een kromlijinig traject van de eindeffector. Als we dus de sturing eenvoudig houden door de gewrichtshoeken op eenvoudige wijze te variëren is het gevolg een kromlijinig traject van de hand. Een lineair traject van de hand impliceert omgekeerd echter evenzeer dat het verloop van de gewrichtshoeken gekromd is. Het blijkt dat zowel apen als mensen een sterke voorkeur hebben voor in essentie rechtlijnige trajecten van de hand bij eenvoudige mikbewegingen. Dit is bovendien onafhankelijk van het aantal gewrichten dat nodig is voor die beweging. Verder blijkt uit biomechanische modelstudies dat deze rechtlijnige beweging alleen tot stand kon komen omdat het motorisch systeem a priori compenseert voor allerlei parasitaire krachten. Zonder deze compensaties zou de eindpositie wel bereikt worden, maar alleen via een veel onregelmatiger traject. Blijkbaar geven mens en dier dus de voorkeur aan het plannen van bewegingen in een stelsel dat overeenkomt met de driedimensionale realiteit, ondanks de zwaardere eisen die dit aan het brein stelt. De verklaring zou kunnen liggen in de voordelen die deze manier van bewegen heeft gehad in de evolutie. Het is immers veel moeilijker obstakels te vermijden als de beweging van een hand grillig is dan wanneer de beweging rechtlijnig is. Bovendien worden de uitgeoefende krachten minder variabel. Als voorbeeld nemen we het verplaatsen van een glas wijn. Door het traject rechtlijnig te kiezen zijn de op de inhoud uitgeoefende krachten minder variabel zodat er minder gemorst wordt. Bij het bewegen van zware voorwerpen is er het grote voordeel dat het handhaven van de houding eenvoudiger is in geval van een rechtlijnig traject. Wanneer we nu aannemen dat de planning van bewegingen in een driedimensionale representatie van de ruimte plaatsvindt moet er verklaard worden hoe en waar dan wel de "berekening" van de inverse kinematica in het brein plaatsvindt. Er is een theorie die stelt dat de hersenen erg goed in staat zijn om het type rekenprocedures uit te voeren dat nodig is om gewrichtshoeken te berekenen. Een voorbeeldje van onze geometrische rekencapaciteit is bijvoorbeeld het mentaal roteren van zelfs complexe voorwerpen, een bewerking die veel "rekenwerk" vergt. Een tweede theorie gaat er meer vanuit dat we in ons brein zeer veel gegevens hebben opgeslagen die betrekking hebben op het eigen lichaam. Het zou bijvoorbeeld kunnen dat de drie-dimensionale bewegingscoördinaten door een functionele eenheid in de hersenen getransformeerd worden tot gewrichtshoeken door gebruik te maken van de opgeslagen gegevens over het lichaam. Op beide theoriën is kritiek uit te oefenen. Kritiek op de eerste theorie komt voort uit een ongelof in de rekenkundige capaciteiten van onze hersenen. Kritiek op de tweede theorie komt voort uit een ongelof in de opslagcapaciteit van ons brein.

## **4.2 Parallellisme en menselijke motoriek**

De anatomie en de fysiologie van het menselijke zenuwstelsel geven eigenlijk al aan dat we te maken hebben met een apparaat dat zich uitstekend leent voor parallelle verwerking. Elke zenuwcel is een zelfstandig opererende eenheid die vrijwel continu in staat is om een uitvoersignaal te leveren als er voldoende invoer is. Via de zenuwbanen die bestaan uit grote hoeveelheden afzonderlijke zenuwvezels, worden voortdurend en simultaan variaties van activiteit doorgegeven. Binnen het centrale zenuwstelsel is er verder zowel sprake van een hiërarchische opbouw van structuren, als van een horizontale, (netwerk-) organisatie. Men spreekt in dit verband over "heterarchische organisatie". Deze architectuur bergt alle mogelijkheden voor een flexibele parallelle verwerking van grote hoeveelheden informatie in zich. Dat het zenuwstelsel inherent de mogelijkheid heeft voor parallelle verwerking wil echter niet zeggen dat zuiver sequentiële processen geen rol spelen. We nemen aan dat bijvoorbeeld het sturen van schrijf=bewegingen op de hogere niveaus een aantal seriële stadia doorloopt waarna op een lager verwerkingsniveau de sturing parallel verloopt (van Galen, Meulenbroek en Hylkema, 1986).

### 4.3 Geometrische modellering

Dat we in ons hoofd een model hebben van de omgeving en van ons eigen lichaam komt het duidelijkst naar voren bij mensen die ten gevolge van een beroerte (cerebrovasculair insult) specifieke functiestoornissen hebben die wijzen op een defect in het mechanisme dat zorgt voor de interne ruimtelijke representatie van omgeving en eigen lichaam (Dimond, 1980; Luria, 1973). Twee typen stoornissen in het handelen zijn hier relevant. In de eerste plaats is er de spatiële apraxie. Bij patiënten met deze aandoening kan bijvoorbeeld de positionering van de hand in de ruimte gestoord zijn, zoals bij het mikken naar een doel. Een ander tekort kan zijn dat de patiënt geen motorische taken meer kan verrichten waarbij het van belang is rekening te houden met de geometrie van voorwerpen. Bij het opmaken van een bed worden bijvoorbeeld de lakens dwars gelegd. Hoewel de patiënt de functie van een vork kent, kan hij niet uit de vorm van de vork afleiden hoe dit voorwerp moet worden vastgepakt en naar de mond moet worden gebracht. Deze mensen hebben vaak een karakteristieke moeite met het aankleden. Ook op een wat globaler niveau kan er sprake zijn van stoornissen. Dan heeft de patiënt moeite met het vinden van de weg, binnenshuis of in de buurt van zijn oorspronkelijk vertrouwde woonomgeving. De beschadigde structuren in de hersenen bevinden zich bij rechtshandigen meestal in de rechterhemisfeer. Een tweede type stoornis is de "asomatognosie" waarbij er stoornissen zijn in het benoemen of aanwijzen van eigen lichaamsdelen. De patiënt ontkent bijvoorbeeld dat een lichaamsdeel van hem is, beschouwt het als een levenloos ding en houdt er geen rekening mee gedurende het handelen. De zuiver motorische aansturing van hetzelfde ledemaat kan hierbij volledig intact zijn. De meest extreme vorm is de hemiasomatognosie waarbij de interne representatie van een gehele lichaamshelft verdwenen lijkt te zijn.

### 4.4 Krachten, compliantie

Het is interessant te zien dat er in publicaties over robotica meestal wordt gesproken over compliantie (meegaandheid). De uitgangssituatie is immers een zeer stijf mechanisch systeem dat we wat meegaander zouden willen maken in zijn omgang met voorwerpen. In de biomechanica spreken we meestal over de stijfheid van een spier. Hier is dan ook het uitgangspunt een zeer meegaand mechanisch systeem dat pas subjectief waarneembare stijfheid heeft als de spier gecontraheerd wordt. Dit verschil in gehanteerde terminologie geeft het fundamentele verschil aan tussen de technische en biologische bewegingssystemen. Terwijl het biologische apparaat gebruik kan maken van de elastische eigenschappen van het weefsel, moet in de robotica die elasticiteit actief toegevoegd worden. Toch regelt ook ons lichaam de stijfheid op een actieve wijze. Enerzijds wordt de stijfheid automatisch geregeld door reflexmechanismen, anderzijds zijn we ook in staat de stijfheid aan te passen door spieren bijvoorbeeld (geprogrammeerd) gelijktijdig te laten aanspannen. Gedurende een snelle beweging zullen vooral die spieren actief zijn die bijdragen tot de bewegingsrichting. Hun tegenhangers zullen meer ontspannen zijn. Als we echter het mikpunt bereikt hebben kunnen we de stabiliteit sterk vergroten door de spieren rond de betrokken gewrichten gezamenlijk iets aan te spannen. De slagman bij honkbal programmeert niet alleen het traject en de kracht van de armen maar laat ook een zeer groot aantal houdingspijlen aanspannen om stevig te kunnen blijven staan. De onhandigheid van de beginnende slagman berust voor een groot deel op het foutief geprogrammeerde verloop van de stijfheid in het lichaam gedurende een slag. Er is wel eens gezegd dat we geen spier in ons lichaam aanspannen zonder elders een compenserende contractie uit te voeren. Behalve het van te voren programmeren van krachten spelen bij de menselijke motoriek ook de sensorische mechanismen een rol. Met behulp van de tastzin kunnen krachten worden aangepast gedurende het manipuleren van voorwerpen. De noodzaak van terugkoppeling wordt duidelijk aan de hand van de afferente of sensorische apraxie. In dit geval faalt de positionering van de vingers bij het manipuleren van voorwerpen. De patiënt voelt niet of de vingers goed staan voorafgaand aan een grijpbeweging en ook nadat het contact met het voorwerp is gemaakt kan de patiënt geen gebruik maken van de tastzin om bewegingen te corrigeren.

### 4.5 Het beschrijvingsniveau van een motorisch programma bij de mens

Eerder hebben we gezien dat we motorische- of handelings=commando's kunnen karakteriseren wat betreft het beschrijvingsniveau. Op de allerhoogste niveaus hebben we te maken met cognitieve vaardigheden die nodig zijn voor het interpreteren van een algemeen commando en voor het genereren van een hoge-orde plan. Maar hoe zit het bij de mens met de tussenliggende niveaus? Maken we motorprogramma's die al in een vroeg stadium gerelateerd zijn aan de spieren die we zullen gaan gebruiken? De nadelen van een dergelijke oplossing zijn duidelijk. Een geleerde vaardigheid kan in dit geval alleen met de spieren uitgevoerd worden

waarnaar verwezen wordt in het motorprogramma. De menselijke motoriek is echter veel flexibeler. Figuur 7 geeft een aantal regels schrift, geproduceerd met zeer

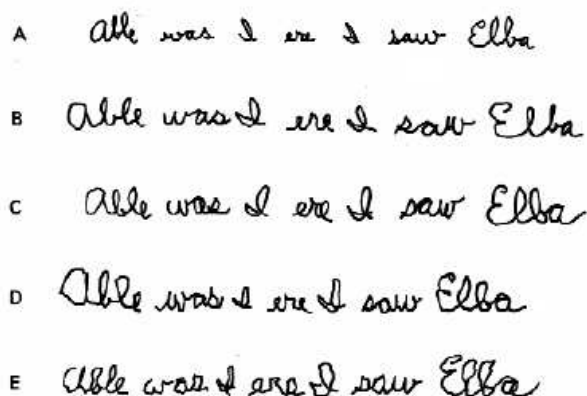


Figure 7: Invariante kenmerken van handschrift, geproduceerd met uiteenlopende motorische systemen (Raibert, 1977): A. Geschreven met de (dominante) rechterhand; B. " met de rechterarm, met gefixeerde pols; C. " met de linkerhand; D. " met de mond, de pen tussen de tanden geklemd; E. " met de voet, pen was met plakband bevestigd. De grootte van het schrijfspoor is genormaliseerd voor de verschillende replicaties.

uiteenlopende motorische uitvoersystemen. Hoewel er verschillen zijn, is duidelijk te zien dat hier dezelfde schrijver aan het werk is geweest. Afgezien van de onregelmatigheden die te wijten zijn aan de instabiliteit van het systeem of aan de ongewone schrijfsituatie is er een overeenkomst, die ook aanwezig is in de corresponderende snelheids=profielen. De verklaring is dat algemene spatiële en kinematische parameters worden doorgegeven aan het systeem dat op dat moment gekozen wordt tot eindeffector. De lagere niveaus zorgen dan voor de berekening van de meer gedetailleerde motorische instructies/activatiepatronen. Ook hier kunnen hersenbeschadigingen ons inzicht geven in de organisatie van de menselijke motoriek. Bij de constructieve apraxie faalt het maken van hoge-orde plannen voor het oplossen van een motorische taak. De patiënt begint met een willekeurige handeling en probeert een deelprobleem op te lossen zonder een idee te hebben hoe handelingen gefaseerd moeten zijn, er is geen strategie. Het gaat dus met "trial en error" hoewel de fouten nauwelijks leiden tot verbetering. Problemen op een lager beschrijvingsniveau komen tot uiting in de coördinatieve apraxie. Bij deze vorm van apraxie is er het onvermogen om een deelhandeling in de tijd zo te rangschikken dat de totaalhandeling vloeiend is. Ook kunnen deelhandelingen niet op het juiste tijdstip worden afgebroken na eenmaal te zijn opgestart.

## 5 Besluit

Dit verhaal beoogde geen allesomvattend verslag te zijn van de stand van zaken in de robotica en binnen het onderzoek van de menselijke motoriek. Daarvoor zijn beide gebieden te omvangrijk en te complex. Toch hoop ik dat de lezer een idee gekregen heeft van de uitdaging die de robotica stelt aan de onderzoeker van de menselijke motoriek. Het moge ook duidelijk zijn dat een groot deel van de gesignaleerde problemen bij uitstek een onderwerp is voor wetenschappers op het gebied van biofysica, de neuropsychologie en last but not least, de psychonomie.

## 6 Literatuur

- Bizzi, E. (1980). Central and Peripheral Mechanisms in Motor Control. In Stelmach, G.E. & Requin, J. (Eds.), *Advances in Psychology 1: Tutorials in Motor Behavior* (pp. 131-143). New York: North Holland.
- Bizzi, E. and Abend, W. (1983). Posture control and trajectory formation in single- and multi-joint arm movements. In Desmedt, J.E. (Ed.), *Motor Control Mechanisms in Health and Disease* (pp. 31-45). New York: Raven Press.

- Brooks, R.A. & Lozano-Peréz, T. (1985). A Subdivision Algorithm in Configuration Space for Findpath with Rotation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics.*, 15(2), 224-233.
- Galen, G.P. van, Meulenbroek R.G.J. & Hylkema, H. (1986). On the simultaneous processing of words, letters and strokes in handwriting: evidence for a mixed linear and parallel model. In H.S.R. Kao, G.P. van Galen, & R. Hoosain (Eds.), *Graphonomics: Contemporary research in handwriting* (pp. 5-20). Amsterdam: North-Holland Publ. Comp.
- Gruver, W.A., Soroka, B.I., Craig, J.J. & Turner, T.L. (1984). Industrial Robot Programming Languages: A Comparative Evaluation. *IEEE*
- Harmon, L.D. (1985). Tactile sensing for robots. In G. Beni & S. Hackwood (Eds.), *Recent advances in robotics* (pp. 389-424). New York: John Wiley & Sons. *Transactions on Systems, Man, and Cybernetics.*, 14(4), 565-570.
- Kim, B.K. & Shin, K.G. (1985). Minimum-Time Path Planning for Robot Arms and Their Dynamics. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics.*, 15(2), 213-223.
- Luh, J.Y.S. & Lin, C.S. (1984). Approximate Joint Trajectories for Control of Industrial Robots Along Cartesian paths. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics.*, 14(3), 444-450.
- Luria, A.R. (1973). *The Working Brain: an Introduction to Neuropsychology*. New York: Penguin.
- Neuman, C.P. & Tourassis, V.D. (1985). Discrete Dynamic Robot Models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics.*, 15(6), 193-204.
- Paul, R. (1979). Manipulator Cartesian Path Control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics.*, 9(\*), 702-711.
- Janlert, L.-E. (1987). Modeling change: the Frame Problem. In Z.W. Pylyshyn (Ed.), *The robot's dilemma* (pp 1-40). Norwood (NJ): Ablex.
- Sarrazin, C., Lacombe, D., Alain, C. & Joly, J. (1983). Simulation study of a decision-making model of squash competition, phase one: the analysis of the protocol. *Human Movement Science.*, 2, 279-306.
- Schmidt, R.A. (1982). *Motor Control and Learning: A behavioral emphasis*. Champaign: Human Kinetics.
- Sussman, G.J. (1975). *A computer model of skill acquisition*. New York: Elsevier.
- Tourassis, V.D. & Neuman, C.P. (1985). Inverse Dynamics Applications of Discrete Robot Models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics.*, 15(6), 798-803.
- Vroon, P. & Draaisma, D. (1986). *De mens als metafoor*. Baarn: Ambo.
- Wolter, J.D., Volz, R.A. & Woo, A.C. (1985). Automatic Generation of Gripping Positions. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics.*, 15(2), 204-213.
- Woltring, H.J. (1977). Measurement and Control of Human Movement. Dissertatie, Kath. Universiteit Nijmegen.
- Woltring, H.J. (1986). Data acquisition and processing systems in functional movement analysis. Paper presented at the *3rd National Congress of the Italian Society of Biomechanics in Orthopaedics and Traumatology*, Ancona (Italy), juni 1986, 21 pagina's.



Tabel 1  
Enige robotbesturingstalen.

Naam	Jaar	Beschrijvingsniveau	Kenmerken
1) MHI	1960	6	-Primitief, eenvoudige arm.
2) WAVE	1970	6,5	-Eenvoudige arm. 3d trajectbeschrijving van de hand, compliantieregeling.
3) MINI	1972		-Een volledige robotarm (6 df).
4) AL	1974	6+5,4	-Meest complete robottaal totnutoe. 3d trajectbeschrijving compliantieregeling, parallele coordinatie, synchronisatie geometrische transformaties, geometrische modellering.
5) VAL	1975	6,5,4	-Industriële subset van AL, Niveau 4 is gebaseerd op vaste assumpties m.b.t. robot en werkveld. geen compliantieregeling, geen geometrische transformaties, wel 3d trajectbeschrijving.

1) MHI voorbeeld

```

move x for 120           ;beweeg met snelheid 120 langs x as
until sl 10 rel lol     ;tot sensor 1 een daling van 10 geeft
                        ;t.o.v. de huidige waarde.

```

2) WAVE

```

TRANS PIN=10.,20.50.    ;Ken posities toe
TRANS HOLE=30.,40.,10.
MOVE PIN                ;Ga een standaardhoeveelheid omhoog,
                        ;beweeg naar x,y positie van PIN en
                        ;ga omlaag tot de z van PIN.
STOP 50                 ;maar stop als je een kracht van 50 gr registreert.
                        ;dit is een voorbeeld van een "guarded move".

```

.end literal

.page

Onderschriften bij de figuren.

.literal

Figuur 1.

Schematische afbeelding van een industriële robot.

Figuur 2.

De interne geometrische representatie van de grijper van een robot (Wolter, Volz en Woo, 1985).

Figuur 3.

Plannen maken in een wereld van blokken. Figuur 3a geeft de uitgangssituatie. De instructie was, formeel:

(zet (samen (D op A)(B op E)(A op E)(C op E)(F op D)))

Het resulterende plan werd:

- 1: maak een plan om dingen op E te zetten.  
F wordt op tafel gezet.
- 2: zet A op E, na D op tafel te hebben gezet.
- 3: zet B op E, na C op tafel te hebben gezet.
- 4: zet C op E.
- 5: zet D op A.
- 6: zet F op D.

Figuur 3b geeft het resultaat (Sussman, 1975).

Figuur 4.

Een tweetal berekende paden (twee-dimensionaal), gegeven een te verplaatsen object, een beginpositie, een eindpositie en een aantal obstakels (Brooks & Lozano-Perez, 1985).

Figuur 5.

De stroom van informatie gedurende het plannen en uitvoeren van een beweging. De verticale as geeft het verwerkingsniveau aan, de horizontale as het verloop in de tijd. Niveau A betreft de hoge-orde taakplanning, B betreft de geometrische modellering en de bepaling van het ruimtelijke pad, niveau C betreft de berekening van het traject in termen van gewrichtshoeken, D betreft de bepaling van krachten en compliantie en op niveau E vindt de handeling plaats middels de eindeffectoren, die een zekere mate van zelfregulerende werking hebben.

Figuur 6.

Snelheidsprofielen van twee enkelvoudige bewegingen.  
a. Een neerhaal in de letter "h"  
b. Een mikbeweging met de arm.

Figuur 7.

Invariante kenmerken van handschrift, geproduceerd met uiteenlopende motorische systemen (Raibert, 1977).

- A. Geschreven met de (dominante) rechterhand,
- B. " met de rechterarm, met gefixeerde pols,
- C. " met de linkerhand,
- D. " met de mond, de pen tussen de tanden geklemd,
- E. " met de voet, pen was met plakband bevestigd.

De grootte van het schrijfspoor is genormaliseerd voor de verschillende replicaties.