

Problemen bij de automatische montage (3) : de actieve compliant

Citation for published version (APA):

Leenders, P. W. J. (1984). Problemen bij de automatische montage (3) : de actieve compliant. *De constructeur*, 23(3), 48-53.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1984

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Problemen bij automatische montage (3)

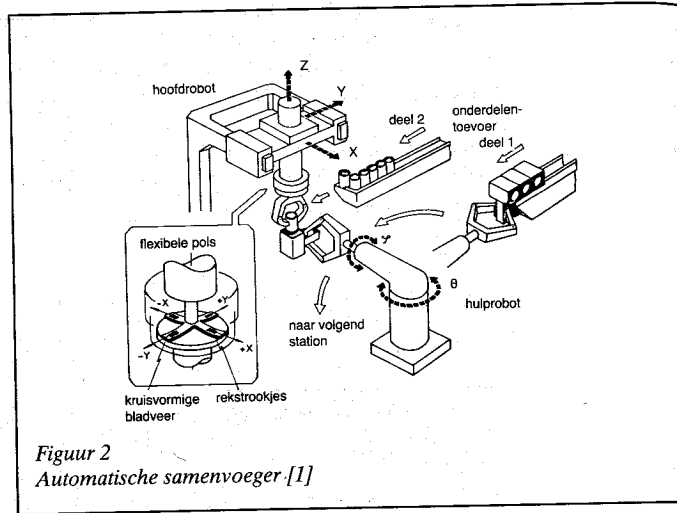
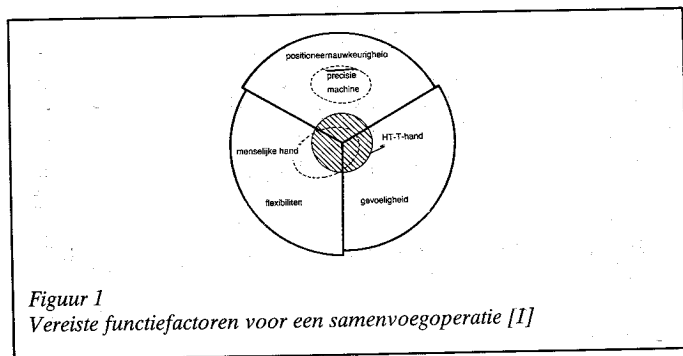
De actieve compliant

De in het vorige artikel besproken passieve complianten hebben het grote voordeel dat deze werken in 'real time' (in vergelijking met de nu te bespreken actieve complianten die 'rekentijd' nodig hebben alvorens te reageren); de passieve complianten reageren direct op geconstateerde krachten of afwijkingen. Daartegenover bezitten ze allen het nadeel dat de optredende krachten afhankelijk zijn van de optredende afwijkingen. Alleen als deze afwijkingen een bepaalde constantheid bezitten is het met behulp van de IRCC's mogelijk deze afwijkingen en dus de optredende krachten te minimaliseren. Voor verschillende componenten kunnen er verschillende complianten nodig zijn, bij voorbeeld doordat de ene component zwaar en sterk is en de andere licht en zeer kwetsbaar.

Dit vereist verschillende elastische karakteristieken van de compliant. Voor de meeste complianten geldt daarnaast ook nog dat deze componenten in een bepaald afmetingen-'traject' aan kunnen. Kortom de bruikbaarheid van een passieve compliant is begrensd door zijn beperkte flexibiliteit. Om deze tekortkomingen op te heffen is er parallel aan de ontwikkeling van passieve complianten een ontwikkeling in actieve compliantie. Historisch gezien neemt deze ontwikkeling een aanvang met de Hi-T-Hand.

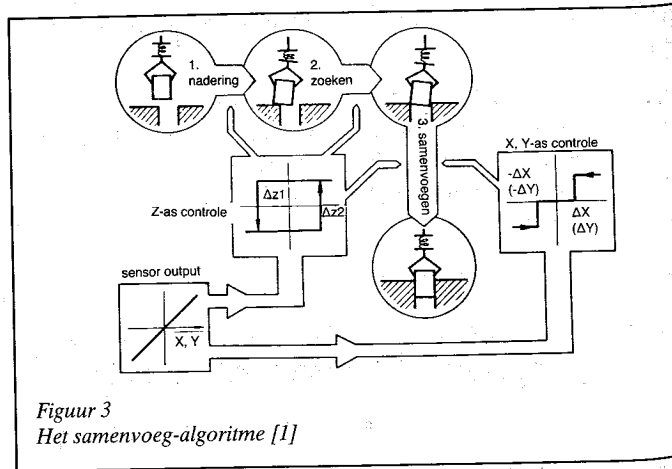
De Hi-T-Hand [1]

Volgens de constructeurs is deze 'hand' ontworpen om een fijngevoeligheid te verschaffen, vergelijkbaar met die van de menselijke hand, die nodig is om samenvoeghandelingen uit te voeren. Er zijn proeven gedaan met dit ontwerp waarbij zuigers in cilinders werden gezet met een onderlinge speling van circa 20 μm . Men heeft eerst een 'bio-engineering' studie gemaakt van de wijze waarop de mens deze tactiele functies uitvoert. Daarbij bleek dat de mens dergelijke nauwkeurige samenvoeghandelingen vooral uitvoert met behulp van zijn tastgevoeligheid en niet met behulp van zijn ogen. Hierom werd gekozen voor tactiele sensoren. Hiernaast bleek ook dat enige flexibiliteit voordelen had. Dit laatste was op dat moment een nieuwe gedachte aangezien nauwkeurigheid gerelateerd werd aan de stijfheid van de machine. Triviaal is dat deze flexibiliteit wel bekend en beheersbaar dient te zijn. In figuur 1 zijn drie factoren aangeduid die bepalend zijn voor de samenvoegoperatie en die in een juiste balans dienen voor te komen.



De constructie is opgebouwd uit een hoofdrobot, een hulprobot en een voeder, geïntegreerd tot één werkunit (figuur 2). De hoofdrobot pakt de as en voert de samenvoeghandeling uit. Het positioneermechanisme en de vingers van de hoofdrobot zijn gekoppeld door een flexibele constructie van de pols, gebruikmakend van een kruisvormige bladveer, zoals afgebeeld is in figuur 2. Dit geheel is op te vatten als een actieve compliant.

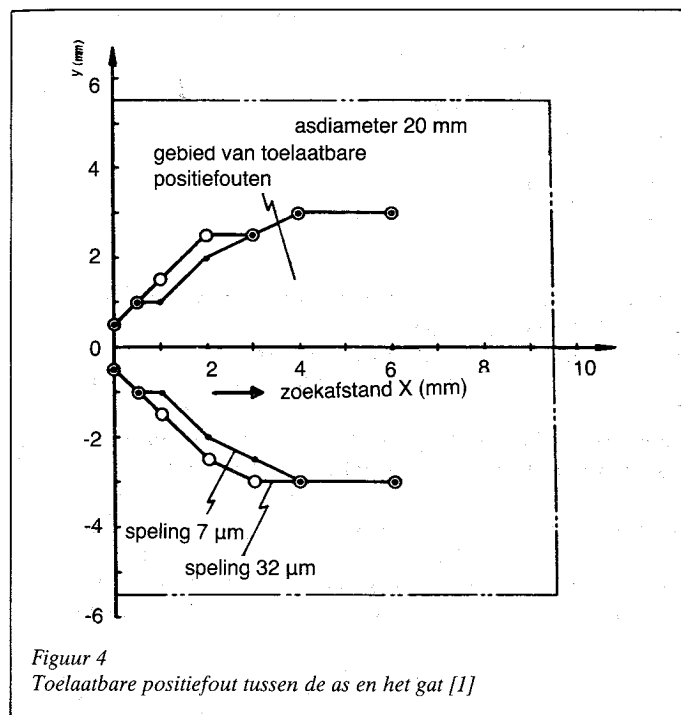
Op een plaatveer zijn vier tactiele sensoren (rekstrookjes) aangebracht, zodanig dat deze in staat zijn de relatieve verplaatsingen in drie asrichtingen (x-y-z) te detecteren. Door gebruik te maken van deze sensoren en de flexibele pols wordt de relatieve positie van de as ten opzichte van het tegenoverliggende gat bepaald en de samenvoeghandeling uitgevoerd na/en door het corrigeren en controleren van de positie en richting van de hartlijn van de as. Een computer is hierbij niet nodig, wel is een volgórde-besturing opgenomen.



Het samenvoegalgoritme

Als afgebeeld in figuur 3 wordt de gehele samenvoeghandeling verdeeld in de volgende drie fasen:

1. contact: de as wordt in z-richting naar beneden bewogen, bewust naast het gat geplaatst en met een bepaalde kracht aangedrukt
2. zoeken: de as wordt rechtlijnig in de richting van het middelpunt van het gat bewogen. Door de flexibiliteit van de pols neemt de as een schuine stand in. Als de astip de gatrand passeert, drukt de veer de as in het gat. Dit wordt waargenomen door de verandering van het sensorsignaal in de z-richting. Hiermee wordt het zoeken beëindigd
3. samenvoegen: wanneer het zoeken beëindigd is, staat de as nog schuin ten opzichte van de hartlijn van het gat. Het samenvoegen wordt in z-richting uitgevoerd na het corrigeren van de radiale fout. Daarvoor worden de sensorsignalen gebruikt die in x-y-richting de relatieve positie weergeven. Als tot het samenvoegen wordt overgegaan bij een onvoldoende correctie in radiale richting, treedt er klemming op die het verder samenvoegen onmogelijk maakt, reden waarom de aandrukkkracht binnen bepaalde grenzen wordt gehouden.



Figuur 4
Toelaatbare positiefout tussen de as en het gat [1]

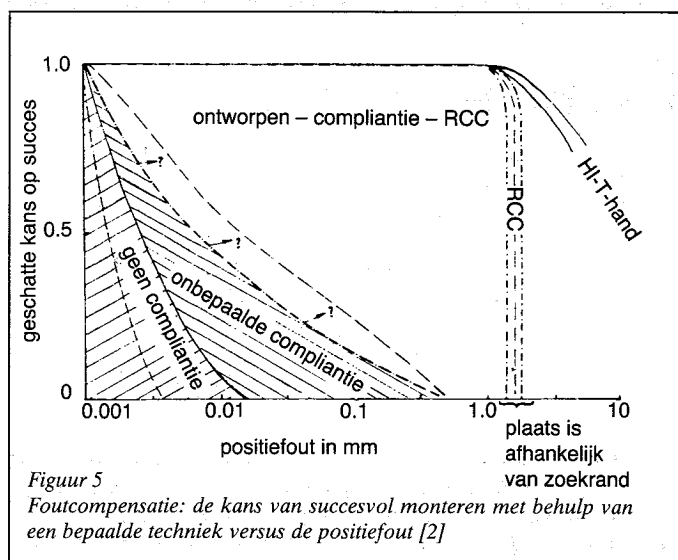
In figuur 4 zijn enkele testresultaten afgebeeld. Uit deze grafiek kan men een indruk krijgen van de toelaatbare positiefout tussen de as en het gat.

(N.B. Deze constructie wijkt af van de nog te bespreken actieve compliantconstructies, doordat in dit geval het gehele robotmechanisme nog bewogen dient te worden om de corrigerende acties uit te voeren.)

Hi-T-Hand versus RCC [2]

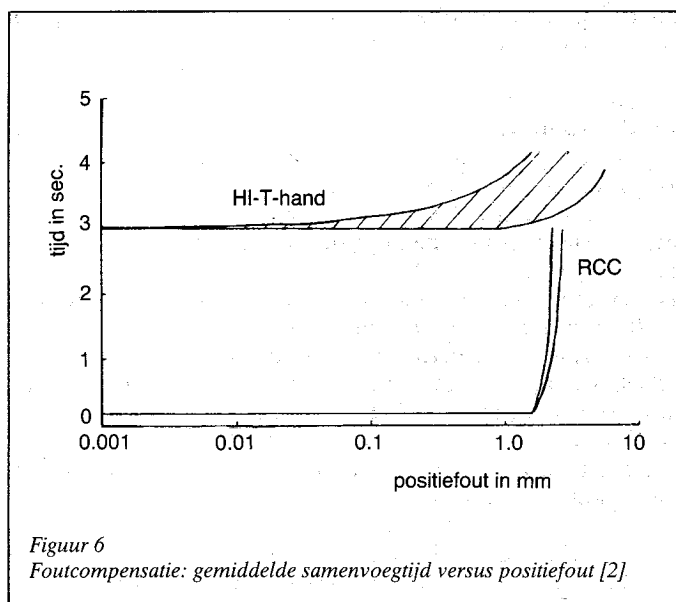
Beide mechanismen dienen positiefouten te kunnen compenseren. Om enig inzicht in de bruikbaarheid te verkrijgen wordt de Hi-T-Hand met de RCC vergeleken voor wat betreft de benodigde samenvoegtijd en de samenvoegkans tegen de optredende positiefout tussen de pen en het gat.

Merk nogmaals op dat de Hi-T-Hand ook in staat is om samen-



Figuur 5
Foucompensatie: de kans van succesvol monteren met behulp van een bepaalde techniek versus de positiefout [2]

voegproblemen op te lossen indien geen afgeschuinde kanten aanwezig zijn (karakteristiek voor de actieve compliant) en grote positiefouten kan compenseren (figuren 4 en 5). Anderzijds is de Hi-T-Hand duidelijk trager (figuur 6). Een derde onderscheid is gelegen in het feit dat de RCC ook negatieve spelingen (klem- en perspassingen) kan verwerken in tegenstelling tot de Hi-T-Hand (figuur 8 in het voorgaande artikel, de Constructeur nr. 2, februari 1984).



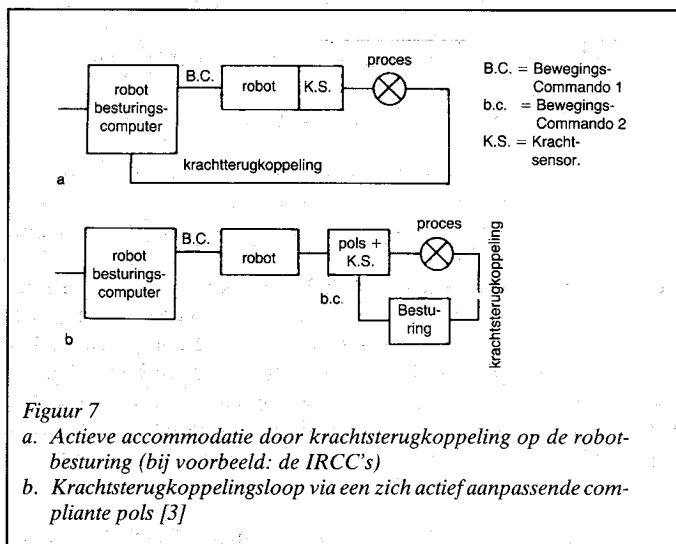
Figuur 6
Foucompensatie: gemiddelde samenvoegtijd versus positiefout [2]

De AACW, (Active Adaptable Compliance Wrist) [3, 4 en 5]

Het nadeel van iedere passieve compliant is het tekort aan flexibiliteit ofwel universaliteit. De beperkingen van een passieve compliant kunnen worden weggelaten door de robot volledig bijstuurbaar te maken (zie de in het vorige artikel besproken IRCC's). Echter deze passieve compliantie kan, zelfs als deze volledig programmeerbaar is, actieve compliantie niet vervangen. In geval van de IRCC's kan de sensorieke positie-informatie worden gebruikt om de positie van de robotgrijper bij te stellen. Daartoe moet dan echter de gehele robotarm verplaatst worden, hetgeen voor de positioneer-nauwkeurigheid en het dynamisch gedrag nadelig is. Door nu de krachtterugkoppeling via de pols te sluiten, kunnen

Problemen bij automatische montage (3)

De actieve compliant



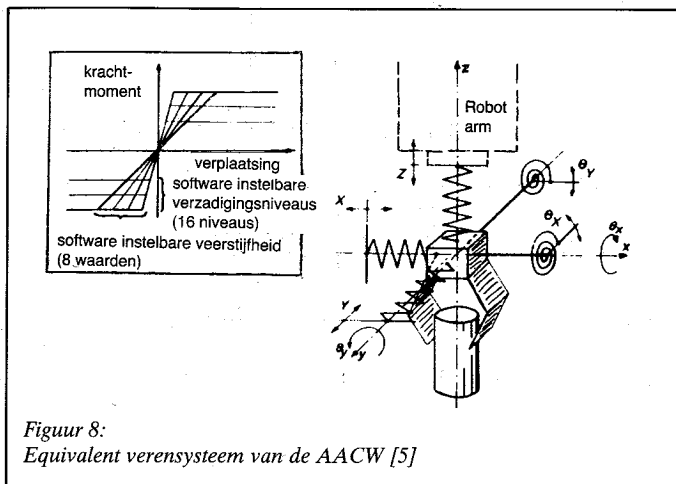
Figuur 7
 a. Actieve accommodatie door krachterugkoppeling op de robotbesturing (bij voorbeeld: de IRCC's)
 b. Krachterugkoppeling via een zich actief aanpassende compliantie pols [3]

relatief eenvoudige algoritmen afgeleid worden om complexe montagehandelingen uit te voeren, zonder voornoemde nadelen (figuur 7). Op deze manier worden de voordelen van passieve en actieve accommodatie in de AACW gecombineerd.

Functiebeschrijving van de AACW

De AACW is een over vijf assen computergestuurd positioneerstelsel. Iedere as wordt aangedreven door een DC-motor via een servo regelkring met plaats- en snelheidssterugkoppeling. De servo-versterkingsfactor en ook het moment-verzadigingsniveau zijn met behulp van software instelbaar.

In figuur 8 is de systeemconfiguratie weergegeven door een gelijkwaardig verensstelsel.



Figuur 8:
 Equivalent verensysteem van de AACW [5]

Voor iedere graad van vrijheid kan het veer-nulpunt, de veerstijfheid en het verzadigingsniveau op ieder moment tijdens de montagehandeling worden ingesteld. De mogelijkheid om de verschillende veerstijfheden in te stellen levert een compliantstructuur op met variabele compliantiematrix. Dit laatste elimineert een van de bezwaren van specifieke complianten.

Door het instellen van de verzadigingsniveaus van de veren kan de dubbelzinnigheid in interpretatie van de krachtsvector (zijdelingse positiefout en/of hoekfout?), die optreedt tijdens klemmingsituaties, worden weggenomen. Door het instellen van de nulpunten van de veren in de richtingen van verschillende graden van vrijheid, kunnen verplaatsingen worden uitgevoerd of krachten worden aangebracht waardoor actieve accommodatie algoritmen toegepast kunnen worden.

Vanzelfsprekend kan deze AACW tegelijk dienen als krachtsensor, waarbij de motorstromen gebruikt worden om de krachtinformatie te verkrijgen. Het is een voordeel van dit systeem dat de kracht gedefinieerd wordt in het coördinatenstelsel van de pols.

Montage-experimenten met de AACW

De praktische bruikbaarheid van de AACW werd gedemonstreerd door de resultaten van een montage-experiment, bestaande uit de plaatsing van een kogellager in een nauwkeurig getolereerde boring (speling 10-30 µm).

Montage werkwijzen

De twee hoofdproblemen die bij de montage van nauwkeurig passende onderdelen overwonnen moeten worden zijn:

- de naderingsstrategie
- de samenvoeging.

De naderingsstrategie

Er bestaan meerdere oplossingen om de bodemrand van de pen binnen de gatgrenzen te brengen. Voor componenten met zoekranden kan een eenvoudige 'afwijking opheffen'-strategie, passief zowel als actief worden toegepast.

a. De zuiver passieve accommodatie

Om ongewenste rotaties onder invloed van de contactkrachten te vermijden (er is hier geen sprake van een compliantiecentrum) wordt een veerconfiguratie toegepast met een veel grotere stijfheid om de rotatie-assen dan in de zijdelingse assen. Voor zijdelingse assen moet de veer karakteristiek bij een relatief laag maximum worden verbroken om te voorkomen dat te grote krachten worden opgebouwd. Samengevat wordt de volgende configuratie gewenst:

assen	stijfheid	verzadigingsniveaus
x	klein	laag
y	klein	laag
θ_x	groot	hoog
θ_y	groot	hoog
z	normaal	normaal

Figuur 9 [3]

b. De zuiver actieve accommodatie

Het actieve accommodatie-algoritme bestaat, in dit relatief eenvoudige geval (met een inloopafrondding aan het kogellager), enkel uit het programmeren van een software compliantiematrix. Om de pen zijdelings te verplaatsen, op grond van de uitgeoefende contactkrachten, kan de volgende compliantie-matrixvergelijking worden toegepast:

krachten beneden een vooraf ingestelde drempelwaarde vallen.

Trigonometrische berekeningen tonen aan dat de toelaatbare fout van de aanvangspositie van de pen meer dan tienmaal zo groot mag zijn. Figuur 11 toont de optimale waarde van deze hoekverdraaiing die tussen 10 en 15 graden ligt.

De samenvoeging

Het belangrijkste probleem tijdens de voortgaande samenvoeging is het optreden van twee-puntscontact.

De eenvoudigste techniek om het probleem van twee-puntscontact aan te pakken zou zijn het geven van een zijdelingsecorrectie die direct afgeleid is van de krachtinformatie.

Deze techniek is echter ongeschikt gebleken vanwege de niet-éénduidige relatie tussen de gemeten krachten en het type uitlijnfout.

Deze problemen worden omzeild door de eerder beschreven passieve systemen (zie: de Constructeur nr. 2, februari 1984). De AACW combineert de voordelen van actieve en passieve ontwerpen door een programmeerbare compliantie. Hiertoe kunnen verschillende strategieën toegepast worden. Om enig inzicht te verschaffen wordt een algemene strategie beschreven. Voor meer verfijnde strategieën, inclusief leersystemen, wordt verwezen naar de literatuur [3, 4, 5].

Het volgende zoekalgoritme maakt volledig gebruik van de eigenschappen van de AACW. De dubbelzinnigheid in het verband tussen de krachten en de uitlijnfout wordt opgelost door het observeren van het verloop van de gemeten krachtsvector. Als een zijdelingse kracht op de pen wordt uitgeoefend zal deze zichzelf willen uitlijnen in de richting van de kracht zodra een bepaald krachtniveau wordt overschreden. Dit feit vormt de grondslag voor het volgende.

De krachtruimte wordt in drie zones verdeeld (figuur 12). In zone 1 worden de krachten F_x en F_y voldoende klein geacht om de samenvoeging voort te zetten. In zone 2 zijn de zijdelingse krachtscomponenten F_x en F_y te klein om bruikbare informatie te verstrekken omtrent de uitlijning van de pen. In zone 3 zijn de krachten groot genoeg om een voldoende samenhang tussen de kracht en de uitlijnfout op te leveren. Tijdens de samenvoegbeweging wordt de krachtsvector continu waargenomen om te controleren of iedere krachtscomponent binnen zone 1 blijft. Als zone 2 wordt bereikt, wordt de samenvoegbeweging gestopt en een zijdelingse polsbeweging uitgevoerd. Als dan de kracht terugvalt binnen zone 1 wordt de samenvoeging voortgezet. Als echter zone 3 wordt bereikt, wordt de richting van de corrigerende actie

$$\begin{matrix} X \\ y \\ \theta_x \\ \theta_y \\ z \end{matrix} = \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & a_{14} & 0 \\ 0 & 0 & a_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \cdot x \cdot \begin{matrix} F_x \\ F_y \\ M_{Bx} \\ M_{By} \\ F_z \end{matrix}$$

Figuur 10 [3]

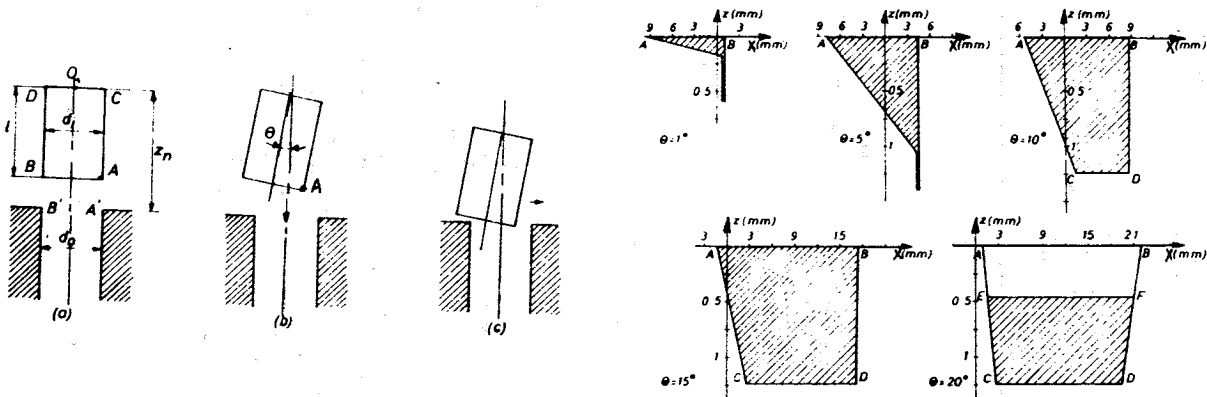
Aangezien in dit stadium de krachten op de pentip werken, worden de momenten M_{Bx} en M_{By} gebruikt om de beweging te geleiden. Bij toepassing van actieve accommodatie kan aan iedere as de grootste stijfheid en het hoogste verzadigingsniveau worden gegeven.

Voor componenten zonder zoekranden en met nauwkeurige toleranties is een gecompliceerdere strategie nodig. Beschouwen we de pen op een nominale afstand van $(z_n - l)$ van het gat (figuur 11a). Zonder speciale voorzorgsmaatregelen is de nauwkeurigheid van de robot niet voldoende om de bodemrand van de pen binnen de gatgrenzen te plaatsen. Door de pen een hoekverdraaiing te geven is de toelaatbare fout in de positie van de pen aanzienlijk groter; alleen punt A hoeft binnen de gatgrenzen te worden geplaatst (figuur 11). Na een beweging in de inzetriching gemaakt te hebben over de nominale afstand $(z_n - l)$, wordt in één punt contact gemaakt door middel van een zijdelingse beweging, overeenkomstig de richting van de hoekverdraaiing.

Het herstellen van de oorspronkelijke hoekpositie zou een moeilijk te programmeren beweging van de rotatie en lineaire assen vereisen, die in het geval van de-synchronisatie van de bewegingen ongewenste contacten aan de tegenoverliggende zijde zou veroorzaken of het uit het gat springen aan de contactzijde.

Deze problemen kunnen worden voorkomen door de rotatie assen juist zoveel corrigeren als nodig is om de pen in zijn oorspronkelijke hoekpositie te brengen. Door het lage verzadigingsniveau dat aan deze assen gegeven wordt, treden er nooit grotere contactkrachten op dan overeenkomen met deze verzadigingsniveaus.

Als nu een zijdelingse beweging wordt begonnen om de pen te heroriënteren wordt er contact gehouden dank zij de veerwerking. Het einde van de correctiefase wordt bereikt als de contact-



Figuur 11
Naderingsstrategie voor gaten zonder zoekranden. Toegestane positie-onzekerheid van de pen als functie van de hoekverdraaiing [3]

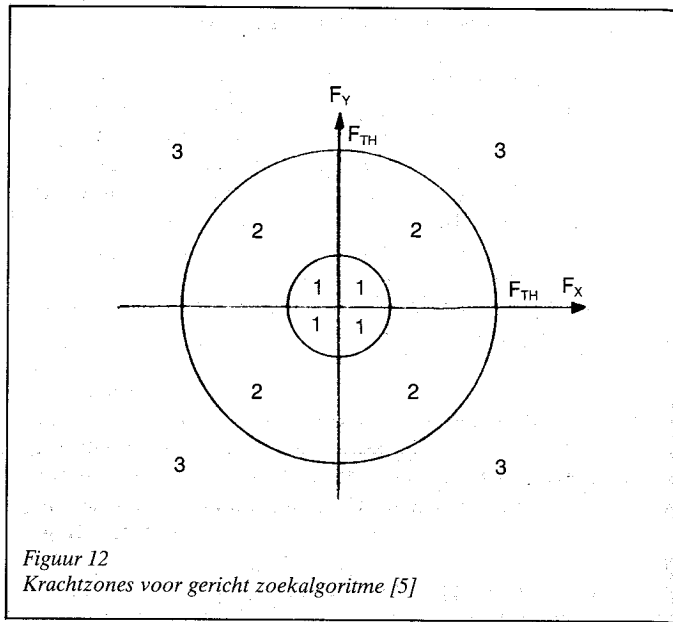
Problemen bij automatische montage (3)

De actieve compliant

gewijzigd in een richting die door de F_y/F_x verhouding wordt gegeven.

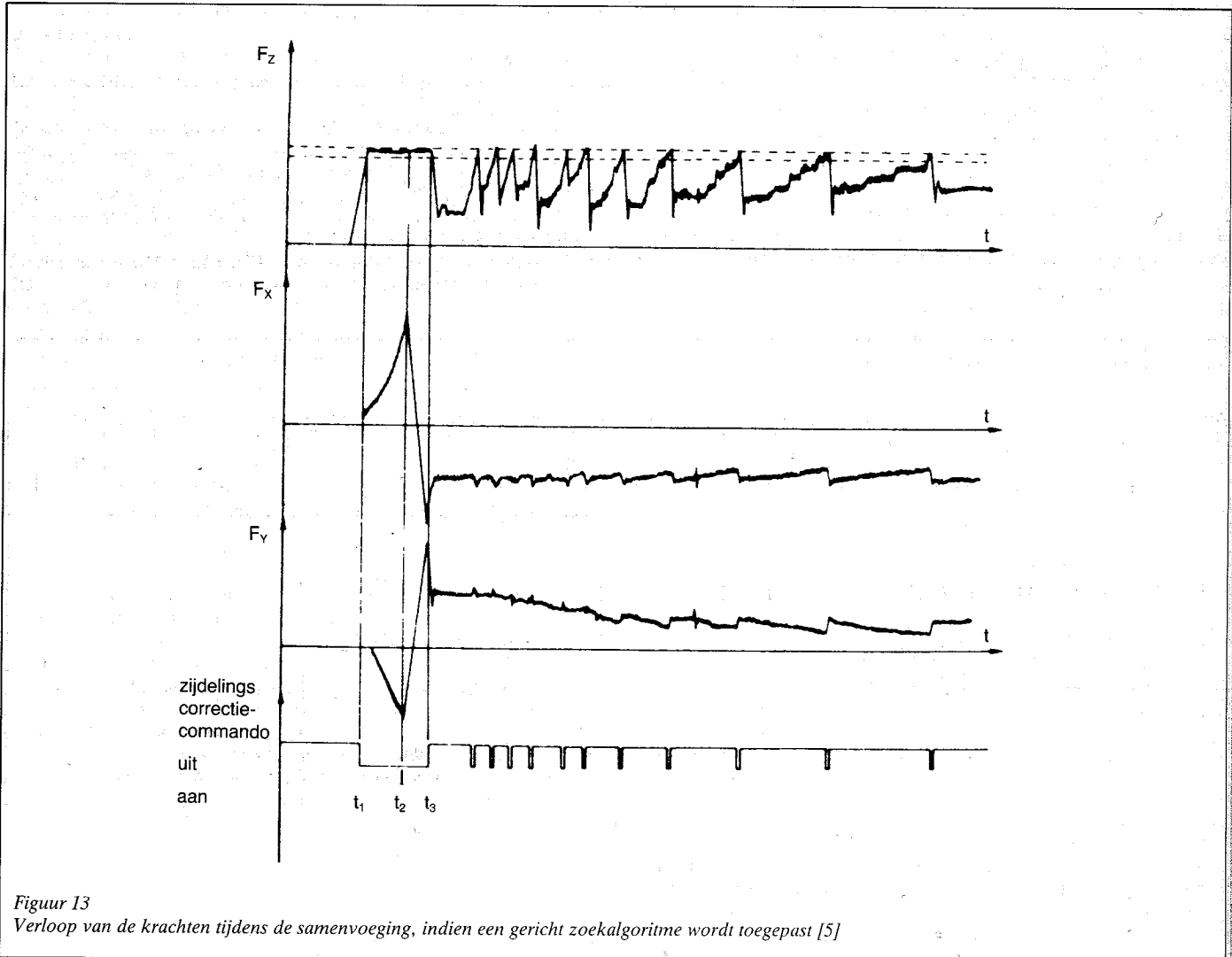
Figuur 13 toont het verloop van de inzetkracht F_z en de zijdelingse krachtcomponenten F_x en F_y tijdens de samenvoeging. Op het tijdstip t_1 neemt de kracht in z-richting sterk toe door optredend twee-puntscontact. Het toenemen van de krachten F_x en F_y duidt erop dat de aanvankelijk gemaakte zijdelingse beweging de pen niet uitlijnt, maar de krachtsvector in de buitenste zone van de krachtsruimte brengt (tijdstip t_2).

Een nieuwe richting wordt berekend aan de hand van de zijdelingse krachtscomponenten F_x en F_y , die een betere overeenkomst bezitten met de eigenlijke uitlijnfout en daarom ook tot een succesvolle heruitlijning leiden (tijdstip t_3). Dezelfde procedure wordt herhaald wanneer de samenvoegkracht (is de kracht in z-richting) zijn drempelwaarde overschrijdt. Dit leidt tot een serie van snelle correcties.



Figuur 12
Krachtzones voor gericht zoekalgoritme [5]

In de onderste grafiek van figuur 13 geeft de breedte van de pulsen de tijd weer waarin de zijdelingse correctie plaats vindt. Een moeilijkheid bij dit algoritme is dat de grenzen van de krachtzone willekeurig gekozen moeten worden. Deze zijn afhankelijk van de wrijvingsomstandigheden die niet geheel bekend zijn. Dit probleem wordt opgelost met behulp van zogenaamde leersystemen.



Figuur 13
Verloop van de krachten tijdens de samenvoeging, indien een gericht zoekalgoritme wordt toegepast [5]

De exacte mathematische vergelijkingen van een robotarmbeweging, die alle dynamische parameters en niet-lineariteiten in rekening brengen, worden snel te complex om van praktisch nut te zijn. Overeenkomstige problemen treden op in het beschrijven van een 'real world'-werkomgeving hetgeen te wijten is aan de enorme hoeveelheid van veelal onbekende parameters. Een ernstiger geval van gebrek aan voorkennis treedt op bij het interpreteren van de gemeten terugkoppelsignalen in de zogenaamde hogere niveaus-taken, zoals bij voorbeeld het inzetten van een pen in een gat of het grijpen van een broos voorwerp.

Vanuit besturingsoogpunt kan men op een hoger robotintelligentieniveau een hiërarchische schikking van terugkoppelloops onderscheiden (figuur 14). Het laagste niveau wordt gevormd door een eenvoudige terugkoppelvorm met een vaste relatie tussen input en output. De mathematische beschrijving van dit regelproces moet volledig bekend zijn om in staat te zijn deze terugkoppeling te ontwerpen.

In de tweede terugkoppelloop, de zogenaamde aanpassingsloop, wordt het uit te voeren proces aan de hand van enkele criteria

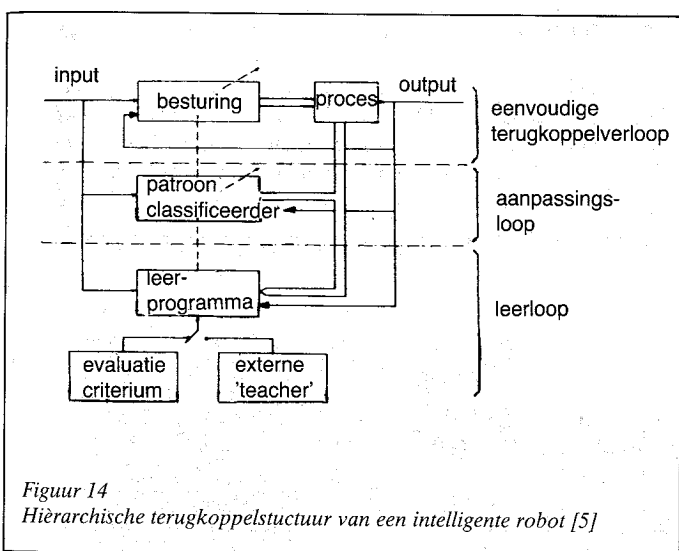
verder bepaald en vervolgens wordt de fundamentele besturingsstructuur van de terugkoppeling aangepast aan de feitelijke toestand van dit proces. Alhoewel het niet langer noodzakelijk is de dynamische karakteristieken van het proces exact te kennen, is het nog steeds nodig om te weten hoe de fundamentele besturingsalgoritmen moeten worden beïnvloed door de gemeten signalen.

De derde loop, de 'leer'-loop, leert de aanpassingsloop hoe de fundamentele besturing te wijzigen om een optimale besturing te verkrijgen. Deze leerloop is duidelijk te onderscheiden van de twee lagere niveaus door een toegevoegde 'teacher'-input, die de kwaliteit van de door het systeem uitgevoerde taken evalueert. De aldus door het leersysteem opgedane ervaring verbetert geleidelijk het gedrag.

Het vermogen van leersystemen om problemen te hanteren, met enkel een beperkte voorkennis, maakt deze wijze van benadering interessant voor een automatische besturing.

Door toepassing van leertechnieken kunnen krachtdrempelwaarden automatisch worden aangepast aan de feitelijke werkomstandigheden.

(wordt vervolgd)



Figuur 14
Hiërarchische terugkoppelstructuur van een intelligente robot [5]

Literatuur

- [1] Goto, T., Inoyama, T., Takeyasu, K., *Precise insert operation by Tactile Controlled Robot*, Second Conference and Industrial Robot Technology
- [2] Nevins, J.L., Whitney, D.E., *Assembly Research*, The Industrial Robot, maart (1980)
- [3] Brussel, H. van, Simons, J., *The adaptable compliance concept and its use for automatic assembly by active force feedback accommodations*, Ninth International Symposium on Industrial Robots
- [4] Brussel, H. van, Thielemans, H., Simons, J., *Further development of the Active Compliant Wrist for robot assembly*, Eleventh International Symposium on Industrial Robots
- [5] Brussel, H. van, Simons, J., *A self-learning robot for automatic assembly*, First Conference on Assembly Automation

BESPREKING BOEKBESPREKING BOEKBESPREKING

Kunststoff Taschenbuch

H. Saechling
Carl Hanser Verlag, München, 1983
22e druk, 157 figuren, 132 tabellen
DM 48,-

Het is verrassend te lezen dat de eerste druk van dit Taschenbuch uitkwam in 1936. In het voorwoord schreef men toen dat dit boek vragen dient te beantwoorden afkomstig uit de 'toepassingsgebieden van kunststoffen'. Een kleine vijftig jaar later is dit nog steeds het uitgangspunt van dit boekwerk: een complete inleiding te zijn in de technologie en materiaalkunde van kunststoffen en tegelijkertijd een naslagwerk dat qua omvang, prijs en uitvoering voor iedereen toegankelijk is.

In deze opzet is men zeker geslaagd. Het is een handzaam boek, rijklijk geïllustreerd en barstensvol informatie. De verschillende hoofdstukken zijn gemakkelijk te vinden door uitsparingen in de pagina's. Onderwerpen die aan de orde komen zijn onder meer: algemene kunststoffenkunde; technologie van kunststoffen, waaronder bij voorbeeld valt omvormen, extruderen en lijmen; voorts worden de kunststoffen afzonderlijk onder de loep genomen; er is een hoofdstuk over normering en kwaliteitsbewaking en één over het beproeven van kunststoffen en ook wordt een overzicht gegeven van de handelsnamen die gebruikt worden, evenals een overzicht van de leveranciers.

ir. L.J. de Ridder