

Constructies voor het nauwkeurig bewegen en positioneren (9)

P.C.J.N. Rosielle, E.A.G. Reker,
M.P. Koster

Manipuleren en instellen

Om de positie van een star lichaam in de 3D-ruimte aan te geven zijn 6 onafhankelijke coördinaten nodig. Deze onafhankelijke coördinaten zijn de graden van vrijheid. Het instellen van de positie houdt in het vastleggen van deze graden van vrijheid ten opzichte van een ander lichaam.

Vaak stelt men hoge eisen aan de nauwkeurigheid van de instelling. Het instellen geschiedt dan door tussenkomst van een manipulator. Het lichaam wordt in de manipulator geplaatst; het staat dan reeds in de buurt van de bedoelde plaats. Daarna wordt het over relatief kleine slagen en hoeken, naar de juiste plaats *gemanipuleerd*. Tenslotte volgt de *overname*, vanuit de manipulator naar de omgeving ten opzichte waarvan werd gepositioneerd, waarbij het de bedoeling is dat deze overname, c.q. fixatie, zonder plaatsverandering geschiedt.

Instelprocedure

In figuur 87 is een manipulator afgebeeld, waarmee men de coördinaten x, y, z, ϕ, ψ en θ , de vrijheidsgraden van

het te positioneren lichaam, wil instellen door het geven van de ingaande verplaatsingen u_1, u_2, v_1, w_1, w_2 en w_3 . Wanneer men de uitgaande verplaatsingen $(x, y, z, \phi, \psi, \theta)$ *achtereenvolgens* bepaalde waarden wil geven, dan ontstaat bij deze manipulator een probleem. Elk van de uitgaande verplaatsingen is namelijk een functie van *alle* ingaande verplaatsingen.

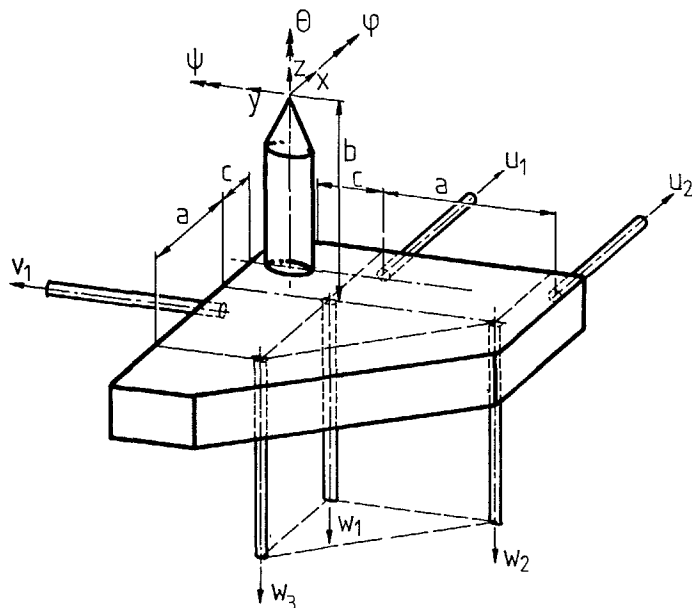
Wil men een bepaalde grootte instellen, dan is ten eerste niet duidelijk welke ingaande verplaatsingen men zal verrichten en in welke mate. Ten tweede worden bij de instelling van een uitgaande coördinaat de reeds verrichte instellingen verstoord. Zodoende wordt het instellen een iteratief proces. De vraag doet zich voor of er een instelprocedure te vinden is, en zo ja, of er een is die snel naar het gewenste doel voert; met andere woorden of de instelprocedure convergerend is en in welke mate.

Convergerende instelprocedure

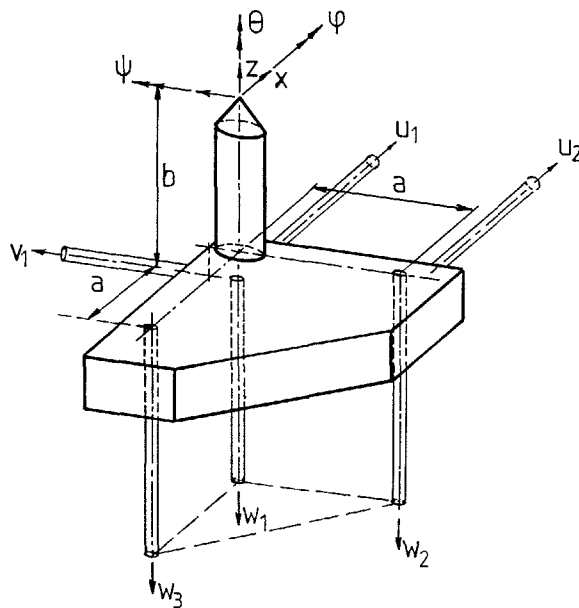
Bij *achtereenvolgens* instellen (met de hand), zal men de dan verlangde sterke convergentie van de instelprocedure slechts kunnen bereiken, als elke volgende instelling de reeds gepleegde instellingen niet verstoort. Dat is het geval als de manipulator zodanig is geconstru-

eerd dat elke ingaande beweging, die voor de eerste keer tijdens de instelprocedure wordt bewogen, verantwoordelijk kan worden gesteld voor slechts één uitgaande coördinaat. Figuur 88 toont een dergelijke manipulator, die uit figuur 87 is ontstaan door $c = 0$ te maken. Door het kiezen van een geschikte procedure behoeft er slechts één iteratieslag te worden gemaakt. Bijvoorbeeld, stel z in met w_1 daarna ϕ met w_2 dan ψ met w_3 dan x met u_1 , dan y met v_1 , dan tenslotte θ met u_2 . Er zijn nog meer goede mogelijkheden: bijvoorbeeld $z, \psi, \phi, y, x, \theta$ of $z, \psi, x, \phi, y, \theta$ of $z, \phi, y, \psi, x, \theta$.

Een welbekend voorbeeld van een convergerende instelprocedure is het instellen van de ontsteking van een benzinemotor. De twee in te stellen vrijheidsgraden zijn de contacthoek (de lichthoogte) en het ontstekingstijdstip. Men *begint* met het instellen van de lichthoogte, door het vaste contact over de grondplaat te verschuiven. Daarna wordt de, om de nokkenas gecentreerde, grondplaat verdraaid om het tijdstip in te stellen. Deze laatste instelling wijzigt de vorige niet (als de grondplaat met een voldoende nauwkeurige passing is gecentreerd en de nokkenas voldoende weinig speling heeft).



Figuur 87



Figuur 88

Transformatiematrix

Bij een manipulator kan men een vector (pijl) definiëren die bestaat uit componenten in een zelf gekozen volgorde in een kolom. De componenten stellen de ingaande beweging voor. Bijvoorbeeld kiezen we bij figuur 87 (schematische voorstelling van een manipulator) de vector

$$q_i = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

Ook de positie van de uitgaande beweging is vast te leggen door het kiezen van een vector, bijvoorbeeld:

$$q_u = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \varphi \\ \psi \\ \theta \end{bmatrix}$$

Iedere (uitgaande) component van q_u is te schrijven als een zogenaamd de lineaire combinatie van alle ingaande vectorcomponenten.

Bijvoorbeeld:

$x = A_{11}u_1 + A_{12}v_1 + A_{13}w_1 + A_{14}w_2 + A_{15}w_3 + A_{16}u_2$ waarin A_{11} t/m A_{16} getallen zijn die aangeven in welke mate x afhangt van de betreffende component van q_i . Voor de altijd kleine verplaatsingen die bij manipulators aan de orde zijn, geldt bij figuur 87:

$$A_{11} = \frac{c+a}{a}, A_{12} = 0$$

(x is dus niet afhankelijk van v_1)

$$A_{13} = \frac{-b}{a}, A_{14} = 0$$

(x is dus niet afhankelijk van w_2)

$$A_{15} = \frac{-b}{a}, A_{16} = \frac{-c}{a}$$

Transformatiematrix

Voor de omschrijving van het probleem van de instelprocedure en het onderzoek naar de convergentie wordt gebruik gemaakt van de transformatiematrix $[T]$ van de manipulator. Als $[q_i]$ en $[q_u]$ de vectoren zijn van de ingaande respectievelijk de uitgaande verplaatsingen, dan geldt:

$$[q_u] = [T] [q_i]$$

Een rationele aanpak is, gegeven de beoogde instelling $[q_u]$, de daarbij behorende combinatie van ingangsbewegingen $[q_i]$ te berekenen volgens

$$[q_i] = [T]^{-1} [q_u]$$

De volgorde waarin men de instelling $[q_i]$ maakt is niet van belang.

De instelprocedure, het algoritme, kan men onderbrengen in een microprocessor, zodat het systeem van figuur 89 ontstaat. De communicatie met de manipulator geschiedt dan geheel in termen van de uitgaande coördinaten $[q_u]$

A_{11} t/m A_{16} zijn dus uitgedrukt in de afmetingen a, b, c die voor de manipulator figuur 87 bekend verondersteld worden. In het algemeen is er een uit de geometrie af te leiden relatie tussen q_u en q_i . Schrijven we ook de rest op voor figuur 87 dan krijgen we:

$$\begin{aligned} x &= A_{11}u_1 + A_{12}v_1 + A_{13}w_1 + A_{14}w_2 + A_{15}w_3 + A_{16}u_2 \\ y &= A_{21}u_1 + A_{22}v_1 + A_{23}w_1 + A_{24}w_2 + A_{25}w_3 + A_{26}u_2 \\ z &= A_{31}u_1 + A_{32}v_1 + A_{33}w_1 + A_{34}w_2 + A_{35}w_3 + A_{36}u_2 \\ \varphi &= A_{41}u_1 + A_{42}v_1 + A_{43}w_1 + A_{44}w_2 + A_{45}w_3 + A_{46}u_2 \\ \psi &= A_{51}u_1 + A_{52}v_1 + A_{53}w_1 + A_{54}w_2 + A_{55}w_3 + A_{56}u_2 \\ \theta &= A_{61}u_1 + A_{62}v_1 + A_{63}w_1 + A_{64}w_2 + A_{65}w_3 + A_{66}u_2 \end{aligned}$$

Dit stelsel van zes vergelijkingen kan in een nieuwe notatie worden geschreven:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \varphi \\ \psi \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} & A_{26} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} & A_{36} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} & A_{46} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & A_{55} & A_{56} \\ A_{61} & A_{62} & A_{63} & A_{64} & A_{65} & A_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

Deze notatie heet de matrixnotatie en het blok met alle A 's daarin heet een matrix. Het is een zogenaamde transformatiematrix (vandaar de naam T) die ons vertelt wat de gevolgen zijn voor de uitgang wanneer wij aan de (ingangs)knoppen van de manipulator draaien. Er bestaat ook een zogenaamde inverse matrix die q_i uitdrukt in q_u . De inverse van matrix T wordt genoteerd als T^{-1} . Als je die bepaald hebt voor een manipulator dan kun je voor een gewenste uitgaande verstelling de benodigde ingang berekenen. In de volgende aflevering komen voorbeelden van manipulators. Je kunt met enige moeite een manipulator zodanig ontwerpen dat de matrix eenvoudig is: bijvoorbeeld zo dat alle componenten (A 's) gelijk aan nul zijn behalve die op de zogenaamde hoofddiagonaal (dit zijn de componenten $A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{44}, A_{55}, A_{66}$). Qua instellen is het dan gemakkelijk. Helaas is de manipulator dan ingewikkeld en niet erg stijf.

Als alternatief kun je een mechanisch eenvoudige zeer stijve manipulator ontwerpen die dan helaas een ingewikkelde matrix T heeft (weinig of geen termen (A 's) gelijk aan nul). Daarover meer concreet in de volgende aflevering.

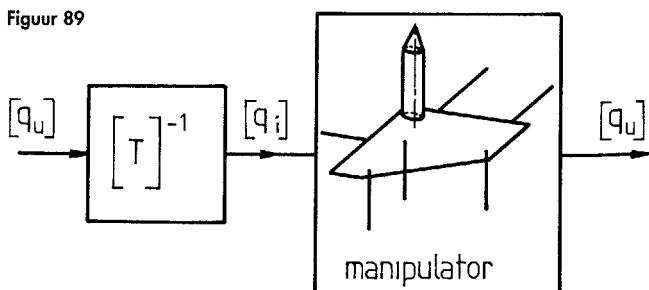
Onafhankelijke instellingen

Construeert men een manipulator waarin elke uitgaande coördinaat slechts een functie is van één ingaande, dan zijn alle instelhandelingen onafhankelijk. Van een voorgeschreven instelprocedure is dan geen sprake meer. Slechts de hoofddiagonaal van de transformatiematrix T is gevuld; er is sprake van volledige ontkoppeling, de instelvolgorde is geheel vrij. De constructie is helaas zeer ingewikkeld.

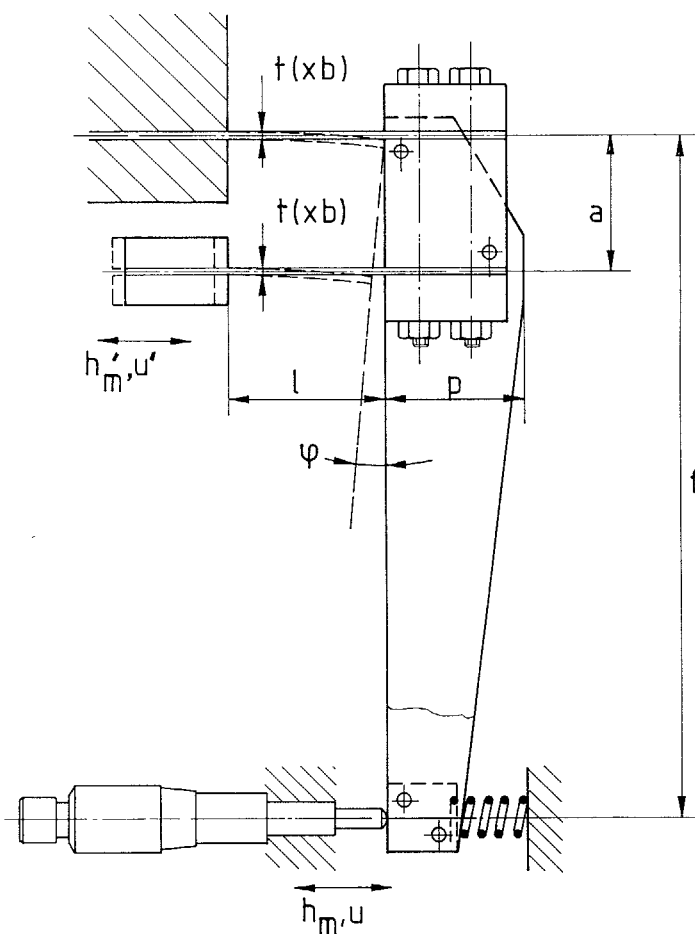
Men dient zich te realiseren dat de oplossing van figuur 89 ook een volledige

ontkoppeling levert. Het alternatief van figuur 89 geeft de constructeur meer vrijheid om een manipulator te construeren die in de gegeven ruimte past, die optimaal is ten aanzien van stijfheid en eenvoudig van opbouw is. Daar staat meer inspanning ten aanzien van de besturing tegenover. Bij het construeren van manipulators zal men steeds de afweging moeten maken in hoeverre men ontkoppeling wil en of men de ontkoppeling mechanisch, respectievelijk met behulp van software, dan wel in een mengvorm wil realiseren.

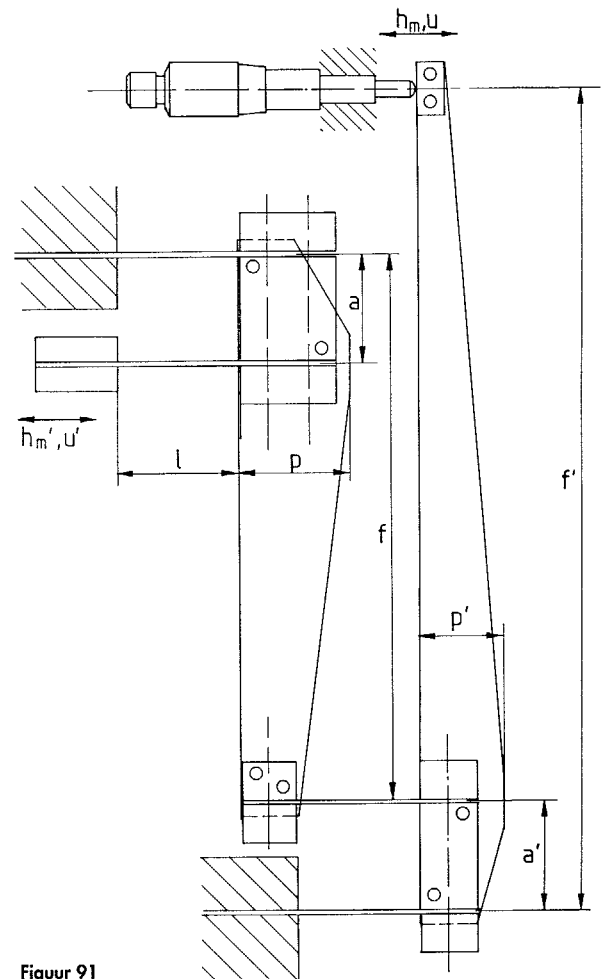
Figuur 89



Manipuleren en instellen (deel 1)



Figuur 90



Figuur 91

Meertrapsinstellingen en actuatorkwaliteit

Bij het ontwerp van een manipulator staat steeds de vraag voorop welke uitgaande slag (h'_m) hij moet kunnen maken en welke daarbij de instelfout ($\pm u'$) mag zijn. Kijken we naar de verhouding plaatsfout/slag u'/h'_m

dan stellen wij vast, dat deze grootheid niet door de manipulator wordt bepaald. Immers, als i de (constante) overbrengingsverhouding is van een (lineaire) manipulator, dan geldt aan de ingangskant: $u = u'/i$ en $h_m = h'_m/i$, zodat $u'/h'_m = u/h_m$.

Aan de orde is de vraag welke waarde van de onnauwkeurigheid ten opzichte van de slag de aandrijvende actuator zal leveren. Wij definiëren de actuatorkwaliteit als volgt
instelfout/slag = u/h_m . (1)
Tabel 1 geeft enige numerieke waarden.
Roterende actuatoren zijn in dit opzicht in het voordeel.

Willen wij een u/h_m -waarde bereiken die beter is dan hetgeen de beschikbare actuator kan leveren, dan kunnen wij onze toevlucht nemen tot een meertrapsinstelling.

Stel dat beschikbare actuatoren een actuatorkwaliteit $(u/h_m)_{act}$ hebben en stel dat de instelling geschiedt in twee trappen (act betekent actuator).

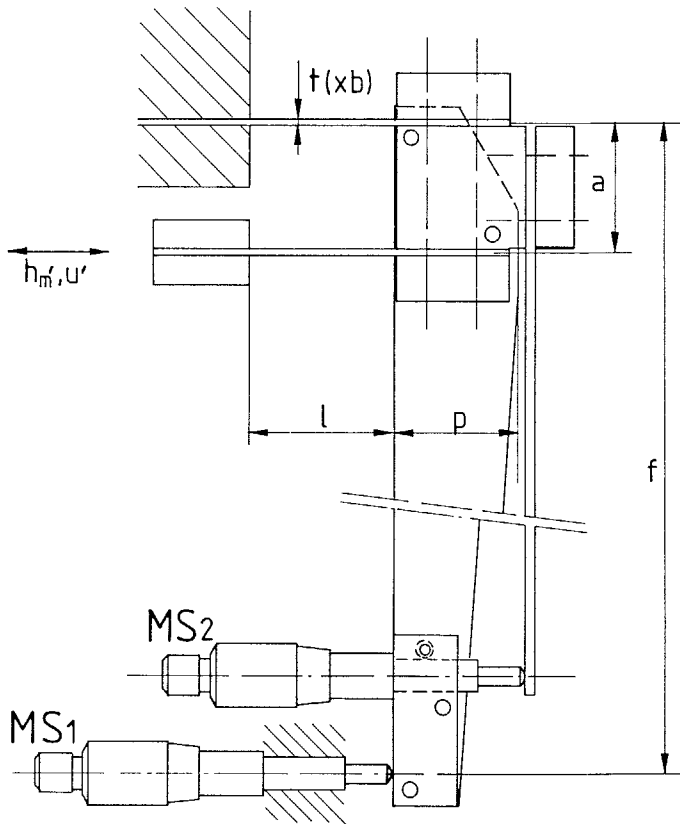
Voor de eerste trap geldt:
 $u'_1/h'_{m1} = (u/h_m)_{act}$

Voor de tweede trap geldt:
 $u'_2/h'_{m2} = (u/h_m)_{act}$

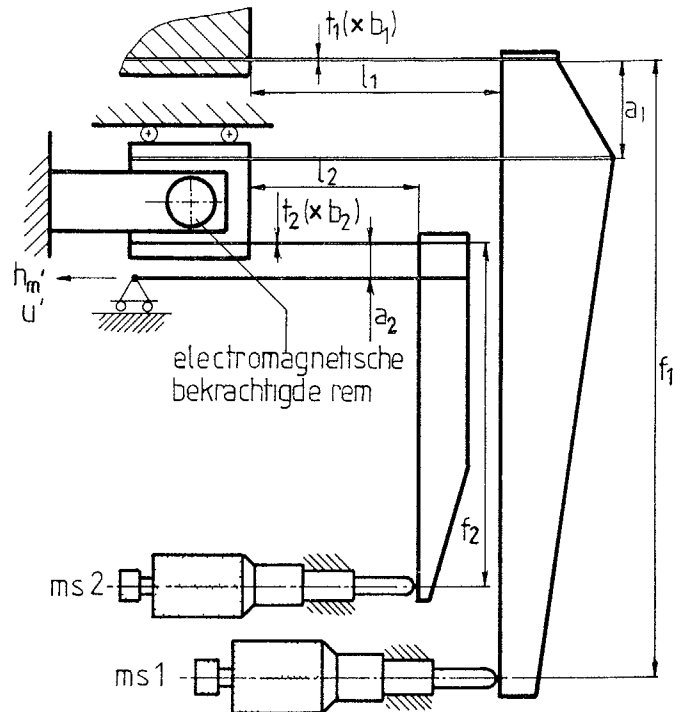
Tabel 1

Actuator	Slag h_m [mm] of [rad]	Instelfout u [mm] of [rad]	$\left[\frac{u}{h_m} \right]_{act}$
stelschroef)	20 mm)	$25 \cdot 10^{-3}$ (20° , spoed 0,5 mm)	$1,25 \cdot 10^{-3}$
schroefmaat	25 mm	$10 \cdot 10^{-3}$ mm	$4 \cdot 10^{-4}$
motormike*	20 mm	10^{-3} mm	$5 \cdot 10^{-5}$
stappenmotor	—	200 st/omw = $3 \cdot 10^{-2}$ rad	0
gelijkstroommotor met optische encoder	—	1000 st/omw = $6 \cdot 10^{-3}$ rad	0

*Dit is een gelijkstroommotor plus tandwielkast van circa 500 1 gekoppeld aan een schroefmaat



Figuur 92



Figuur 93

Verder moet men ervoor zorgen dat de instelfout van trap 1 (u'_1) kleiner is dan de slag h'_{m2} van trap 2

$$u'_1 < h'_{m2}, \text{ dus}$$

$$(u/h_m)_{act} h'_{m1} < u'_2 (h_m/u)_{act}, \text{ dus}$$

$$\frac{u'_2}{h'_{m1}} > \left[\frac{u}{hm} \right]_{act}^2$$

Een tweetrapsinstelling geeft dus een kwadratische verbetering van de beschikbare $(u/h_m)_{act}$. Voor een n-trapsinstelling, met in elke trap een actuator van dezelfde kwaliteit, geldt:

$$\frac{u'_n}{h'_m} > \left[\frac{u}{h_m} \right]_{act}^n \quad (2)$$

De keuze van de overbrengingsverhoudingen in de diverse trappen is op u'_n/h'_m niet van invloed.

Dimensionering van manipulators

Figuur 90 toont een eentrapsmanipulator van een vrij algemeen bruikbaar type

Ten aanzien van de elastische elementen geldt:
 $t/\ell < 2\sigma/(E\phi)$. (3)

Hierin is $\sigma < \sigma_w$ (σ_w is de wisselvermoeiingsgrens) als de manipulator herhaaldelijk wordt gebruikt, respectievelijk $\sigma < \sigma_v$ (σ_v is de elasticiteits- of vloeigrens) als de manipulator slechts éénmaal wordt gebruikt.

Het te manipuleren voorwerp ondervindt in het algemeen wrijving (W) ten opzichte van zijn omgeving. Er is dan sprake van virtuele speling ter grootte $s_v = 2W/c$, als c de aan de uitgang (U) gemeten stijfheid is.

Als de totaal toegestane instelfout aan de uitgang gelijk is aan u' en de actuator introduceert aan de ingang een instelfout u , dan geldt

$$\begin{aligned} u' &= u + s_v/2 \\ u' - u &= W/c \end{aligned} \quad (4)$$

Als $a \ll f$, zie figuur 90, dan geldt bij benadering dat de stijfheid van de manipulator, ter plaatse U is:
 $c = E.tb/(2\ell)$. (5)

Uit (4) en (5) volgt:
 $E.tb/(2\ell) = W/(u' - u)$. (6)

Voor de uitgaande slag geldt:

$$\begin{aligned} h'_m &= \phi a, \\ \text{zodat in plaats van (3) wordt geschreven:} \\ t/\ell &< 2(\sigma/E)(a/h'_m). \end{aligned} \quad (7)$$

Uit (6) en (7) volgt de ontwerpregel voor de manipulator van figuur 90

$$ab > (W/\sigma)(h'_m/(u' - u)). \quad (8)$$

Gegeven de slag (h_m) van de beschikbare actuator was de overbrengingsverhouding ($t = a/f$) reeds bepaald. Gegeven de beschikbare ruimte voor f volgt hieruit a . Uit (8) wordt vervolgens b bepaald.

Blijft b klein, dan is een draad toepasbaar; $b = t$. Uit (7) volgt de draadlengte (ℓ).

Grotere breedten (b) dwingen ons tot bladveren of gatscharnieren in dikke plaat. Zolang het elastische element aan de uitgangszijde een draad is, wordt daar slechts één vrijheidsgraad vastgelegd. In het geval van bladveren worden daar drie vrijheidsgraden voorgeschreven, overbepaaldheid dreigt!

Een manipulator met twee overbrengingen in serie (dat is geen tweetraps),

Manipuleren en instellen (deel 1)

zoals in figuur 91, is een alternatief bij ruimtegebrek.

Is geen actuator beschikbaar die de gewenste u'/h'_m levert, dan moet meertraps worden gewerkt. Figuur 92 toont een voorbeeld waarbij twee trappen in serie (op elkaar gestapeld) staan.

De beide schroefmaten hebben een actuatorkwaliteit $u/h_m = 4 \cdot 10^{-4}$ (tabel 1).

Haalbaar is volgens (2) met $n=2$.

$u'/h'_m = 16 \cdot 10^{-8}$.

Verlangt wij een instelfout van ± 1 nm ($u' = 2 \cdot 10^{-9}$ m) dan is de bereikbare slag $h'_m = 12 \cdot 10^{-3}$ m.

Dimensioneren wij dan de "grof"-manipulator volgens (8), waarbij we invullen $(u'-u)/h'_m = 16 \cdot 10^{-8}$, $W = 1$ N en $\sigma = 400$ N/mm², dan is het resultaat $ab = 1,6 \cdot 10^4$, een resultaat waar de constructeur niet gelukkig mee zal zijn. De reden daarvan is dat, volgens (2), de eerste trap de volle slag (h'_m) moet afleggen doch tevens de vereiste stijfheid moet opbrengen om de hysteresis onder de extreme instelfout (u') te houden tegen de wrijvingsfout (W) in.

Remmen

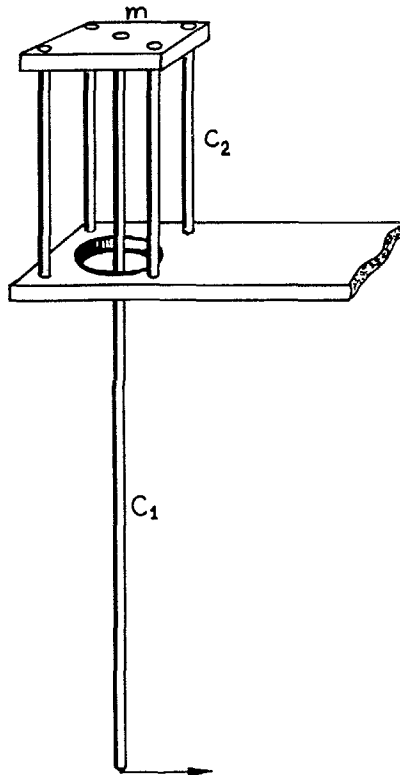
Ontsnapping uit dit dilemma is alleen mogelijk als men de tweede trap niet in serie met de eerste zet, maar beide parallel en de eerste trap tevens van een stijve rem voorziet, zodat bij het manipuleren met de tweede trap geen beroep meer wordt gedaan op de stijfheid van de eerste trap; zie figuur 93.

Manipulator als produktiemiddel versus deel van het produkt.

In veel gevallen is een manipulator een gecompliceerd instrument. Zijn prijs wordt gerechtvaardigd doordat in een productieproces het instellen van zeer veel produkten zal gaan plaatsvinden.

Na het instellen moet de positie van het ingestelde voorwerp worden overgenomen door het lichaam ten opzichte waarvan de positionering plaatsvond. Bij deze overname mag geen verschuiving optreden. Dit probleem verdient de nodige aandacht op het gebied van "fixeren en inklemmen"

Men vermijdt deze overname als de manipulator deel van het produkt is en de fixatie na het positioneren door de manipulator kan worden verzorgd. Deze oplossing is gerechtvaardigd als men kans ziet de manipulator zeer eenvoudig (goedkoop) te houden.



Figuur 94

Elastische manipulators

Een kenmerk van dit type manipulator is, dat de overbrengingsverhouding wordt bepaald door elastische vervormende delen. Voor het bereiken van een extreem grote plaatsnauwkeurigheid zoekt men constructies waarbij zowel de speling s als de restrilling U_o nihil zijn.

Speling $s = 0$ vergt: reële speling $s_r = 0$ en virtuele speling $s_v = 0$.

Via $s_v = 2W/c$ of $s_v = F_u/c$ volgt dan dat de veerstijfheid c heel groot moet zijn, ofwel dat er in het geheel geen wrijving noch een uitwendige belasting F_u mag zijn. In die gevallen waarin er inderdaad geen (variabele) uitwendige belasting is – bijvoorbeeld bij het uitrichten van optische opstellingen – blijven alleen de eisen $s_r = 0$ en $W=0$ waaraan gemakkelijk kan worden voldaan met mechanismen berustend op elastische deformatie. Zie bijvoorbeeld de wel zeer eenvoudige constructie van figuur 94 bestaande uit twee plaatjes met elk vijf gaten en daarin (spelings- en hysteresisvrij) bevestigd vier korte en één ongeveer vier maal zo lange spriet, die alle vijf uit hetzelfde stuk draad geknipt zijn en dus een nauwkeurig gelijke diameter hebben.

Stel de doorbuiging van het tafelblad

en de bodemplaat verwaarloosbaar; c_2 is viermaal de stijfheid van één ingeklemde korte spriet. De verhouding van de horizontale stijfheid van het tafelblad (massa m) op de vier sprieten met gezamenlijke stijfheid c_2 , tot de stijfheid c_1 voelbaar aan de centrale lange spriet $c_1 \approx 4$ (aantal veren) $\times 4$ (tweezijdige inklemming) $\times 4^3$ (lengteverhouding³) ≈ 1000 .

We hebben dus een simpele (indien niet uitwendig bij het tafelblad belaste) x - y -manipulator 1 op 1000.

Bij handbediening en waarneming onder een microscoop blijkt de verplaatsingsfunctie $h(t)$ zo gunstig, dat uit dien hoofde geen waarneembare restrilling u_o behoeft te worden verwacht. Last wordt ondervonden van eenmalige snelheidssprongen in de opstelling ten gevolge van impulsoverdracht uit de omgeving (stoten, dichtslaan van deuren of laden, neerleggen van gereedschap en dergelijke).

Snelheidssprongen van de orde van $v_b = 1$ mm/sec (werkplaats) tot $v_b = 0,1$ mm/sec (laboratoriumkamer) komen vrij frequent voor.

Deze snelheidssprong veroorzaakt, althans als hij een halve trillingstijd of langer aanhoudt, een trillingsamplitude $u_o = v_b \sqrt{m/c_2}$.

Deze wil men klein houden door m laag en c_2 hoog te kiezen. Nu is c_2 via de gewenste overbrengingsverhouding gekoppeld aan c_1 , en deze is begrensd in verband met de wens om tot aan de grenzen van het instelgebied nog met redelijk lage handkracht toe te komen.

Opmerking

De keuze van de grootte van de overbrengingsverhouding en de richtingen van de beide bewegingen kunnen wij zo kiezen dat de gebruiker de verhouding tussen zijn waarneming en de met de hand gemaakte bewegingen als natuurlijk ervaart.

"Constructies voor het nauwkeurig bewegen en positioneren" is een selectie uit de verzameling constructieprincipes die op initiatief van Prof. ir. W. v. d. Hoek in 1962 is opgezet en die nog steeds wordt uitgebreid. Door ir. P.C.J.N. Rosielle en E.A.G. Reker (TU-Eindhoven) is speciaal voor de lezers van *Mikroniek* een selectie gemaakt die in 18 afleveringen wordt gepresenteerd.

Bijdragen van lezers als kritiek, suggesties of eigen ervaring worden door de auteurs op prijs gesteld.