

## Lineaire motoren voor precisie bewegingen

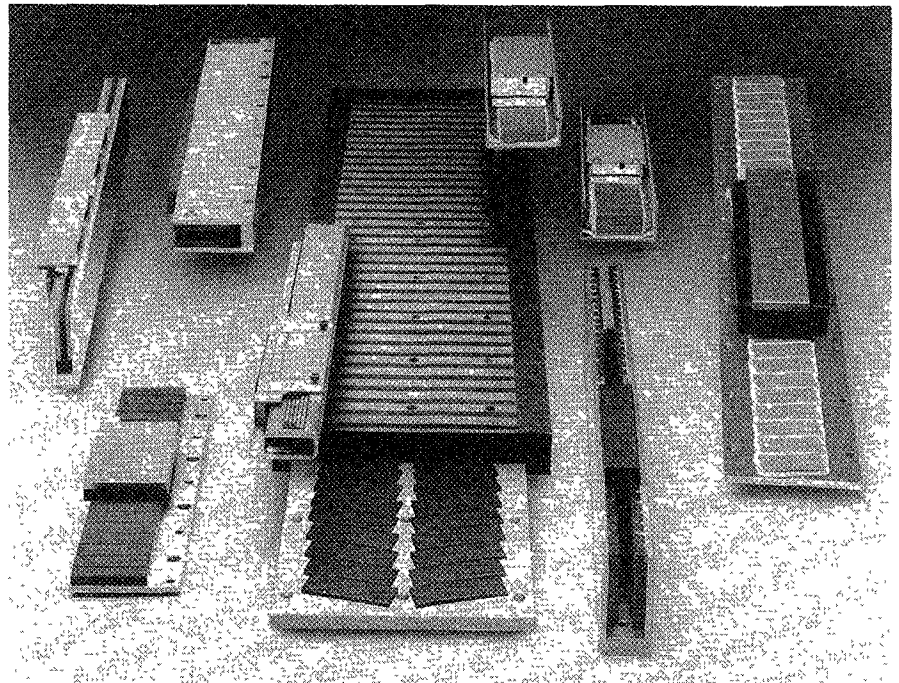
M.G.M. Lammers

Hoewel ooit voornamelijk gebruikt in lichtbelaste ultraprecisie-instrumenten, worden lineaire motoren (zie figuur 1) tegenwoordig steeds vaker gebruikt in positionersystemen voor zeer verschillende toepassingen. Omdat de prijzen ervan dalen en omdat de kracht dichtheid toeneemt, worden deze motoren voor veel constructeurs een interessant alternatief ten opzichte van conventionele aandrijvingen.

Enkele toepassingen waarbij lineaire motoren momenteel met succes worden ingezet zijn:

- Het testen van silicium plakken met honderden IC's. Een elektronische sensor beweegt met hoge snelheid over de plak en gaat in enkele milliseconden van het ene testpunt naar het andere; de testpunten liggen slechts enkele micrometers uit elkaar.
- Het met hoge snelheid plaatsen van IC's of andere elektronische componenten op printplaten en substraten. Een door een lineaire motor aangedreven robot plaatst de componenten met een nauwkeurigheid van enkele micrometers.
- Het etsen van lijnen op glaslinialen, welke worden gebruikt voor het meten van posities in meet- en bewerkingsmachines. De lijnen moeten met submicron-precisie en met een verdeling van 10  $\mu\text{m}$  of kleiner worden aangebracht.
- Het met hoge snelheid bewerken van metalen. Onder hoge snelheid wordt hier niet alleen een hoge bewegingsnelheid verstaan maar tevens een combinatie van grote aanzetten, hoge versnellingen en vertragingen en hoge spiltoerentallen. Het vervangen van conventionele kogelomloopspillen kan voor deze toepassing leiden tot 10 à 20 maal hogere versnellingen/tragingen en 3 à 4 maal hogere snelheden [1].

Met "high force" lineaire motoren kunnen zeer hoge positieclus- en snelheidsclus-versterkingen worden bereikt waar-



Figuur 1. Standaard borstel- en borstellose lineaire motoren zijn beschikbaar in verschillende krachtcategorieën, typisch vanaf 65 N continuïkracht tot 4000 N. Speciale motoren zijn leverbaar met krachten tot 12 000 N.

Motortype	Kernmateriaal	Commutatie	Gebied continuïkracht (N)		
			krachtklasse	laag	hoog
borstel	staal	-	gemiddeld	65	248
borstellos	aluminium	trapezium	laag	-	28
borstellos	aluminium	trapezium	gemiddeld	65	258
borstellos	aluminium	sinus	gemiddeld	55	220
borstellos	epoxy	sinus	gemiddeld	86	430
borstellos	epoxy	sinus	hoog	105	645
borstellos	staal	trapezium	gemiddeld	124	468
borstellos	staal	sinus	hoogst	710	4260

Tabel 1. Een lineaire motor voor iedere toepassing

door de produktiviteit en de nauwkeurigheid van verspanende machines aanzienlijk hoger kunnen zijn. Daarnaast resulteren de hoge snelheden/versnellingen tot een langere levensduur van het bewerkingsgereedschap en leidt de volledig contactloos werkende motor tot een hogere betrouwbaarheid van de machine [2].

### Inleiding

Constructeurs hebben bij het ontwerpen van precisie lineaire positionersyste-

men doorgaans twee opties.

Ze kunnen kiezen voor een rotatiemotor in combinatie met een kogelomloopspil, tandheugel, tandriem of andere mechanische overbrenging, die alle in meerdere of mindere mate hysteresis en/of speling veroorzaken. Of ze kunnen kiezen voor een lineaire servomotor, die de last direct verplaatst zonder tussenkomst van een overbrenging.

Op basis van technische criteria is de keuze in veel gevallen snel gemaakt. De lineaire motor wint op het gebied van (dynamische) positionernauwkeu-

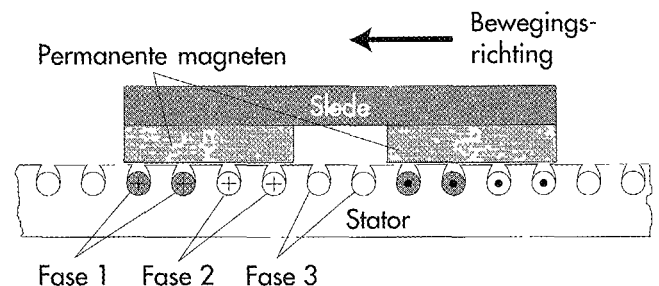
righeid, geometrische nauwkeurigheid (rechtheid en vlakheid van de beweging), snelheid, betrouwbaarheid, levensduur, onderhoud, herhalingsnauwkeurigheid en snelheidsaanparigheid. Hoewel het principe van een lineaire motor identiek is aan dat van een rotatiemotor hebben lineaire motoren enkele opvallende en unieke eigenschappen. Een lineaire servomotor komt het best tot zijn recht in toepassingen waar een combinatie wordt gevraagd van een grote slaglengte, een uitstekend dynamisch gedrag, hoge snelheden en versnellingen, hoge nauwkeurigheden en korte respons- en uittriltijden.

### Werkingsprincipe van lineaire motoren

Lineaire servomotoren functioneren op dezelfde wijze als rotatie-servomotoren. Beide motoren bestaan uit twee hoofdcomponenten: een kern met spoelen en een magneetgedeelte. Als er een stroom wordt gestuurd door de spoelen ontstaat een magnetisch veld rond de windingen, wat in wisselwerking met het veld van de magneten resulteert in een kracht (Lorentzkracht). De kracht is evenredig met de hoeveelheid stroom door de windingen en de richting van de kracht is afhankelijk van de richting van de stroom [3].

Er zijn lineaire motoren met ijzerkernen en ijzerloze kernen (bijvoorbeeld aluminium of epoxy). De eerste hebben een hogere fluxdichtheid en daarmee een hoger rendement maar zijn zwaarder. De laatste zijn geschikt voor extreem hoge snelheidsaanparigheid, zowel bij zeer langzame (enkele  $\mu\text{m/s}$  per seconde) als zeer hoge snelheden, omdat het zogenaamde "cogging" ontbreekt. Cogging is een krachtsvariatie die veroorzaakt wordt door variaties in de magnetische flux tengevolge van de spoelwikkelingsgroeven in de ijzeren kern. Deze treedt zowel op bij rotatiemotoren als bij lineaire motoren. Voor ijzerkern motoren bedraagt de coggingkracht typisch 4 tot 5 % van de continuïteit.

Bij de motoren met ijzerkernen worden de twee motorcomponenten naar elkaar toe getrokken met een kracht van circa 8 tot 12 maal de continuïteit. Deze



Figuur 2 Motor met bewegende magneten en stationaire spoelen. Het magnetische veld dat in de spoelen wordt gegenereerd zorgt in wisselwerking met het magneetveld van de magneten voor een aandrijvende kracht van de slede. Deze versie van een borstelloze lineaire motor heeft een stator waarbij in groeven een driefasen winding gewikkeld is. De interactie tussen de beide velden van spoelen en magneten laat de slede bewegen. Op het moment dat de slede een afstand, overeenkomend met twee groeven heeft afgelegd, wordt fase 3 bekrachtigd en fase 1 uitgeschakeld, zodat een continue beweging in dezelfde richting wordt gerealiseerd. Door het omkeren van de richting van de stroom zal tevens de bewegingsrichting omkeren.

kracht wordt meestal gebruikt om de constructie (lagers/luchtlagers) voor te spannen. De aantrekkingskracht is constant en varieert dus niet met de toegevoerde stroom. Bij ijzerloze kernen is de aantrekkingskracht 0 en er is dus geen cogging.

Het inbouwen van de motoren is over het algemeen eenvoudig. Het stationaire deel wordt met schroeven vastgezet op de geleiding, het beweeglijke deel wordt gemonteerd aan de slede. Er worden alleen eisen gesteld met betrekking tot de paralleliteit van de beweging van de slede ten opzichte van het montagevlak van de motor. De luchtspleet is typisch 0,6 mm  $\mu$  0,3 mm, maar kan groter of kleiner gekozen worden. De motorparameters zullen daarmee echter ook enigszins wijzigen.

### Communicatie

Er zijn DC-borstellessen motoren en DC-borstelloze motoren. Bij een borstellessen motor bevinden zich de wikkelingen in het stationaire deel en de magneten aan de slede, zie figuur 2. De commutatie (het tijdig bekrachtigen van de juiste windingen) gebeurt mechanisch met koolborstels. De typische levensduur van de borstels en de commutatie-strip is 2500 km. Als magneetmateriaal wordt samarium kobalt en neodymium ijzer borium gebruikt. De motor is een eenfase gelijkstroommotor.

Bij een borstelloze motor vormen de magneten (magnet assembly) het stationaire deel en is de spoelenunit (coil assembly) aan de slede verbonden. De borstelloze motoren hebben drie fasen,

120 elektrische graden verschoven. Bij een borstelloze motor is er dus geen mechanisch contact tussen het stationaire en het bewegende deel en er is dus ook geen wrijving.

Gecombineerd met een contactloos meetsysteem en eventueel een contactloze lagering (luchtlagers) ontstaat een volledig wrijvingsloos systeem, wat uitermate geschikt is voor zeer hoge, eventueel submicrometer-nauwkeurigheden. Door het ontbreken van wrijving vindt er ook geen slijtage plaats, met als grote voordeel dat de gespecificeerde nauwkeurigheid niet alleen gehaald wordt maar gedurende de levensduur ook gewaarborgd blijft.

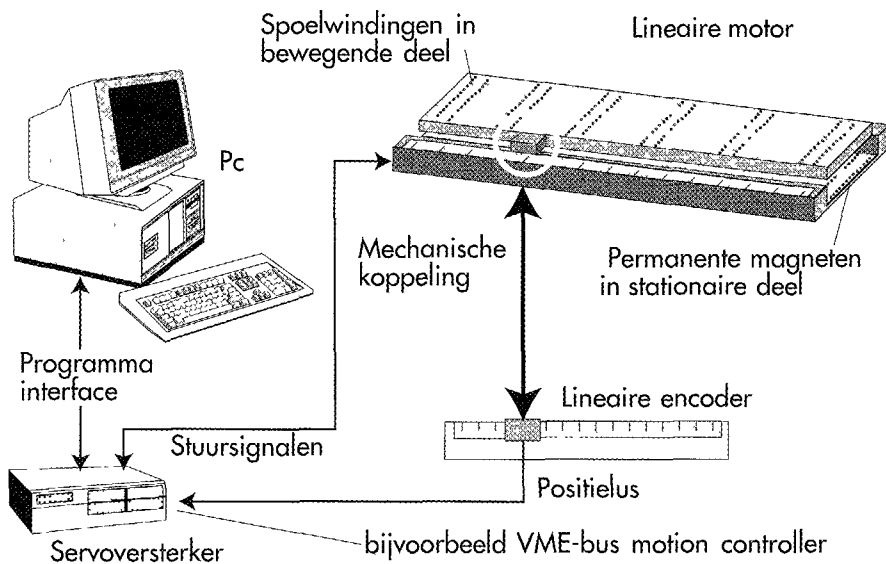
Verscheidene spoelen eenheden kunnen willekeurig in serie of parallel geschakeld worden om grotere aandrijfkrachten te verkrijgen. De keuze om in serie dan wel parallel te schakelen wordt voornamelijk bepaald door de keuze van de versterker (aanpassing motorweerstand, inductiviteit, motorconstante, tegen-EMF constante). Bij borstelloze motoren gebeurt de commutatie elektronisch in de versterker. Het moment van schakelen wordt typisch bepaald met behulp van Hall sensoren, die zich aan de spoelen eenheid bevinden (Hall sensoren leveren een uitgangssignaal wat afhangt van de magnetische fluxdichtheid).

We onderscheiden twee commutatatieprincipes bij borstelloze motoren:

- trapeziumvormige commutatie en
- sinusvormige commutatie.

Bij trapeziumvormige commutatie levert de motor een trapeziumvormige te-

## Lineaire motoren voor precisie bewegingen



Figuur 3 Een compleet servosysteem bestaat typisch uit een PC, een elektronische besturing en servoversterker voor het besturen van de lineaire motor, en uit de positioneer tafel

gen-EMK bij constante snelheid; de Hall-sensoren fungeren alleen als schakelaar. Op het moment dat het magneetveld een bepaalde waarde overschrijdt wordt geschakeld. De stroom wordt geschakeld tussen de fasen in een zestrapsyclus. Bij een driefase motor is er steeds een fase stroomloos. Trapeziumvormige commutatie gaat altijd gepaard met wat krachtsvariaties van 5 - 10 %.

Bij sinusvormige commutatie levert de motor een sinusvormige tegen-EMK bij constante snelheid: de output van de Hall-sensoren varieert sinusvormig met het magneetveld en de drie fasen worden ook voorzien van een sinusvormige stroom. Bij sinusvormige commutatie is de resulterende kracht theoretisch exact constant. De Hall-sensoren en magneten moeten zich dan echter wel nauwkeurig op de juiste locatie bevinden. Sinusvormige commutatie wordt gebruikt als erg "gladde" en trillingsarme bewegingen gemaakt moeten worden, bijvoorbeeld voor nauwkeurig scannen. Sinusvormige commutatie is wat minder efficiënt dan trapeziumvormige - tot circa 25 % minder continue kracht -. De sinusvormig gecommuteerde borstelloze motor wordt ook wel AC synchrone servomotor genoemd.

Bij de huidige digitale DSP-(Digital Signal Processor) besturingen wordt momenteel vaak softwarecommutatie

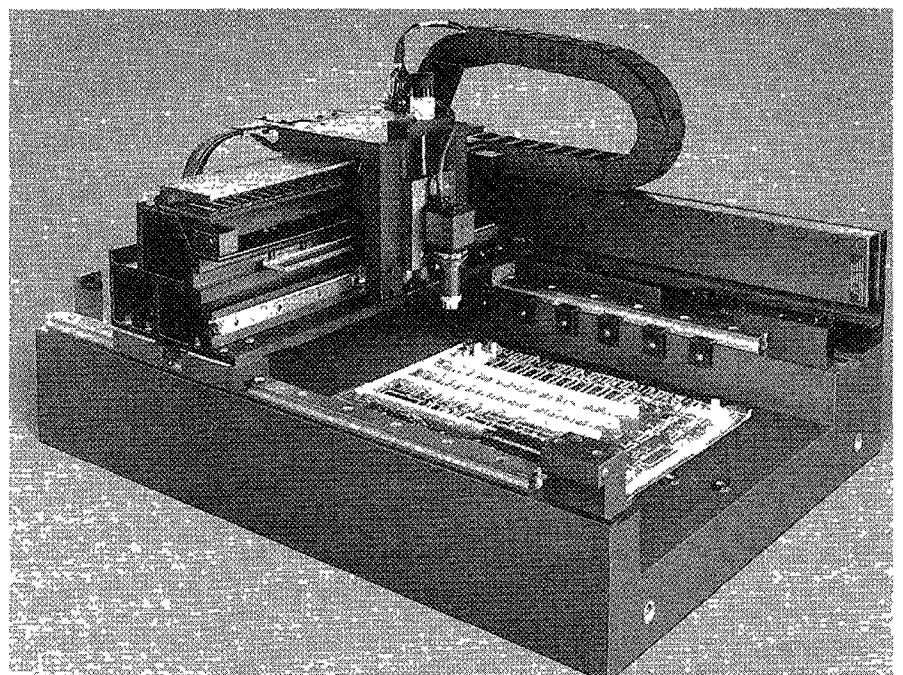
toegepast. De commutatieschakelsignalen worden hierbij direct afgeleid van het positiemeetsysteem, veelal een glasliniaal, zodat de Hall-sensoren kunnen vervallen. Tijdens een opstartprocedure zorgt de software voor het "uitlejnen" van het magneetveld ten opzichte van de glasliniaal. Met behulp van een zogenaamde Look Up Table is het zelfs mogelijk de toegevoerde sinusvormige

stromen enigszins aan te passen. Dit kan nodig zijn afhankelijk van eventuele onvolkomenheden in de sinusvorm van de tegen-EMK van de motor, bijvoorbeeld door montagetoleranties van de magneten.

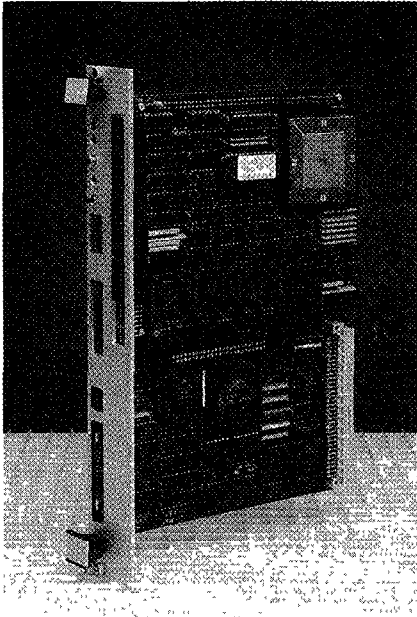
### Nauwkeurigheid

Figuur 3 toont een typisch servosysteem voor de aandrijving van een positioneer tafel met een lineaire motor. Op een aantal functies hiervan zal in dit en volgende hoofdstukken nader worden ingegaan.

De resolutie en de nauwkeurigheid van een door een lineaire motor aangedreven slede wordt niet bepaald door de motor zelf, maar is afhankelijk van het gebruikte positiemeetsysteem, de kwaliteit van de mechanische geleiding en de besturing. Met behulp van een precisie opto-elektronische lineaire encoder (glasliniaal) is bijvoorbeeld een nauwkeurigheid haalbaar van 2 á 3  $\mu\text{m}$  per meter. Voor hogere nauwkeurigheden over korte afstanden -tot circa 250 mm- komen optische interferentielinialen in aanmerking. Voor submicron nauwkeurigheden over grotere afstanden wordt overwegend gebruik gemaakt van positieterugkoppeling van een laserinterferometer in combinatie met een



Een zogenaamd "gantry" (bewegende brug) x-y-positioneersysteem met borstelloze lineaire motoren voor x- en y-as lineaire motoren voor precisie bewegingen



Standaardisatie is het kenmerk van de toekomst. Voor besturingen vormt dit geen uitzondering. Dit 4-assige model is VME-bus formaat en is voorzien van een bibliotheek met high level ANSI C bewegings-subroutines.

luchtgelagerde slede. De maximaal haalbare absolute positioneer-nauwkeurigheid wordt in dit geval beperkt door de meetnauwkeurigheid van het lasersysteem en ligt in de orde-grootte van  $0,1 \mu\text{m}/150 \text{ mm}$ . Positiemeting met behulp van een laser heeft het voordeel dat de verplaatsingen direct op werkstukhoogte gemeten kunnen worden, waardoor gecompenseerd kan worden voor eventuele kantelfouten van de, veroorzaakt door onvolkomenheden in de sledegeleidingen (Abbe fouten).

Niet alleen de nauwkeurigheid in de bewegingsrichting is belangrijk, maar ook de nauwkeurigheden loodrecht op de bewegingsrichtingen. Daarom wordt tijdens het ontwerp van een precisie-positioneersysteem veel aandacht besteed aan het minimaliseren van afwijkingen in de rechtheid en vlakheid van de beweging. Met name bij meer-assen systemen (xy, xyz) is het belangrijk dat de sledebewegingen een goede rechtheid en vlakheid hebben. Enerzijds om sledekantelingen te beperken, anderzijds vanwege het feit dat een rechtheids- of vlakheidsafwijking in de ene as (x) tot uitdrukking komt als positioneerfout in de andere assen (y respectievelijk z), zie figuur 4.

## Betrouwbaarheid

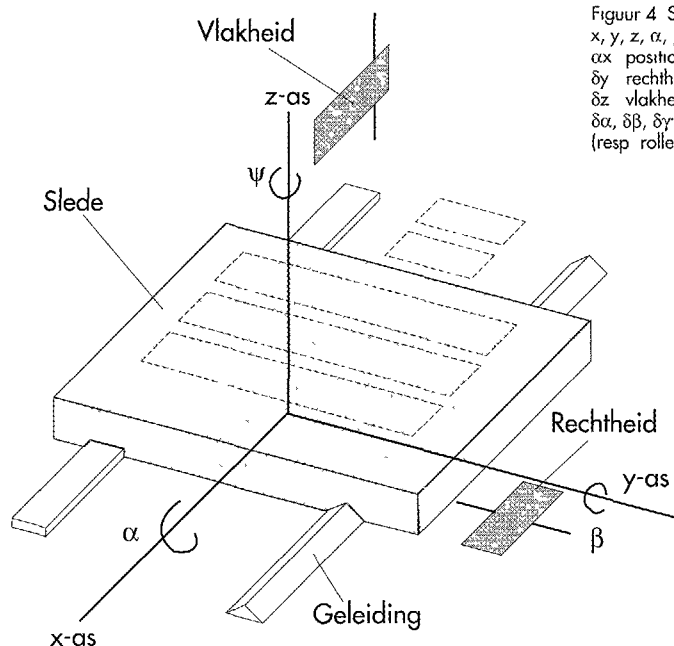
Naast een uitzonderlijk hoge nauwkeurigheid, herhalingsnauwkeurigheid en resolutie hebben lineaire motoren ook een hoge betrouwbaarheid. Borstelloze lineaire servomotoren maken geen gebruik van mechanische (via koolborstels) commutatie, zodat er geen mechanisch contact is tussen het stationaire en het bewegende motoronderdeel. Er is dus geen wrijvings- en ze zijn spelingsvrij, hetgeen trillingen en slijtage elimineert. De motoren zijn dan ook volledig onderhoudsvrij en hebben in principe een onbeperkte levensduur, waardoor de afschrijvingskosten minimaal zijn. Zolang men ervoor zorgt dat de omgevingstemperatuur en de temperatuur van de motorspoelen niet te hoog oplopen – dit laatste door een juiste afstemming van motor en last – zullen de machineprestaties gedurende de levensduur constant blijven. Ter vergelijking: met een kogelomloopspil aangedreven systemen vragen periodiek smering en afstelling van de voorspanning in lagers en spilmoer en zullen ondanks regelmatig onderhoud veel sneller slijten dan systemen met lineaire motor.

Alle lineaire motortypes hebben alleen een variërende kracht in de bewegingsrichting (x). De kracht in verticale richting (z) loodrecht op de bewegingsrich-

ting is hetzij een constante, aantrekkende magneetkracht, hetzij volledig afwezig. Dit laatste is het geval bij zogenaamde gebalanceerde borstelloze motoren met twee rijen, elkaar compenserende, magneten. De kracht in horizontale richting loodrecht op de bewegingsrichting (y) is nul. Dit in tegenstelling tot bijvoorbeeld een kogelomloopspilaandrijving, die ook loodrecht op de aandrijfrichting vrij sterk variërende krachten op bijvoorbeeld de slede uitoefent. Deze variërende krachten, in combinatie met de eindige stijfheid van bijvoorbeeld lagering en slede, leiden tijdens de beweging tot hoekverdraaiingen van de slede en tot verplaatsingen in richtingen waarin ze niet gewenst zijn. De constante of afwezige dwarskrachten bij een lineaire motor maken het dus mogelijk bijzonder hoge bewegingsnauwkeurigheden te bereiken.

## Dynamisch gedrag

Stijfheid, stabiliteit en bandbreedte zijn in hoge mate bepalend voor het dynamisch gedrag van servosystemen. De bandbreedte is gedefinieerd als de frequentieband waarin de responsamplitude niet meer afneemt dan 3 dB. De maximum haalbare bandbreedte wordt beperkt door de laagste mechanische eigenfrequentie van het systeem, welke



Figuur 4 Slede met 6 vrijheidsgraden  $x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$  en afwijkingen  $\alpha x$  positioneer-nauwkeurigheid,  $\delta y$  rechtheidsnauwkeurigheid,  $\delta z$  vlakheidsnauwkeurigheid,  $\delta \alpha, \delta \beta, \delta \gamma$  slede-hoekverdraaiingen (resp. rollen, stampen en gieren)

## Lineaire motoren voor precisie bewegingen

afhankelijk is van de bewegende massa en de stijfheid van de aandrijving. Zonder een voldoende hoge stijfheid zal een servosysteem traag reageren; het systeem zal een lange uittriltijd ("settling time") hebben evenals een lage nauwkeurigheid en bandbreedte.

Bij een lineaire motor is er geen mechanische stijfheid tussen de beide motoronderdelen (magneetdeel en spoelendeel). Deze beide delen kunnen echter wel met zeer hoge stijfheid verbonden worden met respectievelijk de geleiding en de slede.

Ter vergelijking: bij een spilaandrijving is de haalbare stijfheid beperkt door de serieschakeling van een groot aantal elastische onderdelen, de moer, de moerbevestiging, de lagering, de lagerblokken, de lagerblokkenbevestiging, de spil, de koppeling en de motoras. De resulterende mechanische stijfheid van deze serieschakeling zal in veel gevallen belangrijk lager zijn dan die van een lineaire motor in bedrijf. Bovendien varieert deze stijfheid met de positie van de slede – dicht bij een lagerblok hoger dan bij een ver verwijderde positie van een lagerblok – waardoor een optimale servoafregeling niet goed mogelijk is, omdat de frequentieoverdrachtsfunctie varieert met de positie. Bovendien zal de resulterende stijfheid verder afnemen bij toenemende spillengte.

Bij een lineaire motor is de stijfheid (en de frequentieoverdracht) echter constant en onafhankelijk van de sledepositie. Zelfs bij een slaglengte van enkele tientallen meters zal het dynamisch gedrag dus ongewijzigd blijven en niet verslechteren.

### Besturingsaspecten

Door de hoge stijfheid bij een aandrijving met lineaire motor kan de versterking in de servobesturing hoog worden opgevoerd zonder dat instabiliteiten optreden. Naarmate de versterking hoger is zullen de positionernauwkeurigheid en de responsiesnelheid van het servosysteem toenemen.

Bij sterk wisselende massabelastingen is het moeilijk een systeem met lineaire motor optimaal af te regelen omdat de massa, in tegenstelling tot bijvoorbeeld een aandrijving met spil, niet ge-

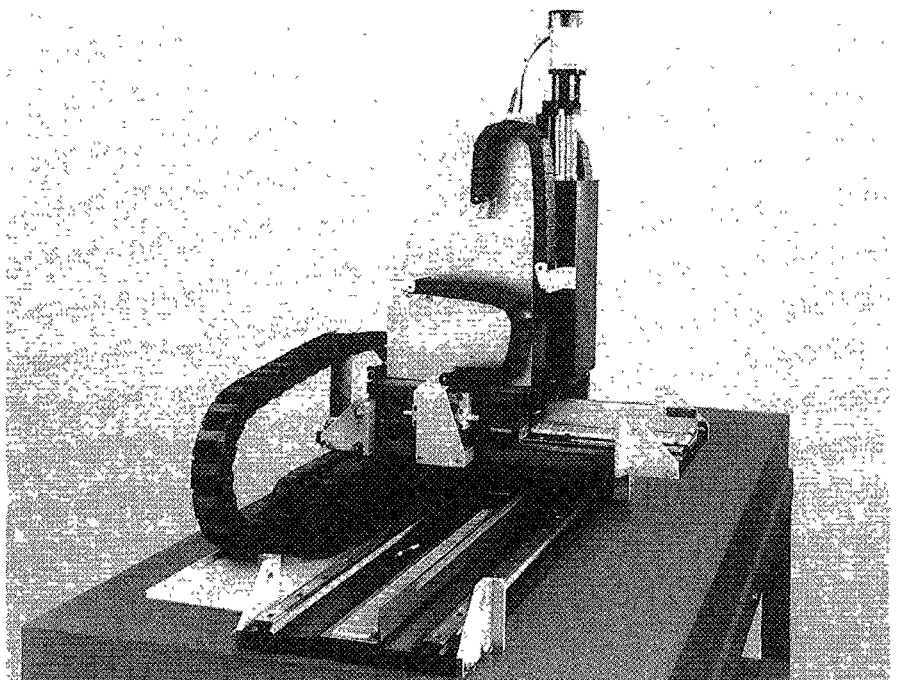
reduceerd wordt door een overbrenging. Het servosysteem zal dus beter presteren indien bij een hoge sledebelasting (bijvoorbeeld 200 kg) andere regelparameters worden gebruikt dan bij een lage sledebelasting (bijvoorbeeld 5 kg). Met de tegenwoordig digitaal uitgevoerde servobesturingen is dit wisselen van servoparameters echter eenvoudig in software, en automatisch uit te voeren.

### Besturing

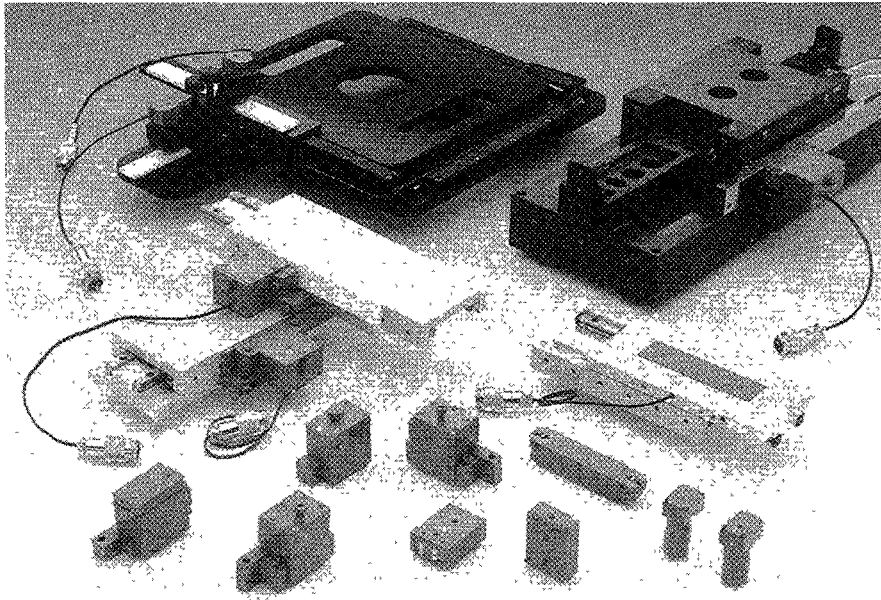
Eén van de functies van de besturing is het sluiten van de positielus, waarvoor de Anorad-servobesturingen vaak direct werken met de sinus/cosinus-uitgangssignalen van het positiemeetsysteem. In de besturing vindt daarna een digitale interpolatie plaats met een factor 256 of zelfs een factor 1024. Deze hoge interpolatie resulteert enerzijds in een hoge resolutie en daarmee hoge herhalingsnauwkeurigheid. Anderzijds is een hoge resolutie bij een lineaire motor noodzakelijk om ook bij erg lage snelheden voldoende regelinformatie binnen te krijgen om een hoge snelheids-eenparigheid te realiseren – bijvoorbeeld bij nauwkeurig scannen met snelheden van enkele  $\mu\text{m/s}$  per seconde –.

Om bij deze hoge resolutie ook hoge snelheden (enkele meters per seconde) mogelijk te maken dient de besturing een hoge encoder-ingangsfrequentie te hebben (tot 16 MHz). De nieuwste digitale besturingen werken met een servo update time van  $50 \mu\text{s}$  (20 KHz).

Het gebruikte regelalgoritme is van het PID-type (proportionele, integrerende en differentiërende actie) met snelheids- en versnellingsvoorwaartskoppeling. Met toenemende proportionele actie ("gain") is het mogelijk de nauwkeurigheid en de bandbreedte van het systeem te vergroten (= verhoging van stijfheid). Een te hoge gain echter resulteert in overshoot en lange uittriltijden. De integrerende actie zorgt voor extra versterking bij lage frequenties en zorgt ervoor dat de statische restfout tot nul wordt gereduceerd. Een integrator zorgt echter tevens voor fase-achtersstand, hetgeen het systeem instabiel kan maken. Voor hoge frequenties gedraagt de PI-regelaar zich als een P-regelaar. Met de differentiërende actie neemt de versterking en de demping bij hoge frequenties toe, zodat een vergroting van de bandbreedte mogelijk is. Overshoot en uittriltijd nemen af. Een differentiator zorgt tevens voor een fasevoorsprong, hetgeen positief kan zijn voor de stabiliteit van het systeem. Voor la-



Voorbeeld van een drie-assig positionersysteem, waarbij de x- en y-as zijn uitgevoerd met lineaire motoren



Figuur 5 Microline ultraprecisie piezokeramische lineaire motoren

gere frequenties gedraagt de PD regelaar zich als een P regelaar.

Sommige besturingen zijn geen werkelijke PID-regelaar maar hebben een zogenaamd "lead-lag" filter. Lead-compensatie is de praktische uitvoering van de PD-regelaar, terwijl lag compensatie een benadering is van een PI-regelaar.

Om de dynamische nauwkeurigheid verder te vergroten zijn extra mogelijkheden ingebouwd zoals voorwaartskoppeling (velocity en acceleration feed-forward) en selectieve filters.

Voorwaartskoppeling wordt toegepast om volgfouten te verkleinen. Tijdens de opzetfunctie zal het servosysteem altijd iets achterblijven bij het gewenste profiel. Er moet een voldoende grote volgfout zijn om een regelactie te kunnen opbouwen. De volgfout is te verkleinen door de gain te verhogen of door gebruik te maken van een integrator. Beide methoden kunnen echter tot instabiliteit leiden. Een andere methode is om met behulp van snelheids- en/of versnellingsvoorwaartskoppeling een signaal gelijk aan de benodigde volgfout te genereren en naar de DA-converter te sturen zodanig dat de uitgang gelijk wordt aan de ingang. Het grote voordeel is dat voorwaartskoppeling geen deel uitmaakt van de gesloten lus, waardoor het geen invloed heeft op de stabiliteit

Selectieve filters worden gebruikt om bandbreedte beperkende dominante mechanische eigenfrequenties te compenseren. Deze eigenfrequenties behoeven niet noodzakelijkerwijs bij het positionersysteem zelf te behoren, maar kunnen ook van de omgeving komen. Deze zogenaamde parasitaire massa-veer systemen (bijvoorbeeld slappe en lichte freems met weinig demping) kunnen een funeste uitwerking hebben op het systeemgedrag, met name wanneer de eigenfrequentie van het parasitaire systeem in de buurt ligt van de gewenste bandbreedte van het servosysteem.

### Slotwoord

Lineaire motoren worden steeds frequenter voor een veelvoud van toepassingen als aandrijvend element toegepast. Als voornaamste drijfveer geldt de noodzaak voor snellere, produktievere machines bij een hogere kwaliteit. De recente grote belangstelling uit de hoek van de verspanende bewerkingsmachines is hiervan een goed voorbeeld. Uiteraard zal toepassing op grote schaal tevens bepaald worden door de prijs van lineaire motoren in vergelijking tot conventionele aandrijvingen.

Voor een eerlijke prijsvergelijking tussen bijvoorbeeld een kogelomloopspil-aandrijving en een lineaire motor, moeten alle componenten worden meegere-

kend. Dus naast de spil moeten ook de rotatiemotor, de koppeling, de lagers en de lagerblokken worden meegeteld. Voor een realistische prijsvergelijking ("cost of ownership") zouden echter tevens de ontwerp-, montage-, onderhouds- en vervangingskosten, betrouwbaarheid en levensduur moeten worden meegenomen. Juist op deze kostenposten biedt de (borstelloze) lineaire motor belangrijke voordelen. Bovendien zal de tendens van dalende prijzen voor lineaire motoren zich in de toekomst voortzetten doordat de aantallen sterk toenemen.

### Noten

- [1] Bron Ingersoll Cutting Tool Comp U S A
- [2] De Japanse firma FANUC, 's werelds grootste producent van CNC-besturingen, heeft zeer recentelijk een licentie-overeenkomst gesloten voor het bouwen van Anorad's lineaire motoren en heeft de exclusieve verkooprechten verworven voor de Aziatische markt. Het ontwikkelen van "high speed bewerkingscentra" is hierbij de achterliggende doelstelling.
- [3] Een recente nieuwe ontwikkeling op het gebied van lineaire motoren is Anorad's "Microline" serie van piezokeramische lineaire motoren (zie figuur 5) die hun werking ontleen aan hoog frequente, sub-micron, elastische trillingen (50-100 kHz) van piezokeramische elementen. Deze oscillerende elementen worden in contact gebracht met een keramische strip, die tegen de slede is bevestigd, waardoor de slede symmetrisch heen en weer kan worden "geduwd". Deze lineaire motor heeft dezelfde voordelen als normale piezo-elementen (ultrahoge resoluties tot in het nanometer gebied, gladde bewegingen, hoge herhalingsnauwkeurigheid) maar niet het nadeel van de zeer korte slag. De maximale slag van deze nieuwe piezokeramische motor is in principe onbeperkt. Er zijn snelheden haalbaar van enkele nanometers/s tot 250 mm/s en aandrijfkrachten tot 30 N. De motor heeft zeer compacte afmetingen kan geschikt voor de cleanroom of vacuum worden gemaakt, is geruisloos en kan in open- of geslotenlus bedreven worden. Typische toepassingen: Halgeleiderindustrie, LCD productie en inspectie, precisie-bewerkingen, microscopie, plotters, scanners, R & D etc.

### Auteursnoot

De heer M G M Lammers is directeur van Anorad Europe bv te Valkenswaard. Dit artikel is een bewerking door de auteur van zijn artikel in Machine Design van September 1994.