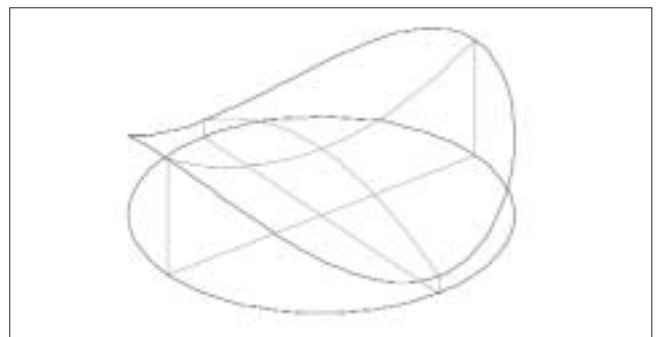


Een fast-tool

Het project 'Precisieverspanen van kunststoffen' aan de Technische Universiteit Eindhoven maakt deel uit van het IOP Precisietechnologie. Het omvat de ontwikkeling van technologieën voor de vervaardiging van oppervlakken met optische kwaliteit in kunststoffen met behulp van diamantdraaien. Eerste deel van het project is de studie naar de oorzaken van en oplossingen voor de slijtage van het diamantgereedschap bij het vervaardigen van kunststofproducten met optische kwaliteit. Het tweede deel omvat het ontwerp van een fast-tool servo met hoge versnelling. Deze bijdrage handelt over het principeontwerp van de toegepaste aandrijving.

• Erik Homburg •

Het vervaardigen van niet-rotatiesymmetrische producten op een draaibank is mogelijk door toepassing van een zogeheten fast-tool servo. Wil men die producten op een draaibank vervaardigen, dan moet het snijgereedschap een beweging maken die gesynchroniseerd is met de rotatiepositie van de hoofdspil. De Z-positie van de beitel wordt als een soort slaaf gekoppeld aan de C-as van de draaibank. Een belangrijke klasse van niet-rotatiesymmetrische oppervlakken zijn de torische oppervlakken (zie Afbeelding 1), zoals we die tegenkomen in brillenglazen met cilindercorrectie. Uiteraard gaat het hier om brillen-'glazen' uit kunststof. Het is mogelijk het oppervak te splitsen in een rotatiesym-



Afbeelding 1. Torisch oppervlak met twee hoofdkromtestralen.

servo-actuator

metrische en een niet-rotatiesymmetrische component. De rotatiesymmetrische bewegingscomponent wordt uitgevoerd door de klassieke X- en Z-as van het gereedschapswerktuig en de niet-rotatiesymmetrische component wordt aan de fast-tool servo doorgegeven. In het geval van genoemde lensoppervlakken willen we optische kwaliteit ook zonder nabewerking kunnen leveren. De positionering van de beitelpunt moet dan met een resolutie van enkele nanometers gebeuren. Wil bewerking van het oppervlak op een economisch verantwoorde wijze gebeuren, dan moet de bewerkingstijd binnen een acceptabele grens liggen. Afhankelijk van de amplitude van het niet-rotatiesymmetrische profiel en het toerental van de hoofdspil levert dat eisen aan de versnelling van de beitelpunt op. Deze versnellings-eisen vormen de basis van de specificatie van de fast-tool servo-actuator.

Geometrie en dynamica

In het geval van een brillenglas met simpele cilindercorrectie is het oppervlak te beschrijven met twee verschillende hoofdkromtestralen. De positie van de beitelpunt z kan in goede benadering worden beschreven als een functie van de radiale positie r en spindelpositie Θ .

$$z = u \cdot \left(\frac{r}{r_{\max}} \right)^2 \cdot \sin(2 \cdot \Theta)$$

We zien een sinusfunctie met twee perioden per omwenteling van de hoofdspil. De snelheid van de beitelpunt wordt bepaald door eenmaal te differentiëren en de versnelling door nogmaals te differentiëren. Als we Θ substitueren door $w \cdot t$ en vervolgens w door v_c / r , dan ontstaan de volgende relaties, met als voornaamste parameters de geometrie van het oppervlak en de snijsnelheid v_c .

$$\dot{z} = 2 \cdot u \cdot \frac{r}{r_{\max}^2} \cdot v_c \cdot \cos\left(2 \cdot \frac{v_c}{r} \cdot t\right)$$

$$\ddot{z} = -4 \cdot u \cdot \left(\frac{v_c}{r_{\max}}\right)^2 \cdot \sin\left(2 \cdot \frac{v_c}{r} \cdot t\right)$$

Als we een straal van het product van 40 mm en een amplitude u van 5 mm aannemen, de uiterste waarden voor een brillenglas, dan krijgen we piekwaarden voor beitelsnelheid en -versnelling volgens Tabel 1.

Tabel 1. Piekwaarden voor beitelsnelheid en -versnelling bij verschillende snijsnelheden.

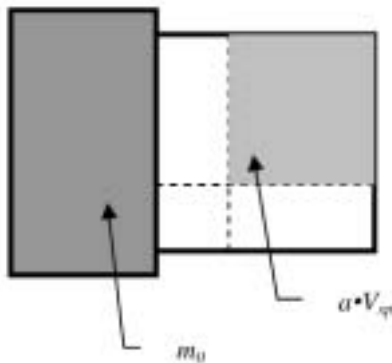
Snijsnelheid [m/s]	Beitelsnelheid [m/s]	Beitelversnelling [m/s ²]
5	1,25	312,5
7	1,75	612,5
10	2,5	1250

Dit zijn duidelijk zeer hoge waarden voor de versnelling, zeker in de precisietechnologie. Verder valt op te merken dat bij een constante snijsnelheid de amplitude van de versnelling op elke straal van het oppervlak dezelfde waarde heeft. Onder deze voorwaarde en bij aanname van een aanzet van 10 $\mu\text{m}/\text{omw}$ levert dat bewerkingstijden op van respectievelijk 100, 70 en 50 seconden.

Motormodel

Aangezien de slag van de beitelpunt relatief kort is, lijkt de keuze voor een enkelfase lineaire motor gerechtigd. Impliciet beschouwen we een motor met vlakgewikkelde spoelen tegenover vlakliggende magneten, zoals dat ook

voorkomt in moderne lineaire motoren. We beschouwen een relatief abstract motormodel waarbij een geïsoleerd koperpakket een massa aandrijft. In Afbeelding 2 zien we links de aangedreven massa m_0 en rechts de aandrijvende spoel. De spoel zien we opgedeeld in de zuivere geleiders en de spoelisolatie. Deze spoelisolatie wordt in het massamodel verder verwaarloosd. Verder moeten we de spoel opdelen in een gedeelte dat effectief het magneetveld ziet en een niet-effectief gedeelte dat alleen loze massa bijdraagt.



Afbeelding 2. Actuator-massamodel.

De door de actuator geleverde kracht berekenen we met de wet van Lorentz:

$$F = B * J * V_{sp} * a$$

Hierin is F de geleverde kracht, B de magnetische fluxdichtheid, J de elektrische stroomdichtheid en $V_{sp} * a$ het effectieve spoelvolumen.

De bewegende massa van de actuator is de som van de spoel-massa en de aangedreven massa m_0 .

$$m = m_0 + d_{sp} * V_{sp}$$

d_{sp} is hier de soortelijke massa van de spoel.

Met

$$m_0 = r * m = r * d_{sp} * V_{sp}$$

volgt voor de totale massa:

$$m_{tot} = (r + 1) * d_{sp} * V_{sp}$$

De opgewekte versnelling wordt dan:

$$\ddot{x} = \frac{B * J}{d_{sp}} \cdot \frac{a}{1 + r}$$

Het in de spoel gedissipeerde vermogen om deze versnelling te kunnen bereiken is:

$$P = I^2 \cdot R = J^2 \cdot \rho_{cu} \cdot V_{sp}$$

met ρ_{cu} de soortelijke weerstand van koper.

Vermogenseffectiviteit

Een belangrijk kental voor de actuatorontwerper is de vermogenseffectiviteit van de actuator. Het is de geleverde versnelling gedeeld door de wortel uit het benodigde vermogen.

$$\eta = B \cdot \frac{d_{sp}}{\sqrt{\rho_{cu}}} \cdot \frac{a}{r + 1} \cdot \frac{1}{\sqrt{V_{sp}}}$$

De uitdrukkingen voor zowel de versnelling als de effectiviteit zijn voornamelijk afhankelijk van globale parameters als de toegelaten stroomdichtheid, het opgewekte magneetveld en parameters die de spoel beschrijven. Met schattingen voor deze grootheden kunnen we op een heel globaal niveau diverse ontwerpvarianten vergelijken. De belangrijkste aanname is dat we uitgaan van een zuivere Lorentz-actuator zonder ijzer in het magneetcircuit. Dat heeft als belangrijkste nadeel een verlies aan sterkte van het magneetveld, maar als belangrijkste voordelen lineair gedrag en de afwezigheid van kleefkoppels. Als we dan een motorvorm aannemen met vlakgewikkelde bewegende spoelen, kunnen we met moderne magneetmaterialen een magnetische fluxdichtheid bereiken van ongeveer 0,5 T. Als spoelmateriaal kunnen we behalve het gebruikelijke koper ook kiezen voor aluminium vanwege de lagere soortelijke massa. We kunnen het motorprincipe ook omdraaien: de magneten bewegen en de spoelen zijn stationair. Het voordeel hiervan is dat we de stroomdichtheid flink hoger kunnen kiezen, omdat we de koeling van de spoelen enorm kunnen verbeteren. Wel is de te behalen fluxdichtheid B slechts de helft van die in het eerste geval.

Het resultaat van berekeningen op grond van deze beschouwingen, met een aantal goede schattingen van betreffende parameters, is samengevat in Tabel 2.

Tabel 2. Kentallen van motorvarianten.

	Moving coil		Moving magnet	
	Cu	Al	Cu	Al
\ddot{x} [m/s ²]	225	224	1125	731
η [m/s ² /√W]	73	292	66	53

De trend is duidelijk: de motor met bewegende magneten kan de hoogste versnellingen genereren, maar is niet de meest efficiënte oplossing. Voor de onderhavige actuator kiezen we wel deze oplossing. Verder valt op te merken dat zelfs onder de ideale omstandigheden in dit model de gevraagde versnelling maar net geleverd kan worden. Willen we meer marge, dan kunnen we kiezen voor een versnellen-de overbrenging tussen motor en gereedschap. Tot dusver hebben we impliciet een translerende beweging aangenomen. Dat hoeft niet en we komen dan uit op een uitvoering als roterende motor met een draaiarm waarop de beetel gemonteerd is [1].

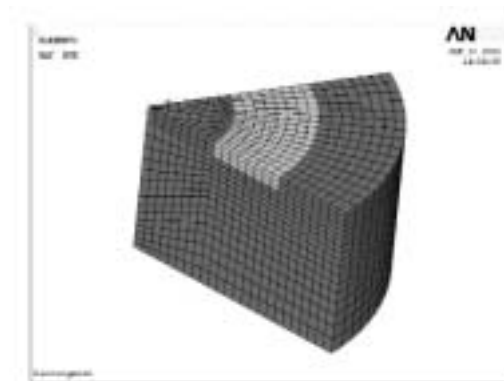


Afbeelding 3. Motorkeuze.

Afbeelding 3 toont de gekozen motor. De rotor bestaat uit een aantal afwisselend gemagnetiseerde magneetsegmenten en daartegenoverliggende vlakke spoelen. De magneetring kan roteren en de spoelen zijn stationair. De spoelen zijn gemonteerd op vloeistofgekoelde koellichamen die de hoge stroomdichtheden mogelijk maken. Elke spoel is zodanig gepositioneerd dat bij bekrachtiging van de spoel een netto tangentiële kracht en daarmee een koppel op de rotor ontstaat.

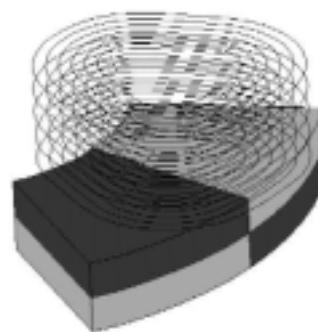
Modellering

Voor een verdere detaillering van de motor dienen we over te gaan op een magnetische eindige-elementenberekening, hier in Ansys. Het probleem met de elementenberekening wordt duidelijk met de schets van de elementenverdeling in Afbeelding 4.



Afbeelding 4. Elementenverdeling van een sectie van de rotor.

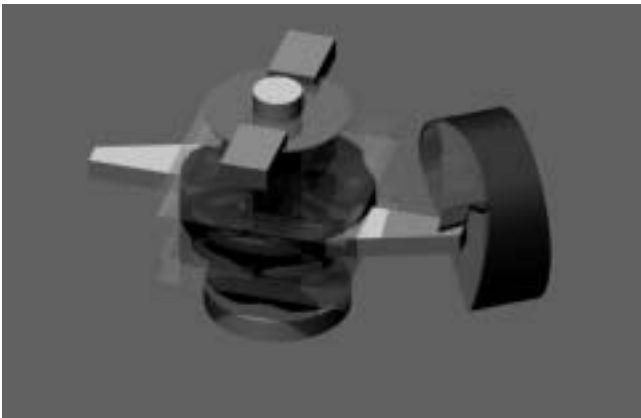
De lucht dient meegemodelleerd te worden, waardoor een zeer groot aantal elementen in de berekening meegenomen moet worden. Als de rotor in de middenstand staat, is het probleem niet al te groot omdat dan door een slimme keuze van symmetrievlakken het model gereduceerd kan worden. Staat de rotor bij de berekening niet in die neutrale stand, dan is deze symmetrie-eigenschap niet van toepassing en neemt het aantal te berekenen elementen excessief toe. De hier gekozen oplossing is een tweetrapsbenadering. Het magneetveld van de rotor wordt kaal zonder spoelen berekend met gebruik van maximale symmetrie-eigenschappen. De resultaten worden in een algemeen technisch rekenprogramma (Matlab) geëxpandeerd naar de volledige ruimte. De krachtopwekking wordt ook in dat rekenprogramma uitgerekend door over het volume de wet van Lorentz toe te passen.



Afbeelding 5. Stroomverdeling ten behoeve van koppelberekening.

Afbeelding 5 toont boven de magneetrotor een stel gesloten curven die de stroomverdeling in de spoel modelleren. De krachtopwekking wordt per lus uitgerekend en over alle lussen gesommeerd.

Het resultaat van deze berekeningen komt dan uit op een maximaal opgewekt koppel van ongeveer 5,5 Nm en een koppelvariatie over de slag van maximaal 3%. De verwachte maximaal haalbare versnelling komt uit op ongeveer 400 m/s², met een reële schatting van de meebewegende massa. Afbeelding 6 toont een principeschets van de totale actuator. Op een hydrostatisch gelagerde spil draait de rotor. Op de rotor is de draaiarm met het diamantgereedschap bevestigd. Tevens is hierop een hoekmeetsysteem gemonteerd, nodig voor de terugkoppeling van de draaiarmpositie.



Afbeelding 6. Principeschets van de totale actuator.

Tot slot

In bovenstaand verhaal is geprobeerd aan te geven hoe men met niet al te gecompliceerde beschouwingen kan komen tot een eerste dimensionering van een motor met hoge specificatie. Een uiteindelijk ontwerp van deze actuator omvat uiteraard veel meer dan hier beschreven, maar dat valt buiten het bestek van deze bijdrage.

Literatuur

- [1] Ludwick, S.J. (1999), "A Rotary Fast Tool Servo for Diamond Turning of Asymmetric Optics", Phd Thesis, MIT.

Auteursnoot

F.G.A. (Erik) Homburg is verbonden aan de sectie Micro and Nanoscale Engineering (voorheen Precision Engineering) van de afdeling Werktuigbouwkunde van de Technische Universiteit Eindhoven. Hij bedankt de afstudeerders A.J.M. Moers en M.A.J. ter Voert voor hun bijdragen aan het hier beschreven ontwerp.

Informatie

www.senternovem.nl/iopprecisietechnologie
f.g.a.homburg@tue.nl