

Het vergroten van de creativiteit bij het ontwerpen

Constructies voor het nauwkeurig bewegen en positioneren (17)

Dit wordt de laatste aflevering van de serie "Constructies voor het nauwkeurig bewegen en positioneren", die gedurende drie jaar een vast onderdeel is geweest van Mikroniek.

Het construeren is geen eenvoudig vak en de eisen die aan de oplossingen worden gesteld liggen steeds hoger. De redactie hoopt dan ook dat ze met het publiceren van deze serie een bijdrage heeft geleverd aan het doorgronden en oplossen van constructieve problemen. De redactie bedankt de auteurs van de serie voor het werk wat ze hebben gedaan en wellicht zo nu en dan nog wordt vervolgd met incidentele bijdragen.

M.P. Koster

Het ontwerpproces is een veelbeschreven onderwerp. In de verschillende beschrijvingen is steeds eenzelfde hoofdlijn herkenbaar, die langs de volgende stappen loopt:

- probleemanalyse,
- vaststellen specificatie,
- conceptfase,
- evaluatie- en keuzefase,
- uitwerking,
- bouw prototype,
- testen,
- toetsen aan specificatie.

Daarbij moet worden opgemerkt dat probleemanalyse dikwijls een herdefinitie van het probleem betekent.

Er zijn diverse pogingen gedaan om methodiek te brengen in de afzonderlijke stappen van het ontwerpproces. Voor de probleemanalyse, bijvoorbeeld, zijn verschillende methodieken in de literatuur beschreven. De evaluatiefase leent zich vanzelfsprekend goed voor werkwijzen als modelleren, simuleren en analyseren.

Helaas lenen niet alle stappen in het ontwerpproces zich voor het aanbrenge van structuur. De conceptfase, ook wel synthesefase of creatieve fase genoemd, laat zich moeilijk structureren

[1,2,3,4]. Daarom kenmerkt deze fase zich meestal door het weliswaar virtuoos maar ongestructureerd genereren van nieuwe ideeën op basis van allerlei fysische inzichten. In deze fase vormen "brainstorming" en "morfologie" [5] bekende werkwijzen. Of die succes hebben, hangt voor een belangrijk deel af van de ervaring en creativiteit van de deelnemers aan de respectievelijke sessies [6].

Er zijn pogingen gedaan om de toegankelijkheid van kennis en ervaring van anderen - essentieel gedurende de conceptfase - te verbeteren. Verzamelingen van constructievoorbeelden [7,8] zijn te beschouwen als resultaten van zulke pogingen. Het raadplegen daarvan kan bruikbare suggesties opleveren, maar het kiezen daaruit vereist weer de nodige ervaring van de ontwerper.

Dit is de laatste aflevering van de serie "Constructies voor het nauwkeurig bewegen en positioneren". In dit besluit van de serie wordt aangetoond hoe met de constructievoorbeelden die in deze artikelen en nog vollediger in [9] zijn beschreven, kan worden omgegaan in de dagelijkse praktijk van het ontwerpen.

Constructieprincipes

Prof.ir. W. van der Hoek begon in 1962 met het verzamelen van suggesties, ideeën en uitgewerkte oplossingen voor ontwerpproblemen [10]. De verzameling bestreek dat deel van de werktuigbouwkunde dat zich bezig houdt met het nauwkeurig bewegen: het naar hun plaats brengen en op die plaats houden van voorwerpen. Dat probleemveld was en is relevant bij machines voor de vervaardiging van samengestelde, discrete producten, en voor het ontwerpen van die producten en van instrumenten.

De gedachte achter het verzamelen van de ervaring van ontwerpers is dat ontwerp- en constructieproblemen niet uniek zijn, maar kunnen worden opgedeeld in categorieën van meer algeme-

ne en herkenbare aard. Het is de bedoeling dat de gebruiker zijn (deel)-probleem herkent als dat van één of meer van deze categorieën. Dit concept is gecontinueerd in de verzameling Constructieprincipes [9] - verder in dit artikel "CP" genoemd. De in CP verzamelde uitwerkingen zijn niet bedoeld om ongewijzigd en kritiekloos te worden gekopieerd, maar dienen als suggesties voor mogelijke oplossingen.

In CP zijn de deelproblemen met uitwerkingen ieder per categorie in een hoofdstuk ondergebracht. Elk hoofdstuk bestaat uit een inleiding met de beschrijving van de probleemcategorie en uit een serie uitgewerkte voorbeelden. De voorbeelden zijn als volgt geassocieerd:

*** volledig uitontwikkeld, veel ervaring,

** uitontwikkeld, beperkte ervaring,

* goed idee, geen ervaring.

CP wordt iedere twee jaar vernieuwd, waarbij recente voorbeelden in de plaats van oudere voorbeelden komen. Er wordt naar gestreefd de classificatie van voorbeelden te verhogen van * via ** naar ***.

Het raadplegen van de Constructieprincipes

De gedachte achter CP is dat de ontwerper de problemen die hij tegenkomt, herleidt tot de voorbeelden in een bepaalde categorie. Dat wil niet zeggen dat hij vervolgens de enig zaligmakende oplossing voor zijn problemen vindt. Veeleer inspireren de suggesties hem tot een oplossing, die ongetwijfeld aan andere randvoorwaarden moet voldoen dan het desbetreffende voorbeeld in CP.

De werkwijze die CP de ontwerper biedt, onderscheidt zich van de tot nu toe bekende oplossingsmethodieken voor de conceptfase. In de eerste plaats wordt achtergrondinformatie gegeven die de ontwerper in staat stelt zijn creativiteit op het behandelde probleemgebied te vergroten. In de tweede plaats

wordt er niet een willekeurige opsomming van gelijkwaardige oplossingen geboden, maar is ieder voorbeeld voorzien van een toelichting en een classificatie. In de derde plaats gaat het - zoals gezegd - om suggesties en niet om voorbeelden die kritiekloos kunnen worden overgenomen.

Op een tweetal terreinen is inmiddels ervaring opgedaan met de toepassing van CP. Allereerst zijn ze in de industriële ontwerp praktijk met veel enthousiasme geraadpleegd door zowel jonge als ervaren ontwerpers. Dat resulteerde weer in suggesties voor verbeteringen op grond van ingebrachte ervaring. Verder wordt CP gebruikt door studenten aan de technische universiteiten. Dat leidt in hun geval tot een eerste intensieve confrontatie met de creatieve aspecten van het ontwerp proces.

Toepassingsvoorbeeld

Een van de gevallen waarin CP een belangrijke rol heeft gespeeld in het creatieproces, wordt hier beschreven. Het gaat om het ontwerpen van ARCADE (ARistoteles CALibration DEvice): een systeem voor het kalibreren van een instrument aan boord van de satelliet Aristoteles, die in ontwikkeling is bij de Europese organisatie voor ruimteonderzoek ESO. Dit instrument, met de naam GRADIO [11], wordt ontwikkeld door TNO-TPD en is bedoeld om de verdeling van het zwaartekrachtveld van de aarde te meten met behulp van versnellingsmeters, zie figuur 1.

In het massamiddelpunt van de satelliet is er evenwicht tussen de aantrekkingskracht van de aarde en de centrifugale

kracht die behoort bij de straal van de baan van de satelliet en zijn snelheid in die baan. De versnellingsmeters zijn echter iets naast het zwaartepunt geplaatst. Het verschil tussen de metingen van de beide versnellingsmeters op de toegestane afstand van het zwaartepunt bedraagt ongeveer 10^{-6} g. Het is noodzakelijk de beide kanalen continu te kalibreren. Daartoe moet de satelliet harmonisch worden geëxciteerd in drie te voren vastgelegde richtingen. De harmonische componenten van de gemeten signalen worden vergeleken om vervolgens de kalibratiefactoren te kunnen aanpassen. Het exciteren van de satelliet gebeurt door de ARCADE-systemen, waarvan er drie in de satelliet zijn gemonteerd. Hun werklijnen snijden precies het zwaartepunt van de satelliet. De richtingen van de respectievelijke bewegingen vormen een orthogonaal coördinatenstelsel, dat als referentie dient. Aan de grootte van de excitatiekrachten in iedere richting worden functionele eisen gesteld. Het systeem moet per as aan de volgende eisen voldoen:

1. Bewegende massa ongeveer 0,6 kg.
2. Amplitude van de harmonische beweging 3 mm.
3. Aanstootfrequentie 1/3 Hz.
4. Maximale afwijking van een ideale sinusvormige beweging 10^{-5} van de amplitude.
5. Maximale afwijking van de richting van de beweging van de exciterende massa $5 \cdot 10^{-6}$ rad.
6. Kanteling van de exciterende massa niet groter dan $5 \cdot 10^{-6}$ rad.
7. Energieverbruik kleiner dan 2,5 W.
8. Het mechanisme moet ten minste 1,5 jaar zonder enig onderhoud en

toezicht kunnen functioneren onder hoogvacuum-omstandigheden.

9. Het mechanisme mag niet meer plaats innemen dan $200 \times 200 \times 200$ mm³.

Probleembenadering

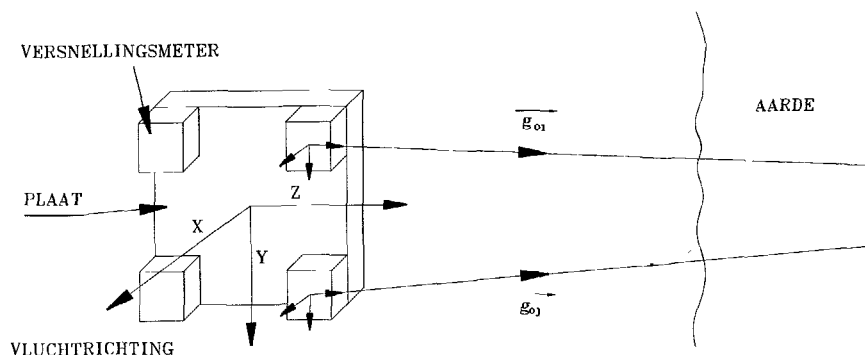
Het essentiële probleem is het verkrijgen van een perfect lineaire beweging. Diverse oplossingen zijn daarvoor gesuggereerd, bij voorbeeld glijden, rollen en een stangenmechanisme dat een rechtlijnige beweging benadert. De volgende overwegingen hebben tot de uiteindelijke besluitvorming geleid:

- De amplitude is vergeleken met de afmetingen van de constructie verhoudingsgewijs klein (systeemeisen 2 en 9), zodat een stangenmechanisme mogelijk zou moeten zijn.
- Glijden en rollen hebben tribologische consequenties, die strijdig zijn met de systeemeisen 7 en 8.
- Een stangenmechanisme met relatief kleine amplitudes vraagt om relatief kleine hoekamplitudes in de draaipunten, zodat daarvoor elastische elementen zouden kunnen worden toegepast. Dat is qua energieverbruik een buitengewoon gunstige oplossing (systeemeis 7).

Op grond van deze overwegingen werd besloten dat zou worden gezocht naar alternatieven gebaseerd op een stangenmechanisme met elastische elementen.

Een volgende overweging waarmee rekening moest worden gehouden, was dat een exacte sinusbeweging is vereist (systeemeis 4). Daar de excitorator zal worden aangedreven door een sinusvormig variërende kracht via een spoel in een magneetveld, vraagt het ontwerp om een lineaire elastische karakteristiek. Een extra voorwaarde is dat de bewegende massa in geen van zijn bewegingsrichtingen kinematisch overbelast mag zijn

Een andere overweging was dat er in verband met een zo klein mogelijk energieverbruik een grens is gesteld aan de stroom door de aandrijfspoelen. De kleinst mogelijke aandrijfkraft wordt bereikt als de bewegende massa



Figuur 1 Principe van GRADIO [11], een instrument voor het meten van de verdeling van het zwaartekrachtveld van de aarde met behulp van versnellingsmeters

Het vergroten van de creativiteit bij het ontwerpen

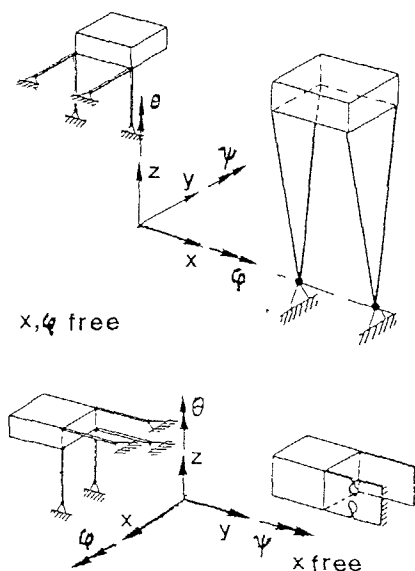
in zijn lineair-elastische ophanging wordt aangestoten in zijn eigenfrequentie. Maar bij een frequentie van 1/3 Hz wordt dan bij een bewegende massa van 0,6 kg de veerstijfheid in de bewegingsrichting onpraktisch laag: 2,5 N/m. Van een dergelijk mechanisme kan nauwelijks enige mechanische soliditeit worden verwacht.

In dit stadium was het ontwerpprobleem gereduceerd tot het ontwikkelen van een excitatiemechanisme met de volgende eigenschappen:

1. Een stangenmechanisme binnen een beschikbare ruimte van $200 \times 200 \times 200$ mm met een amplitude van de bewegende massa gelijk aan 3 mm.
2. Elastische elementen als draaipunten.
3. Geen kinematische overbepaaldheid.
4. Voldoende mechanische soliditeit ondanks een naar verhouding lage eigenfrequentie.

Het raadplegen van CP

De afleveringen 7 en 8 van de serie in de nummers 4 en 5 van Mikroniek jaargang 1992 - hoofdstuk 4 van CP - behandelen het onderwerp "Vrijheidsgraden". In dat hoofdstuk vindt men suggesties voor het beperken van het aantal vrijheidsgraden van een voorwerp in de ruimte en het voorkomen van overbepaaldheid (eigenschap 3). Figuur 2 geeft voorbeelden van mechanismen met een aantal vrije coördina-



Figuur 2 Verschillende graden van vrijheid in mechanismen

ten. Hoofdstuk 4 geeft ook voorbeelden van uitgewerkte mechanismen, gebaseerd op deze ideeën. Enkele daarvan zijn afgebeeld in figuur 3.

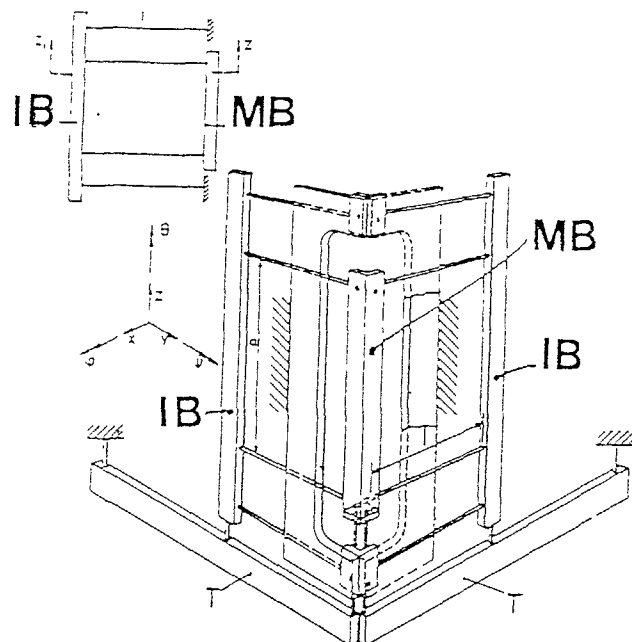
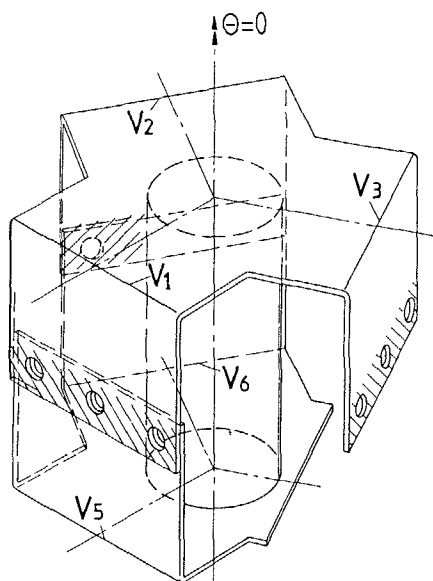
Aflevering 6 van de serie in nummer 3 van Mikroniek 1992 - hoofdstuk 3 van CP - behandelt het ontwerpen en optimaliseren van elastische elementen. Twee van de voorbeelden zijn afgebeeld in figuur 4.

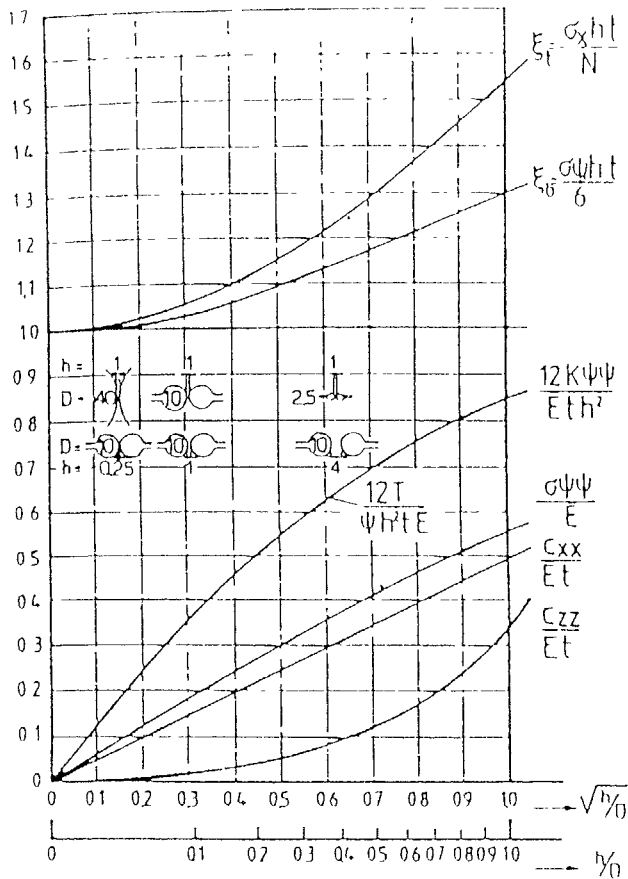
Aflevering 16 van de serie in nummer 1 van Mikroniek 1994 - hoofdstuk 10 van CP - gaat over energiebeheer en geeft suggesties voor het verkrijgen van een geringe stijfheid in de bewegingsrichting x in combinatie met een hoge stijfheid in alle andere richtingen. Figuur 5 illustreert het principe van het behoud van elastische energie. Veer a met een lineaire stijfheid c is spanningsloos als het punt A zich bevindt in de positie $y = 0$. Veer b , eveneens met lineaire stijfheid c , is spanningsloos als het punt B zich bevindt in de positie $x = 0$. Als de coördinaten x en y loodrecht op elkaar staan, bedraagt de hoeveelheid elastische energie in het systeem $U = cx^2/2 + cy^2/2$. Daar geldt dat $x^2 + y^2 = \ell^2$ is constant, is U eveneens constant. Op basis van dit principe kunnen de systeem-stijftheden c_x en c_y onafhankelijk van de veerstijfheid c worden gekozen. De stijfheid c_x in de bewegingsrichting kan zelfs gelijk aan nul worden gemaakt.

Uiteindelijk ontwerp

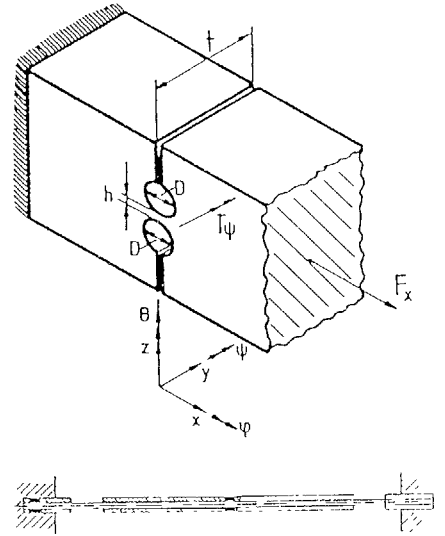
Met de resultaten verkregen door het raadplegen van CP in gedachte, kan nu een bruikbaar ontwerp worden gekozen. Het principe van figuur 3a, uitgevoerd in gebogen dun plaatmateriaal, is niet geschikt voor mechanismen met hoge nauwkeurigheid. Uit het oogpunt

Figuur 3 Mechanismen voor het verkrijgen van een lineaire beweging





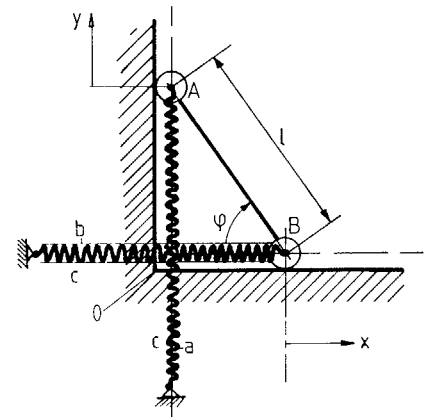
Figuur 4 Elastische elementen en de optimalisatie van gat-scharnieren



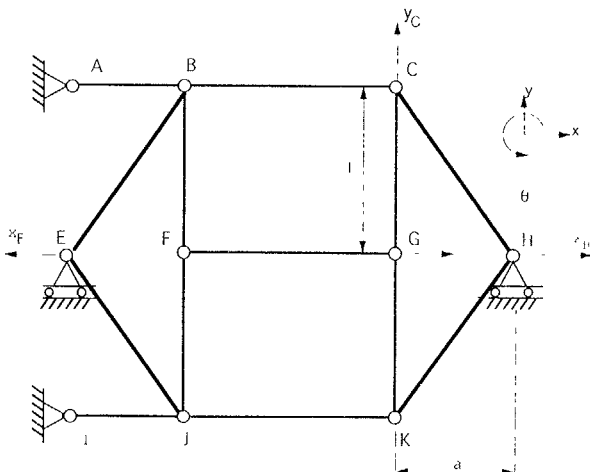
van compactheid is het mechanisme van figuur 3b niet gunstig, omdat hefboom T veel ruimte vraagt. Deze hefboom dwingt lichaam IB de helft van de slag van bewegende massa MB te maken, wat een voorwaarde is voor een perfect lineaire beweging van MB.

Figuur 6 geeft een andere oplossing voor de gedwongen beweging van IB, die toch is gebaseerd op het voorgaande principe. De stangen IB blijven parallel aan MB door de aanwezigheid

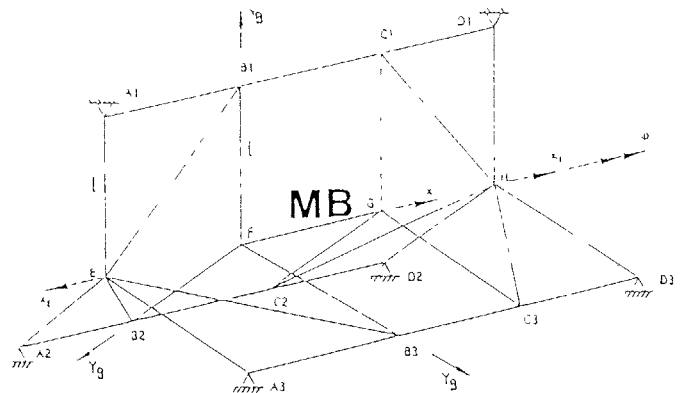
van de stangen B-E, C-H, J-E en K-H. De stangen IB zijn echter wel in staat vrij te bewegen in de y-richting als gevolg van de bewegingsvrijheid van E en H langs de symmetrie-as in de x-richting. De rotatie van deze stangen wordt verhinderd door de stangen A-B en I-J, en door de symmetrie ten opzichte van de lijn E-H. Als x de uitwijking van MB voorstelt, dan geldt – indien $x \ll 1$ – dat $y_c \approx x^2/(2\ell)$. Indien $x \ll a$ is $x_H \approx x^2/(2a)$, daar $x_H \approx (1/a)y_c$. Als we voor x, ℓ en a respectievelijk



Figuur 5 Een systeem met constante elastische energie

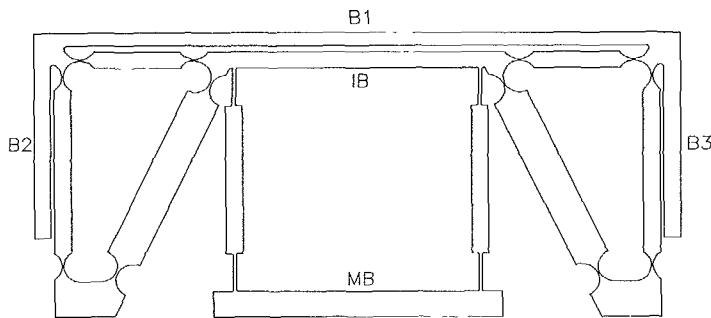


Figuur 6 Een vlak stangenmechanisme voor een rechtgeleiding



Figuur 7 Een ruimtelijk stangenmechanisme voor een rechtgeleiding

Het vergroten van de creativiteit bij het ontwerpen



Figuur 8 Een deel van het mechanisme van figuur 7, gemaakt uit één stuk plaatmateriaal

waarden van 3 mm, 100 mm en 100 mm kiezen, dan vinden we dat $y_c \approx 45 \cdot 10^{-3}$ mm en $x_H \approx 45 \cdot 10^{-3}$ mm.

Bij voldoende symmetrie van het mechanisme wordt het probleem van de lineaire beweging van MB over 3 mm dus gereduceerd tot de lineaire beweging van de punten E en H over $45 \cdot 10^{-3}$ mm. Het stangenmechanisme van figuur 6 schrijft slechts de plaats van MB voor in het vlak van de constructie. Daarom moet het stangenmechanisme worden uitgevoerd als een ruimtelijke constructie, zie figuur 7.

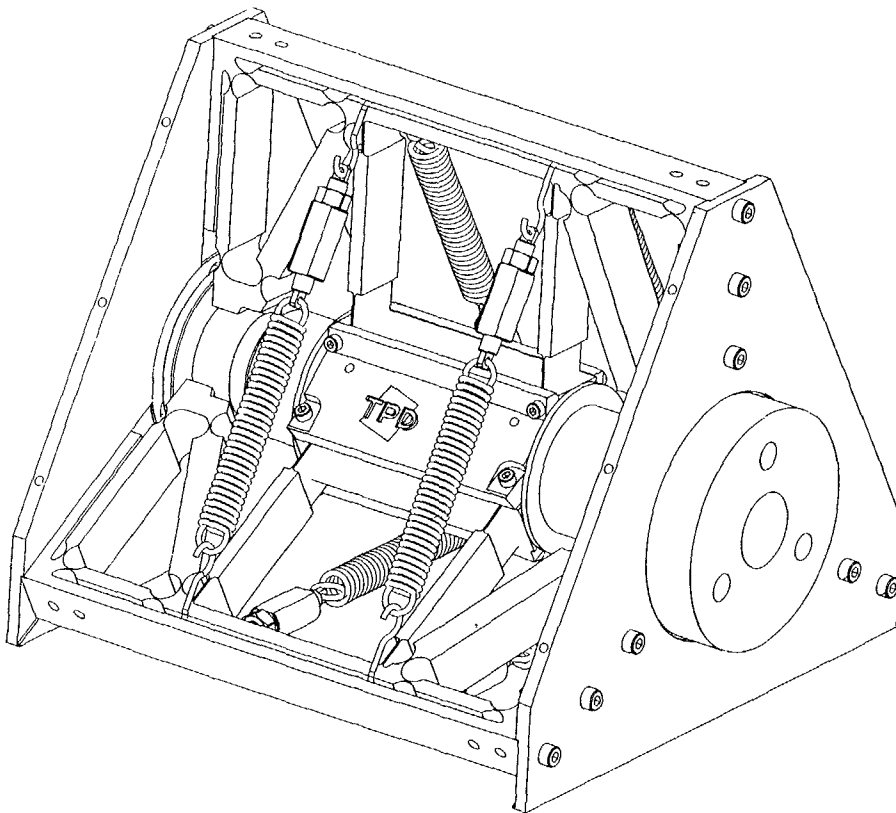
Er wordt nu aandacht besteed aan de lineaire beweging van de punten E en H.

Er wordt reeds in het vlak A1-A2-A3 vastgehouden door twee stangen. De derde stang introduceert derhalve overbepaaldheid, zodat het midden E van het vlak A1-A2-A3 alleen vrij is om relatief kleine uitwijkingen x_E uit te voeren loodrecht op dit vlak, met de uitwijkingen langs de andere coördinaten gelijk aan nul.

Een ander belangrijk punt is dat het mechanisme zodanig in zijn vrijheidsgraden wordt belemmerd dat voldaan is aan de voorwaarde van lineaire elasticiteit. Als we het vlak B1-B2-B3 beschouwen, zien we dat drie coördinaten van dat vlak zijn geblokkeerd door de

drie stangen A-B. Nog twee coördinaten van het vlak worden belemmerd door de stangen EB. Daardoor blijft rotatie ϕ over als enige vrijheidsgraad van het vlak B1-B2-B3. F kan als midden van dat vlak alleen loodrecht erop bewegen volgens coördinaat x. Omdat de bewegingen in de richtingen y_B vrij zijn, kunnen de uitwijkingen van F in de richting x naar verhouding groot zijn. De stangen B-C kunnen eventueel weg worden gelaten.

De definitieve uitvoering van het mechanisme bestaat uit drie vlakke deelmechanismen, die ieder uit één stuk plaatmateriaal zijn vervaardigd, zie figuur 8. Deze deelmechanismen bevatten alle hiervoor beschreven elastische elementen. De drie bewerkte platen zijn gemonteerd tussen twee eindvlakken, zoals is weergegeven in figuur 9. Aan het bewegende lichaam zijn ook de aandrijvende magneten bevestigd. Het systeem met constante elastische energie wordt gevormd door het geheel van de stijfheid in de x-richting en zes in driehoeken geplaatste schroeven.



Figuur 9 De definitieve uitvoering van de excitator ARCADE [11]

Literatuur

- [1] A D Hall, A methodology for systems engineering, Princeton NJ, Van Nostrand, (1986) p 85-91
- [2] G Pahl, W Beitz, Konstruktionslehre, Handbuch für Studium und Praxis, Berlin, Springer (1986), Hoofdstuk 3 Der Konstruktions Prozess
- [3] Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, VDI 2221, Dusseldorf, (1986)
- [4] W G Rodenacher, U Clausen, Regeln des technischen Konstruierens, Mainz, Krauskopf, (1973)
- [5] F Zwicky, A G Wilson, New methods of thoughts and procedures, Symposium on Methodologies, Pasadena, May 1967, Berlin Springer, (1967) p 316-317
- [6] N F M Roozenburg, J Eekels, Produktontwerpen, structuur en methoden, Utrecht, Lemnea, (1991) p 163
- [7] F D Jones e a Ingenious mechanisms for designers and inventors, New York, Industrial Press, (1969)
- [8] H P Chronis, Mechanisms and mechanical devices handbook, New York, Mc Graw-Hill, (1991)
- [9] M P Koster, Constructieprincipes voor het nauwkeurig bewegen en positioneren, Colledictaat 113136, Universiteit Twente (1992)
- [10] W van der Hoek, Dynamisch gedrag en positioneer-nauwkeurigheid van constructies en mechanismen, Eindhoven, Technische Universiteit, (1967)
- [11] B C Braam et al, The pre-development of the Aristoteles calibration mechanism, Proceedings of the fifth European Space and Tribology Symposium, ESTEC, Noordwijk, (oct 1992)

Auteursnoot

Prof dr ir M P Koster is hoogleraar Mechatonica aan de Universiteit Twente

Het artikel is bewerkt door ir F Zuurveen