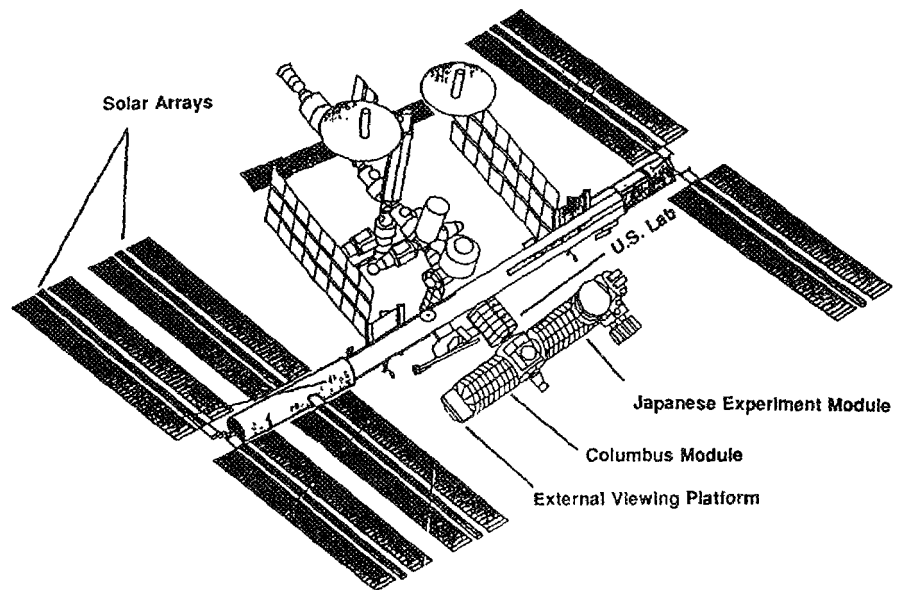


Grijpermechanisme voor ruimteplatform

R.J.G. Ramaker

Momenteel ontwikkelt de Europese ruimtevaartorganisatie ESA een bemand ruimtelaboratorium, de Columbus module, voor experimenten in de ruimte. Het laboratorium zal worden gekoppeld aan het Amerikaans/Russische 'Space Station', zie figuur 1. Aan de Columbus module zal een extern platform worden bevestigd voor instrumenten als telescopen, camera's en instrumenten die de ruimteomgeving onderzoeken. Deze instrumenten zullen voor een beperkte tijd in de ruimte verblijven. Tot op dit moment is het scenario het gehele platform na 2,5 jaar te ontkoppelen van de Columbus module, en het met de Space Shuttle terug te brengen naar de aarde. Een nieuw platform met nieuwe instrumenten zal vervolgens naar het Space Station worden gestuurd en worden gekoppeld aan de Columbus module.

Een alternatief scenario voorziet in een robotarm op het ruimteplatform, zie figuur 2. Het platform blijft permanent gekoppeld aan de Columbus module en de robotarm verwijderd en plaatst de instrumenten. Een groot voordeel van dit scenario is dat instrumenten aan het platform gekoppeld kunnen blijven voor zolang dit nodig is. Sommige in-



Figuur 1 Het Amerikaans/Russische "Space Station" waaraan de door de Europese ruimtevaartorganisatie ESA te ontwikkelen Columbus module zal worden gekoppeld. Deze module is een laboratorium voor het uitvoeren van experimenten in de ruimte

strumenten behoeven bijvoorbeeld 1 jaar en andere 5 jaar operationele tijd. De observatietijd van de instrumenten wordt in dit scenario dus niet beperkt tot 2,5 jaar. Tevens kan de robot worden gebruikt voor het verlenen van service aan instrumenten

Als voorbeelden hiervan kunnen worden genoemd, het openen en sluiten van beschermkappen voor lenzen en het

wisselen van cassettes in camera's.

Voor het alternatieve scenario is de ontwikkeling van betrouwbare hardware, de robotarm, de interfaces van robot-instrument en instrument-platform essentieel.

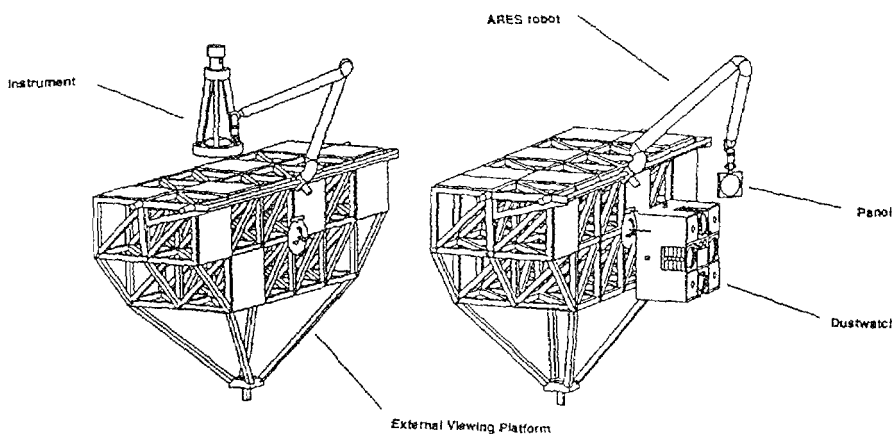
Dit artikel behandelt het ontwerp van de robot-instrument interface: de grijper.

Ontwerpeisen

De grijper moet in staat zijn instrumenten (tot 300 kg, 1 x 1 x 1 m) en kleine objecten (zoals cassettes, 1 kg, 0,1 x 0,1 x 0,1 m) op te pakken en te verplaatsen.

De eisen zijn gespecificeerd in de tabel op de volgende pagina.

Grote zorg moet worden besteed aan de betrouwbaarheid van de grijper. Het geheel dient tien jaar zonder onderhoud te kunnen werken en 100 000 cycli te kunnen volbrengen. Verder dient het systeem 'fail safe' te zijn: stroomuitval mag niet leiden tot het verlies van een object.



Figuur 2 Aan de Columbus module wordt het hier getoonde platform gekoppeld met daaraan een robotarm voor het plaatsen en verwijderen van instrumenten

	Eis
Geleidingsbereik	± 5 mm, axiaal en radiaal ± 3 graden, om alle assen
Nauwkeurigheid na fixatie	$\pm 0,2$ mm; 0,1 graad
Nominale belasting	5 N en 3 Nm
Maximum massa	3 kg
Maximum dimensies	0,15 x 0,1 x 0,1 m
Omgevingsfactoren	temperatuur fluctuaties: $\pm 50^\circ\text{C}$ hoog vacuüm atomaire zuurstof radiatie

Problemanalyse

Een groot voordeel ten opzichte van traditionele grijpersystemen is, dat in dit geval elk op te pakken voorwerp kan worden uitgerust met een bevestigings-element, zodanig ontworpen dat het precies op de gripper past. Een traditionele "vinger" gripper, die een universaliteit moet bieden in het oppakken van voorwerpen van verschillende vorm, ligt hier niet voor de hand.

Alvorens mogelijke concepten te genereren is het allereerst noodzakelijk te onderzoeken hoe een connectie tussen de robot-arm en het instrument of object (bijvoorbeeld een film-cassette) wordt gerealiseerd. Drie stappen kunnen worden onderscheiden:

1. De robotarm beweegt de gripper richting doel binnen zijn eigen nauwkeurigheid van 5 mm en 0,2 graad. Hierbij komt de eerste functie van de interface naar voren. De gripper zal namelijk tijdens het laatste stukje van de beweging moeten zorgen voor een geleiding naar zijn uiteindelijke positie om een connectie te kunnen bewerkstelligen: *de geleidingsfunctie*.
2. In de laatste positie zullen voldoende nauwkeurige opleggingen moeten worden aangeboden: *de positioneerfunctie*.
3. Na positionering zal de positie moeten worden behouden: *de fixatiefunctie*.

Concepten voor deze drie functies – geleiden, positioneren en fixeren – zullen in het hiervolgende worden behandeld.

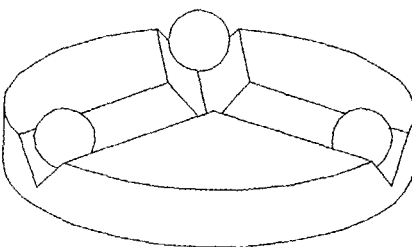
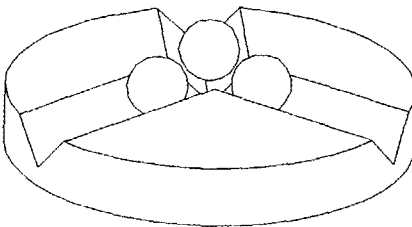
Positioneren

Voor het positioneren is gekozen voor een isostatische oplegging van drie ko-

gels in drie V-groeven, met de kogels aan het bevestigings-element, zie figuur 3 [1]. Elke kogel heeft twee contactpunten met een V-groef. Elk contactpunt is slechts in één richting stijf, zodat 1 graad van vrijheid per contactpunt wordt vastgelegd. Het totaal van zes contactpunten ($3 \times 2 = 6$) zorgt dus voor een vastlegging van het te grijpen object in al de 6 onafhankelijke vrijheidsgraden.

Een kracht is nodig om het contact tussen de kogels en de V-groeven te behouden (het fixeren).

Het voordeel van het V-groeven principe is dat dit flexibiliteit biedt in het positioneren van objecten van verschillende afmetingen, zie de twee plaatjes van figuur 3. Deze flexibiliteit is noodzakelijk om in staat te zijn met dezelfde interface zowel grote instrumenten



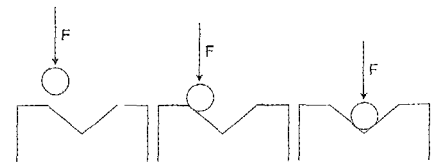
Figuur 3 Isostatische oplegging van drie kogels in drie V-groeven voor het positioneren van de gripper

als kleine objecten vast te pakken. Daarnaast biedt het systeem een thermisch centrum, in dit geval het snijpunt van de drie V-groeven. Bij uitzetting blijft dit punt op zijn plaats. Bij de grote temperatuursvariaties die op kunnen treden in de ruimte, leidt verschil in homogene thermische uitzetting tussen de gripper en het bevestigings-element tot het vrij schuiven van de kogels in de V-groeven, zodat de delen elkaar niet kunnen belasten.

Geleiden

Het V-groeven systeem kan tevens geschikt worden gemaakt om de gripper te geleiden naar zijn eindpositie. Dit is geïllustreerd in figuur 4

Het V-groeven systeem vervult dus twee functies: positioneren en geleiden



Figuur 4 Het geleiden van de gripper naar zijn eindpositie met behulp van het V-groevensysteem van figuur 3

Fixeren

De kogels in de V-groeven zorgen voor een positionering in al de zes onafhankelijke vrijheidsgraden. Slechts één kracht is noodzakelijk om deze positie te fixeren.

Veel mechanismen zijn reeds ontwikkeld om deze sluitkracht te genereren. De meeste werken volgens het principe van het omvatten van het voorwerp met haken of bajonetsystemen. Weinige bieden een absolute scheiding van positioneren en aanbrengen van de sluitkracht. Het hier uitgewerkte systeem voldoet aan deze laatste voorwaarde wel

Uit het oogpunt van betrouwbaarheid en duurzaamheid is gekozen is voor een magnetische sluitkracht, geleverd door een permanente magneet (geen bewegende delen). Uit onderzoek bleek dat een kracht van 500 N op een diameter van 32 mm (klein genoeg om de kleinste objecten te kunnen grijpen) haalbaar is. Door het inbouwen van een spoel, die een tegengesteld magnetisch veld levert, kan een voorwerp worden ontkoppeld. Hiermee is een systeem

Grijpermechanisme voor ruimteplatform

mechatronica

ontstaan dat op eenvoudige wijze een relatief hoge kracht aanlegt. Een groot voordeel van een permanente magneet/spoel configuratie is dat een object veilig verbonden blijft met de robotarm bij stroomuitval. Tevens is het energieverbruik laag daar alleen stroom nodig is tijdens koppeling en ontkoppeling van een object.

Om absolute zekerheid te verkrijgen dat een object niet wordt verloren, is ervoor gekozen om een extra veiligheids-sluiting (vormgesloten verbinding) toe te voegen. Deze moet gezien worden als een vangnet voor extreme situaties, zoals het inslaan van ruimtepuin en het verliezen van controle over de robotarm als gevolg van softwarefouten of storingen. Dit zou kunnen leiden tot te grote krachten (> 500 N) tussen gripper en bevestigingselement en het verlies van het object, met als gevolg het in gevaar brengen van de gehele missie door los zwevende voorwerpen

Het ontwerp

In de volgende twee paragrafen zullen respectievelijk de magneet en de veiligheidssluiting worden behandeld

De magneet

Configuraties, waarin een permanente magneet een kracht levert en een spoel de kracht neutraliseert, zijn verkrijgbaar onder de naam permanente elek-

tromagneten. De commerciële versies zijn echter voor deze toepassing ongeschikt. Ten eerste zijn voor de kracht die nodig is (> 500 N) de diameters van deze magneten te groot. Ten tweede is de afscherming van deze magneten niet voldoende voor de omstandigheden op het ruimtestation. Magnetische velden kunnen storingen veroorzaken in instrumenten. Een goede magnetische afscherming is essentieel.

Voor de gripper is dan ook een nieuwe magneet ontworpen. De ontwerpeisen zijn kort samengevat:

- te leveren kracht minimaal 500 N;
- magneetdiameter maximaal 32 mm;
- laag extern veld, ook als er geen voorwerp is gepakt.

Om aan deze eisen te kunnen voldoen is het noodzakelijk om op een juiste manier de magnetische velden van de permanente magneet en de spoel te 'leiden'. Hoe dit wordt gerealiseerd is te zien in figuur 5. De pot is aan de robot en de schijf is aan het op te pakken voorwerp bevestigd. In de eerste situatie, zie figuur 5a, is de spoel uitgeschakeld.

De pot, de schijf en het hart zijn gefabriceerd van weekijzer. De dikke lijn geeft het circuit aan met de laagste magnetische weerstand; weekijzer heeft een lage en lucht heeft een hoge magnetische weerstand. Dit betekent dat een groot deel van de veldlijnen

door de schijf zullen lopen en er een kracht wordt uitgeoefend, die de schijf zo dicht mogelijk naar de pot getrokken houdt.

In de tweede situatie, zie figuur 5b, is de spoel ingeschakeld. De spoel levert een tegengesteld magnetisch veld, waardoor de veldlijnen van de permanente magneet 'naar beneden worden gedrukt' en in het aangegeven circuit zullen gaan lopen - vergelijk twee noordpolen die elkaar afstoten. Tussen de magneet en de schijf heerst geen magnetisch veld en er bestaat dus geen krachtwerking.

Twee taken zijn nu volbracht:

- het leveren van een kracht op de schijf en
- het doen wegvallen daarvan, door middel van een spoel.

Tevens is te zien dat het externe magnetisch veld laag zal zijn, daar het grootste deel van de veldlijnen door de aangegeven circuits binnen de magneet zullen lopen.

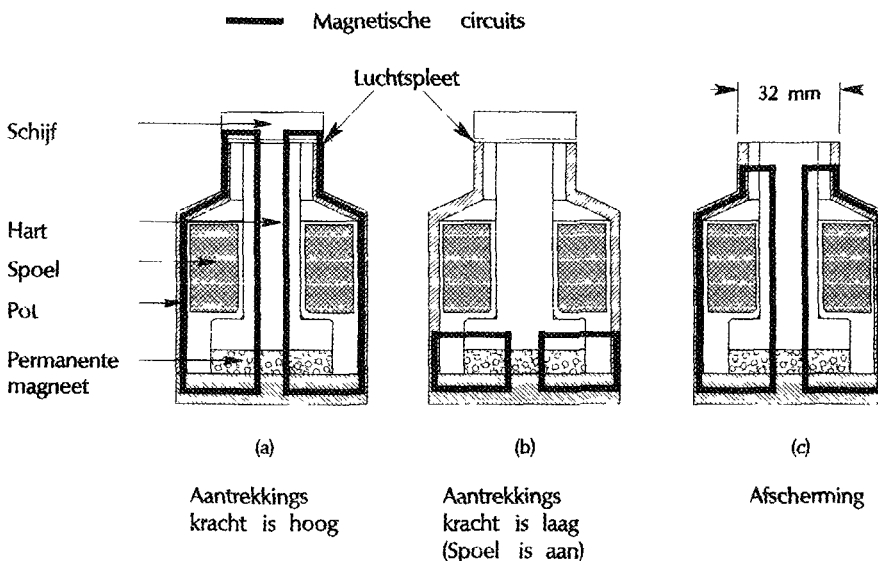
Ook in de derde situatie, zie figuur 5c, zal het externe magnetisch veld laag zijn. De verjonging aan de top zorgt voor afscherming als er geen schijf op de magneet ligt. Dit is het geval in situaties waarin de robotarm niet wordt gebruikt, wacht op zijn volgende opdracht en er dus geen voorwerp bevestigd zit aan de robotarm.

Om dit concept te optimaliseren is gebruik gemaakt van het eindige-elementen-pakket MAGGIE. Figuur 6 laat de drie situaties en de loop van de veldlijnen, berekend met behulp van MAGGIE, nog eens zien.

MAGGIE berekende een op de schijf uitgeoefende kracht van 580 N bij een spleetbreedte van 0,1 mm, hetgeen voldoende is om de objecten te fixeren.

De veiligheidssluiting

Zoals al eerder opgemerkt is een absolute zekerheid ten aanzien van het niet verliezen van voorwerpen essentieel. Bij extreme situaties biedt de magneet niet voldoende bescherming. Daarom is het noodzakelijk een extra veiligheidssluiting in het ontwerp aan te brengen, die in staat moet zijn hoge belastingen op te vangen. Deze sluiting zal

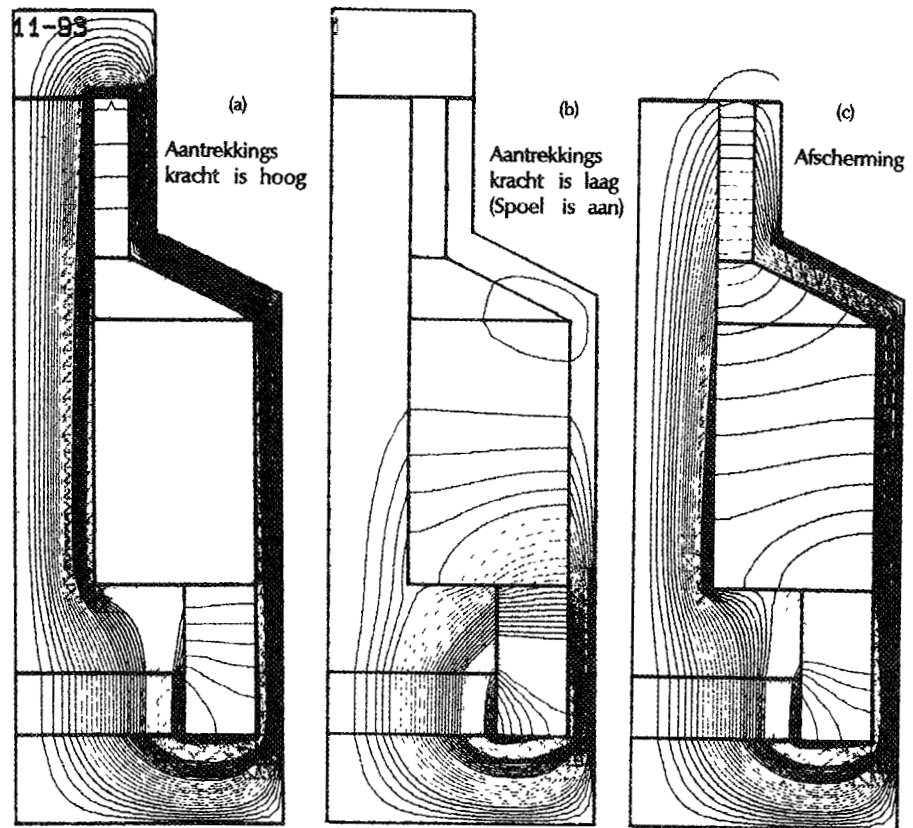


Figuur 5 Het leiden van de magnetische velden van magneet en spoel, zie tekst

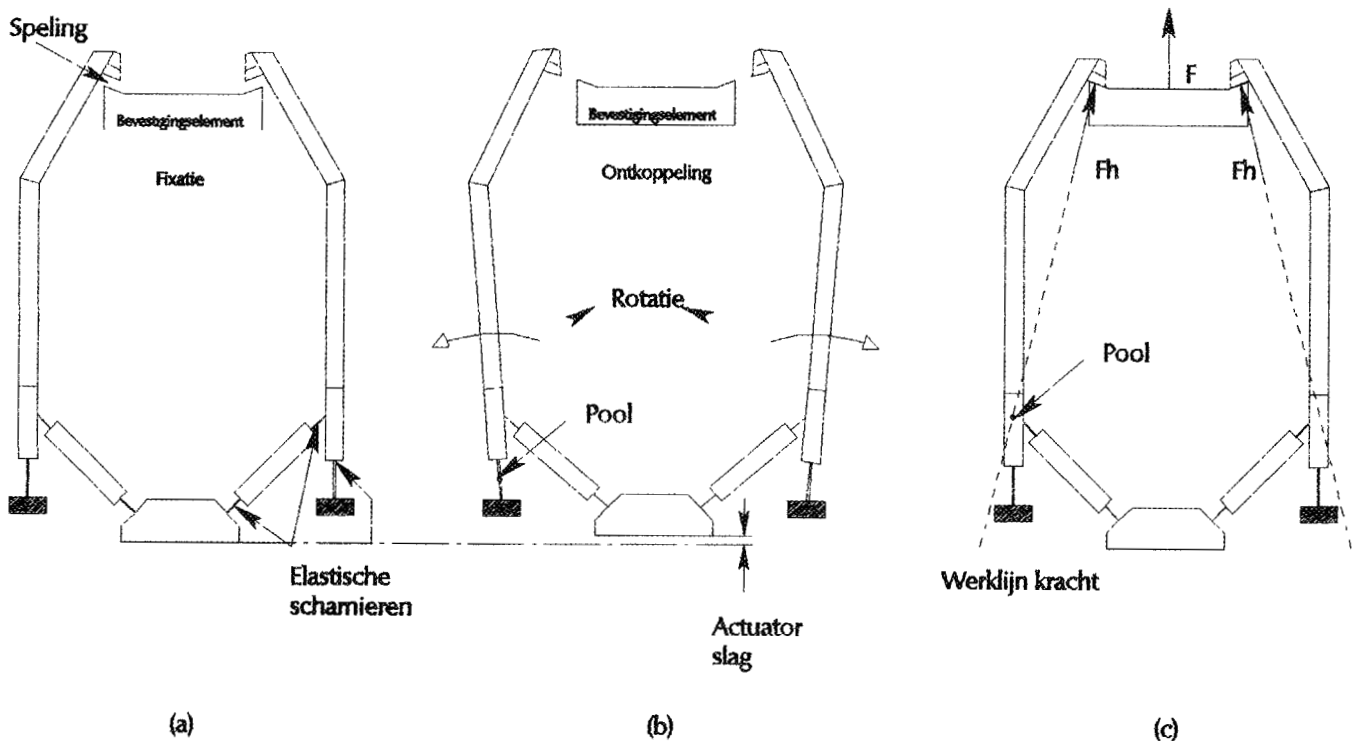
bewegende delen bevatten. Hierbij is gekozen voor elastische scharnieren, omdat deze zeer betrouwbaar zijn. Rekening houdend met de vermoeiingsgrens van het materiaal is het relatief eenvoudig een mechanisme te ontwerpen dat in staat is 10^6 cycli uit te voeren. Bovendien is smering niet nodig, in tegenstelling tot lagers; een voordeel omdat smering moeilijk is in vacuüm.

Rekening houdend met de ruimte die al wordt ingenomen door de magneet en de V-groeven, is gekozen voor een haak-mechanisme dat de objecten omsluit. Een 2D presentatie hiervan is gegeven in figuur 7.

In figuur 7a is het mechanisme in rust. Het bevestigingselement (de drie kogels zijn hier niet getekend) is dan omsloten. Tussen de haken, in gesloten toestand, en het bevestigingselement zit 0,2 mm speling, zodat ze geen vrijheidsgraden van het bevestigingselement vastleggen (alle 6 vrijheidsgraden zijn immers al vastgelegd door de drie kogels in de drie V-groeven). Door een verplaatsing aan te bieden op het mechanisme in figuur 7b, zullen de elastische elementen buigen, wat resulteert in het openen van de haken en het ont-



Figuur 6 Ter optimalisering van het ontwerp van magneet en spoel zijn voor drie situaties de loop van de veldlijnen berekend met het eindige-elementen-pakket MAGGIE



Figuur 7 Het haakmechanisme als veiligheidsluiting teneinde te voorkomen dat voorwerpen verloren gaan a) in rust, b) het openen, c) beveiliging tegen ongewild openen

Grijpermechanisme voor ruimteplatform

mechatronica

koppelen van het bevestigingselement. Indien er een kracht wordt uitgeoefend op het bevestigingselement – wat kan gebeuren in extreme situaties – is het mogelijk de werklijn van de kracht zo te leiden dat hij de rotatiepool van de haak snijdt, zie figuur 7c. Op deze manier zal de haak nooit openen, en zal het bevestigingselement veilig bevestigd blijven aan de grijper.

Vrijheidsgraden haakmechanisme

Het haakmechanisme in zijn uiteindelijke vorm is afgebeeld in figuur 8. Drie haken zijn verbonden met het middenlichaam. Elke haak legt 1 graad van vrijheid van het middenlichaam vast (vergelijk gebogen bladveer [1]). In totaal leggen de haken dus $3 \times 1 = 3$ graden van vrijheid van het middenlichaam vast, respectievelijk de verplaatsingen x , y en de rotatie q . Het middenlichaam kan tussen de twee schijven 2,5 mm heen en weer bewegen, wat resulteert in het openen en sluiten van de haken. Het middenlichaam kan worden gezien als een stoel met drie poten die in de ruststand in drie punten contact maakt met de onderschijf (een veer zorgt voor de voorspanning) en na actuatie in drie punten contact maakt met de bovenschijf. Deze drie contactpunten zijn

nodig om de overige 3 vrijheidsgraden (de verplaatsing z en de rotaties o en p) vast te leggen in de twee uiterste standen (gesloten en open haken).

De actuatie wordt verricht door een paraffineactuator [2]. Opwarming en dus uitzetting van paraffine door middel van verwarmingselementen zorgt voor de benodigde slag en kracht van de zuigerstang.

Het totale ontwerp

Het totale ontwerp is weergegeven in figuren 9a en b.

De bevestigingselementen – grote voor instrumenten en kleine voor objecten zoals cassettes – bestaan uit een titanium deel waaraan drie plaatjes met aan de onderkant bolvormige segmenten zijn bevestigd (“de kogels”). Binnen het titanium deel wordt de weekijzeren schijf gemonteerd.

De materialen van de interface zijn zo gekozen dat de verschillen in thermische uitzetting minimaal zijn. De grootste thermische uitzetting bevindt zich tussen de V-groeven en de basis. Deze wordt opgevangen door de drie bladveren.

Conclusie

Een grijpermechanisme is ontwikkeld voor het manipuleren van instrumenten op het Space Station. Het mechanisme voldoet aan de gestelde eisen wat betreft functionele aspecten, afmetingen, gewicht en nauwkeurigheid.

De functies positioneren en geleiden zijn gerealiseerd door middel van het V-groeven systeem, waarmee een hoge nauwkeurigheid en stabiliteit wordt bereikt. Voor de functie fixeren zijn een magnetische actuator en een haakmechanisme ontwikkeld.

De magnetische actuator levert een krachtgesloten verbinding (580 N) die sterk genoeg is voor nominale acties. De nieuw ontwikkelde actuator is praktisch vrij van externe magneetvelden. Alleen tijdens koppelen en ontkoppelen wordt energie verbruikt (12 W).

Het haakmechanisme is toegevoegd om veiligheidsredenen en heeft een belastbaarheid van 8000 N. Dit is voldoende bij calamiteiten. Ook hier wordt alleen tijdens koppeling en ontkoppeling energie verbruikt (10 W).

Bij stroomuitval blijft een voorwerp veilig bevestigd aan de robot-arm.

Het ontwikkelde fixatiesysteem is zeer betrouwbaar, heeft een grote levensduur (> 10 jaar, $> 10^6$ cycli), is energiezuinig en vormt geen stoorfactor voor andere instrumenten.

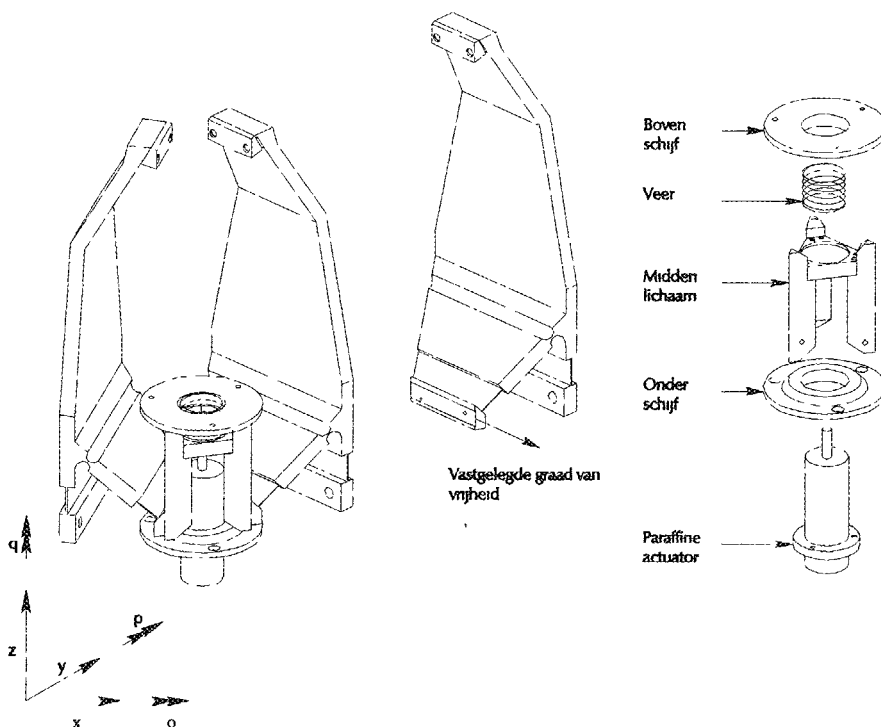
Literatuur

- [1] M.P. Koster Constructieprincipes, dictaat UT 113136, Enschede 1992
 [2] HOP actuators, (Starsys research, 5757 Cental Avenue, Suite E, Boulder, Colorado, USA)

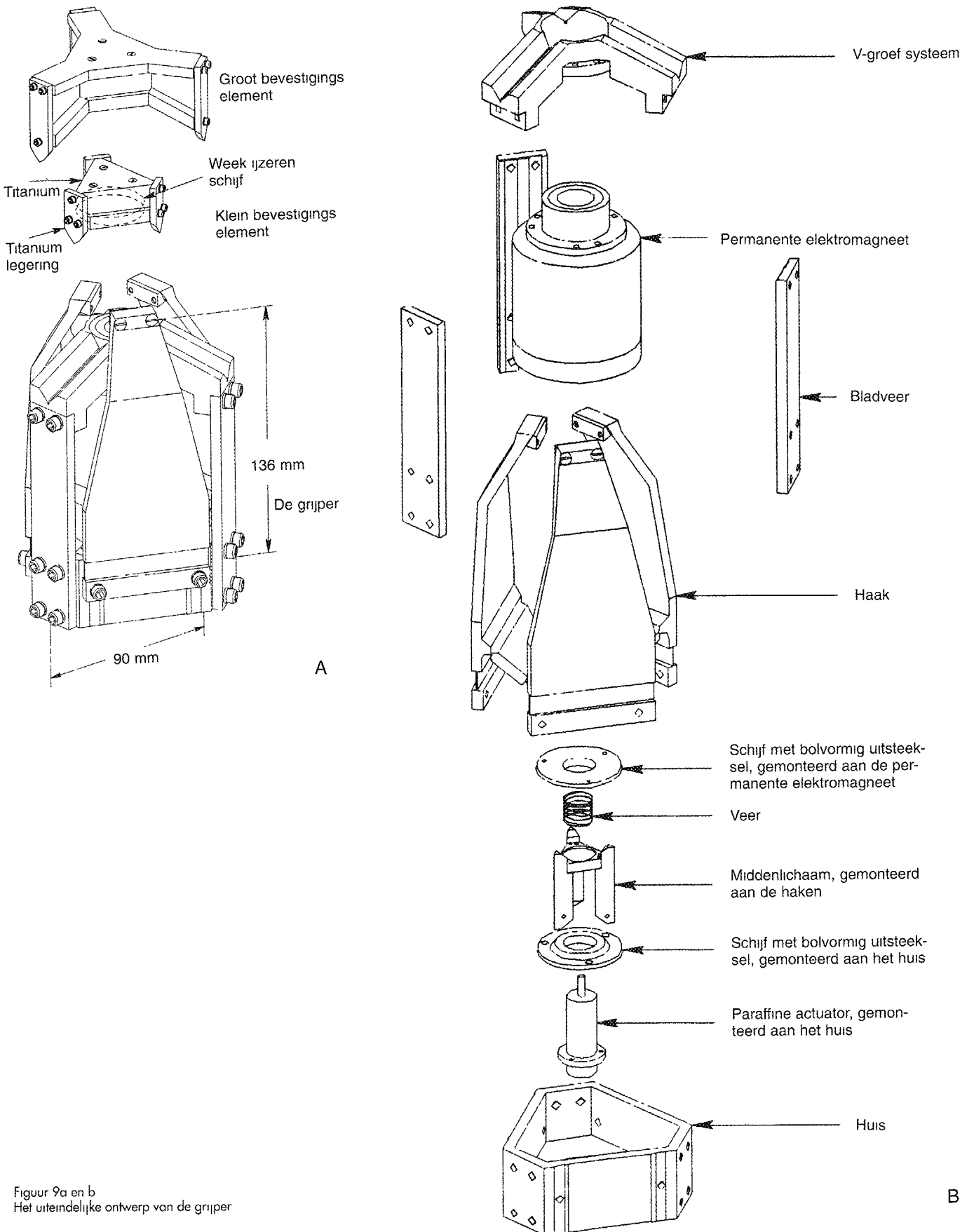
Auteursnoot

Dit interface-systeem is ontworpen en als prototype gebouwd door de auteur bij de afdeling Instrumentatie Ruimteonderzoek van TNO/TPD te Delft als afstudeerproject bij zijn studie aan de Universiteit Twente, faculteit der Werktuigbouwkunde. Zijn begeleider bij TNO/TPD was ir. B.C. Braam. Aan de Universiteit Twente (Mechatronic Research Centre Twente) waren zijn begeleiders Prof. dr. ir. M.P. Koster en ir. H. Draijer.

Dit artikel is mede tot stand gekomen door initiatieven van het Mechatronica Platform, dat zich inzet voor de stimulering van mechatronische oplossingen bij het ontwikkelen van producten.
 Voor nadere informatie:
 Secretariaat Mechatronica Platform
 p/a Vereniging I-ME, Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer
 Tel. 079-531282, fax 079-531365



Figuur 8 Het haakmechanisme in zijn opbouw



Figuur 9a en b
Het uiteindelijke ontwerp van de gripper