

Ontwerp van bewegings

Thales Nederland schakelde mechatronisch ontwerp bureau Demcon in voor het in zeer korte tijd ontwerpen, testen en bouwen van een demonstrator van een tweessig lanceerplatform voor raketten. Onder grote tijdsdruk wisten de ontwerpers van Demcon in het ontwerp enkele noviteiten te introduceren. Zoals een slimme spelingscompensatie in de aandrijvingen en een energie-efficiënte compensatie voor de onbalans in de elevatie van het platform. Het resultaat is een staaltje van fijnmechatronica in een grofstoffelijke constructie.

• **Rini Zwikker, Peter Rutgers en Hans van Eerden** •

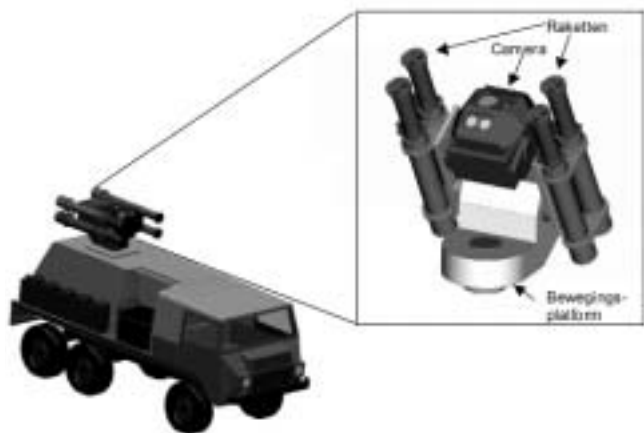
Fabrikant van defensie-elektronica Thales Nederland in Hengelo is helemaal ingericht op langdurige ontwerptrajecten voor producten die moeten voldoen aan zware militaire specificaties (MILSPEC). Dus toen zusterbedrijf Thales UK, producent van het Starstreak missile, kwam met het verzoek om een demonstrator die niet aan MILSPEC hoefde te voldoen maar wel snel geleverd moest worden, zocht Thales contact met Demcon in Oldenzaal. Dat middelgrote mechatronisch ontwerp bureau, onderdeel van de Demcon Groep, werkt volgens een geïntegreerde mechatronische aanpak en beschikt over de benodigde flexibiliteit om een dergelijk project snel – de gestelde termijn bedroeg veertig weken – te kunnen opleveren.

Eisenpakket

De opdracht betrof een tweessig bewegingsplatform, voorzien van vier lanceerbuizen en een camera voor doeldetectie; zie de schets in Afbeelding 1. Voor het volgen van een bewegend doel moest het platform rotaties kunnen verzorgen om twee assen: een verticale (azimuth) en een horizontale (elevatie); zie Afbeelding 2. Het platform (bestaande uit een azimuth-huis waaraan op de horizontale as het elevatiehuis met lanceerbuizen en camera is verbonden) moest met zijn azimuth-huis worden gemonteerd op een voertuig. Het was bedoeld voor gebruik op beurzen en bij demonstraties voor potentiële klanten. Daarom hoefde het niet volledig te voldoen aan MILSPEC (onder meer wat betreft operatie onder extreme temperatuurcondities) en kon het oorspron-

een tweeassig platform

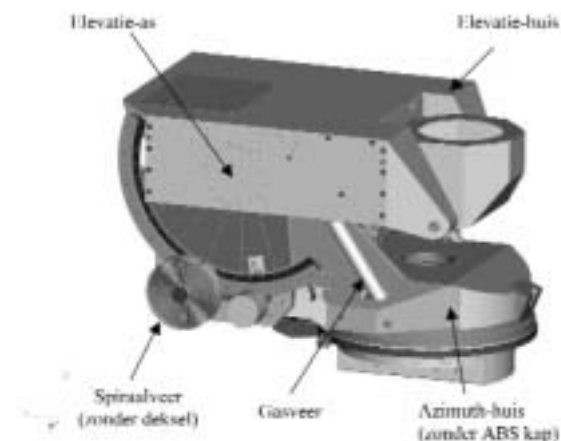
kelijk 160 pagina's tellende eisendocument tot twintig pagina's worden teruggebracht. Dit maakte een korte realisatietijd mogelijk.



Afbeelding 1. Schets van het oorspronkelijke concept van een tweeassig bewegingsplatform voor een lanceerinstallatie gemonteerd op een voertuig.

De overblijvende ontwerpeisen waren echter nog zwaar genoeg. Zo mocht de massa van het platform, exclusief lanceerbuisen en camerasysteem, de 240 kg niet overschrijden. De maximale bouwhoogte bedroeg, met het oog op vervoer in een vliegtuig, 650 mm, en het energieverbruik moest, voor gebruik in het veld, minimaal zijn. Het bereik van de azimuth-rotatie liep van -260° tot $+260^\circ$; dat stelde hoge eisen aan de doorvoer van de omvangrijke bekabeling van de vaste wereld (voertuig) naar de draaiende wereld (het azimuth-huis). Als oplossing werd gekozen voor een kabeltrommel, waarin de kabels in de extreme posities langs de binnenwand hetzij de buitenwand zijn opgerold. Elevatie moest mogelijk zijn tussen -10° en $+65^\circ$. Dit grote bereik maakte de oorspronkelijk bedachte constructie, met aan

weerszijden van het elevatiehuis twee lanceerbuisen onder elkaar, fysiek onmogelijk. In het definitieve ontwerp zijn de vier buizen twee aan twee naast elkaar geplaatst. Voorts waren er nog pittige eisen aan positioneer- en volgnauwkeurigheden (enkele mrad) en rotatiesnelheden en -versnellingen, waaronder een azimuth-rotatiesnelheid van liefst $100^\circ \text{ sec}^{-1}$; deze bleek uiteindelijk niet geheel haalbaar.



Afbeelding 2. Mechanisch concept voor het tweeassig bewegingsplatform.

Aandrijving

Het bewegingsplatform kent, zoals reeds aangegeven, twee rotatie-assen, voor azimuth-rotatie en elevatie. Beide rotaties worden aangedreven door identieke Maxon RE75-gelijkstroommotoren: de verschillende groottes van de vereiste koppels leidden, samen met het beschikbare ruimtebudget en de vereiste mechanische stijfheid, tot vier motoren voor de azimuth-rotatie en twee voor de elevatie. Dit maakt tevens spelingscompensatie mogelijk, welke hieronder zal worden beschreven. Per rotatie-as zijn twee motoren

uitgevoerd met relatieve encoders met hoge resolutie, voor de servoregeling, en één motor (tevens) met een absolute encoder met lagere resolutie, welke 'homing' in elke stand mogelijk maakt. De twee eerstgenoemde motoren hebben tevens een houdrem, maar daarnaast hebben beide rotatieassen ook nog een handmatig bediende pen-in-gat 'locking'. De lagering van de azimuth-as vindt plaats met een groot kruisrollenlager; vanwege de massa-eis is gekozen voor een dunringlager. Voor elevatie is de constructie voorzien van twee voorgespannen hoekcontactlagers in O-opstelling op een holle as. De beide aandrijvingen voor de azimuth- en de elevatie-as hebben een tweetraps-reductie: eerst een planetaire transmissie 1:20, daarna een rondsel naar een groot tandwiel(segment) 1:10.

Het platform bevat ten slotte nog een derde bewegingsas. Deze wordt alleen gebruikt voor het wegklappen van de camera met behulp van een stelmotor. Dit reduceert de hoogte wanneer voertuig met platform in een vliegtuig moeten worden vervoerd. Voor wegvervoer reduceert het de stootkrachten op de elevatie-aandrijving, omdat de weggeklapte camera direct op het azimuth-huis afsteunt.

Stijfheid

Vanwege genoemde massa-eis moest het platform licht worden uitgevoerd, terwijl het tegelijk wel voldoende stijf moet zijn, met het oog op hoge eigenfrequenties, boven de benodigde servo-bandbreedte van het systeem. Daartoe is het platform opgebouwd uit gelast dun plaatwerk (1-2 mm), volgens de principes van goede krachtinleiding en optimale krachtlijnen. Bij analyse bleek de vervormbaarheid van het azimuth-kogellager een dominante factor voor de overall stijfheid van de constructie te zijn. Daaraan is bij de eindigelementenmodellering dan ook bijzondere aandacht besteed. Het gebruik van een dunringlager stelt tevens hoge eisen aan de inbouwnauwkeurigheid, omdat het zijn stijfheid en cilindriciteit ontleent aan de omgeving waarop het is vastgeschroefd. De lagerpassing in het azimuth-huis moest derhalve zeer nauwkeurig worden uitgevoerd, met een vlakheidseis die in eerste instantie op 0,01 mm werd gesteld. Uiteindelijk bleek 0,02 mm haalbaar. Dit werd gerealiseerd met een speciaal vervaardigd stijf hulpframe en een grote carousel-draaibank, waarop het azimuth-huis spanningsvrij kon worden opgehangen.

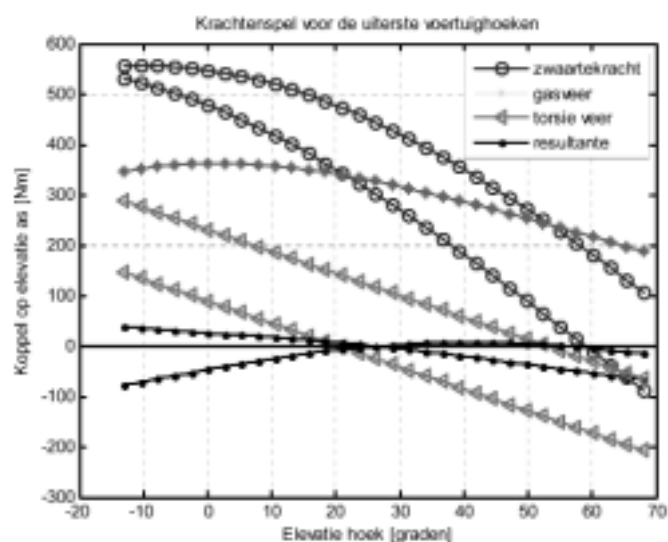
Onbalans

Een andere ontwerpuitdaging lag in de onbalans van het elevatiehuis. Deze forse onbalans is inherent aan de constructie vanwege de door de elevatiehoeken bepaalde plaatsing van lanceerbuisen en camera ten opzichte van de elevatie-as, en verandert bovendien afhankelijk van het aantal raketten. De

massa van het elevatiehuis zelf bedraagt uiteindelijk slechts 28 kg, maar de 'aanhangende' massa ligt in de orde van 200 kg. De compensatie voor die onbalans is opgelost met een 'tweetrapsraket'; zie Afbeelding 3. Een eerste, passieve trap in de vorm van een gasveer vangt het grootste deel van de onbalans op. Een tweede, actieve trap bestaat uit een spiraalveer die op het tandwielsegment van de aandrijving is gemonteerd en het resterende onbalanskoppel opvangt. De stijfheid van deze spiraalveer is zodanig gekozen dat deze zo goed mogelijk overeenkomt met de variatie van het resterende onbalanskoppel met de elevatiehoek. Omdat het voertuig echter in zijn geheel 10° scheef kan staan en het aantal raketten variabel is, is het andere uiteinde van de torsieveer verbonden aan een extra elektromotor. Dit is weer een Maxon RE75-motor, maar nu met een veel grotere reductie, waardoor de motorstroom kleiner is. De positie van deze motor wordt zodanig geregeld dat het koppel van de beide andere motoren terug naar nul wordt geregeld. Deze energie-efficiënte oplossing voor onbalanscompensatie is niet eerder toegepast in een dergelijk bewegingsplatform.

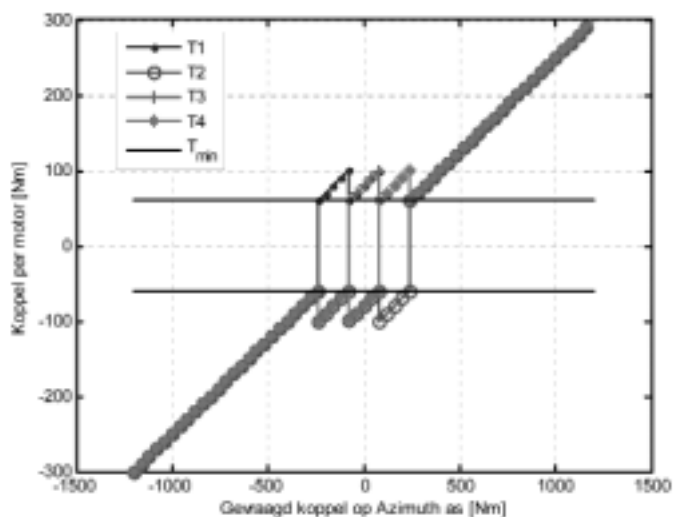
Spelingscompensatie

Een beperkende factor voor de bewegingsnauwkeurigheid van het platform was de speling in de tandwieloverbrenging van rondsel naar groot tandwiel. Deze speling is noodzakelijk in verband met het grote temperatuurbereik en de potentieel grote temperatuurgradiënten in de constructie. Het



Afbeelding 3. Compensatie van de onbalans van het elevatiehuis met behulp van een passieve gasveer en een actieve spiraalveer (torsieveer). De twee verschillende curves per grootte betreffen de beide uiterste (scheef)standen van het voertuig.

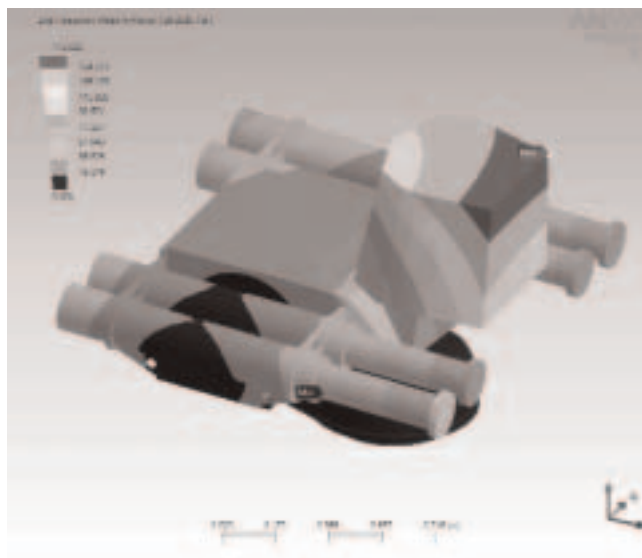
gebruik van meerdere motoren per as maakt het mogelijk om hiervoor te compenseren. Er moet dan voor worden gezorgd dat tenminste de motoren voorzien van encoders altijd aan een bekende kant aan het einde van de speling staan. Er moet dan altijd een minimaal koppel (T_{min}) op elke motor staan. Met vier motoren kan dat, door het koppel per motor als functie van het totaal gevraagde koppel in te stellen volgens Afbeelding 4. Dit komt er op neer dat bij grote koppels alle motoren dezelfde kant op werken, en dat bij de nuldoorgang van het koppel de motoren één voor één ‘oversteken’, waarbij op het moment van ‘oversteken’ van één motor de andere drie samen dit ‘oversteekkoppel’ compenseren. Hiermee wordt echter een trilling van de motoren tegen elkaar in geëxciteerd. Daarom bestaat de regeling van de motoren uit een common-mode regeling, die de gemiddelde positie van de motoren – en daarmee de positie van de last-as – regelt, en een differential-mode regeling, die de geëxciteerde trillingen dempt.



Afbeelding 4. Principe van de spelingscompensatie. Zie de tekst voor een toelichting. Motor 1 maakt als eerste de ‘oversteek’ en motor 2 als laatste; dat zijn de beide motoren met een encoder. De hoogste nauwkeurigheid wordt behaald zolang de motoren met encoders tegengestelde koppels hebben, omdat dan de temperatuurafhankelijke speling geen invloed op de common-mode positie heeft. Bij normaal tracking-bedrijf, waarbij de hoogste nauwkeurigheid gevraagd wordt, is de versnelling altijd gering, zodat dan in dit gebied kan worden gewerkt.

Analyse

Het resulterende mechanische ontwerp van het platform werd onderworpen aan eindige-elementenanalyse om te komen tot een optimalisatie van het dynamisch gedrag. Daarbij ging het met name om de eigenfrequenties van de constructie. Deze moesten met voldoende marge liggen boven de servo-bandbreedte van het systeem. Op de grond van de vereiste richtnauwkeurigheden en verwachte stoorkoppels werd de benodigde bandbreedte bepaald op 20 Hz. Na meerdere aanpassingen, onder meer van de krachtleiding in het azimuth-lager, van de omgeving van de elevatie-lagers, van de bevestiging van de lanceerbuizen en van de camera, werd een eerste eigenfrequentie bereikt van 30 Hz, hetgeen voldoende marge oplevert. Afbeelding 5 toont de bij die eerste eigenfrequentie behorende beweging (‘eigenmode’), het vooroverbuigen van de camera op het elevatiehuis. De flexibiliteit wordt hierbij vooral veroorzaakt door de bevestigingspunten van de aangedreven spindel, die het wegklappen van de camera mogelijk maakt. Om de massa te beperken is hier dun plaatwerk gebruikt, terwijl noodgedwongen de bevestiging van de spindel ver onder het zwaartepunt van de camera zit. Na het bouwen bleek met een eenvoudige hamertest, waarbij de verstoring met de encoders werd gemeten, dat de berekende eigenfrequentie goed klopte.



Afbeelding 5: Een resultaat van eindige-elementenanalyse van het platform-ontwerp toont de beweging behorende bij de laagste eigenfrequentie: vooroverbuigen van de camera bij 30 Hz (rechtsboven is de verplaatsing maximaal).

Tot slot

Naast het mechanisch ontwerp verzorgde Demcon ook de elektronica en de software voor de besturing van het platform. Op dat laatste aspect vond, ook voor Thales, een pilot met directe codegeneratie plaats: het Matlab-Simulink blokdiagram voor de besturing, ontwikkeld op een normale pc, werd meteen overgezet naar een besturingscomputer op het platform, in de vorm van een zogeheten xPC Target Box. Dit zorgde voor een flinke tijdsbesparing ten opzichte van de voorheen gangbare werkwijze, waarin het blokdiagram eerst door programmeurs moest worden omgezet naar C-code, die vervolgens op de besturingscomputer kon worden geïmplementeerd.

Dankzij deze versnelling in het softwareontwerptraject en de geïntegreerde mechatronische aanpak wist Demcon het project in de gestelde korte tijd te realiseren. Dit uiteraard in goede samenwerking met opdrachtgever Thales Nederland, dat zijn specifieke kennis inbracht, onder meer op het gebied van elektromagnetische compatibiliteit, bekabeling en lager-

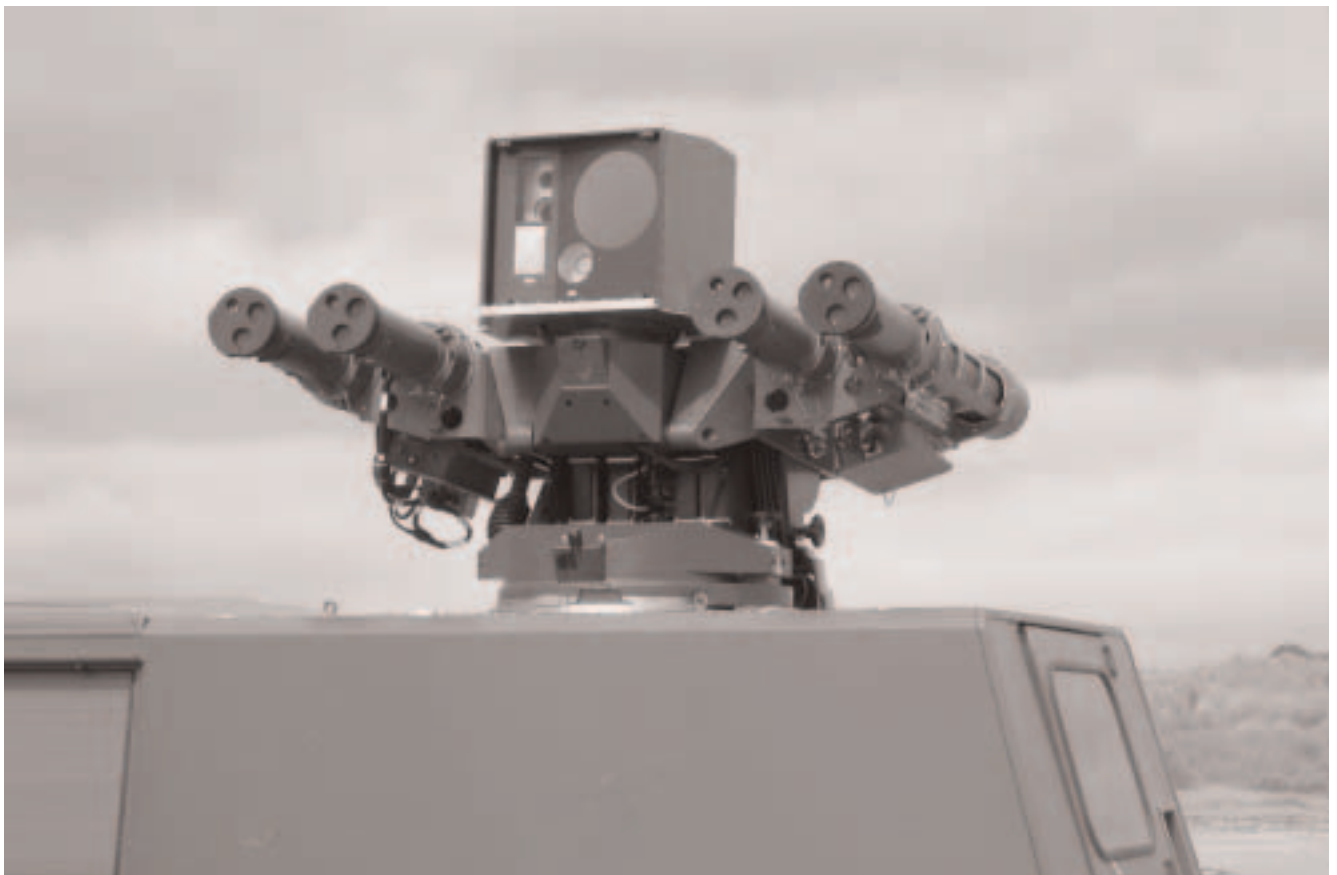
modellering. Het eindresultaat van Demcon slaagde voor de acceptatietest van Thales; zie Afbeelding 6 voor de uiteindelijke uitvoering. Niet alle vooraf gestelde specs waren gehaald, maar omdat het een in korte tijd te ontwikkelen en bouwen demonstrator betrof, vormde dit geen bezwaar. De samenwerking tussen Thales Nederland en Demcon was doeltreffend gebleken.

Auteursnoot

Rini Zwikker is senior mechanical engineer bij mechatronisch ontwerp bureau Demcon in Oldenzaal, tevens leider van dit project. Peter Rutgers is senior mechatronics consultant bij Demcon. Hans van Eerden is freelance tekstschrijver te Winterswijk en tevens eindredacteur van Mikroniek.

Informatie

www.demcon.nl
www.thales-nederland.nl



Afbeelding 6. De uiteindelijke uitvoering van het tweeassig bewegingsplatform met vier lanceerbuizen, gemonteerd op een voertuig.