

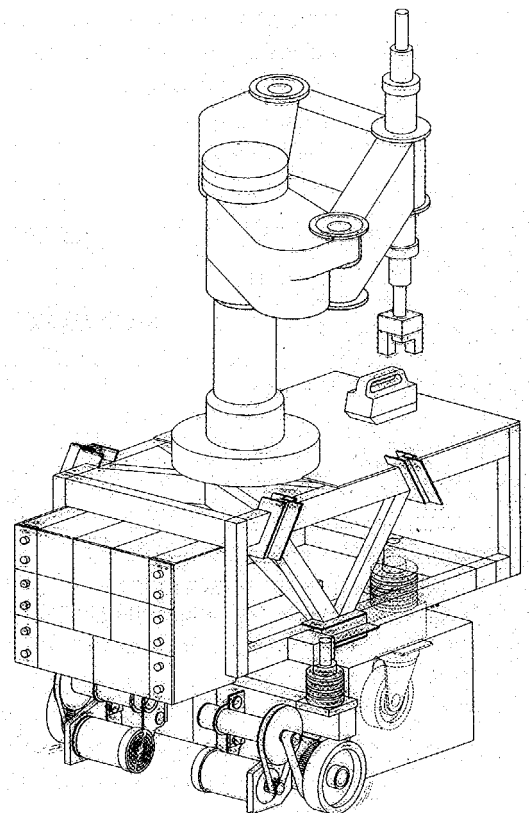
Fabriek van de toekomst

MART: Mobiele Autonome Robot Twente

M.P. Koster *Het project MART (Mobiele Autonome Robot Twente) was bedoeld om te onderzoeken hoe diverse specialisten kunnen samenwerken in een mechatronisch team. Zo'n team stelt zich ten doel een gecompliceerd technisch systeem te ontwikkelen met behulp van oplossingen vanuit verschillende disciplines. In dit geval was een geautomatiseerde assemblagefabriek het onderwerp van een gezamenlijke inspanning van specialisten uit de werktuigbouwkunde, regeltechniek en informatica. Die inspanning resulteerde in een voertuig dat autonoom kan bewegen langs een vooraf - afhankelijk van het te assembleren product - in software vastgelegde baan langs een aantal voorraadstations. Daar worden door een manipulator onderdelen opgepakt en aan boord van het voertuig gemonteerd. Voor het project was het nodig een voertuig, een manipulator, een grijperwisselsysteem, een koppelmechanisme en een navigatiesysteem te ontwikkelen, samen te bouwen en te testen, en dat alles samen met de benodigde hard- en software voor onder andere het plannen van opdrachten en definiëren van de bijbehorende wegpatronen.*

Vandaag de dag vormen consumentenproducten productfamilies. Ieder lid van zo'n familie ontstaat als een samenstelling van een aantal functionele eenheden. Zulke eenheden kunnen worden geproduceerd en getest in grootschalige fabrieken. Maar het samenvoegen van die eenheden gebeurt in kleinschalige fabrieken, die zich dicht bij de lokale markten bevinden en die zich snel kunnen aanpassen bij veranderingen in de vraag, zowel wat betreft het type product als de te produceren aantallen.

Het project MART is een voorbeeld van zo'n assemblagefabriek [1]. MART omvat een aantal stations voor de opslag van de functionele eenheden, en enkele voertuigen die kunnen bewegen langs een geprogrammeerde baan via die stations. Een voertuig heeft een assemblagerobot aan boord met vier graden van vrijheid, zie figuur 1. De robot is in staat onderdelen op te pakken vanaf een voorraadstation, die naar de montagetafel van het voertuig te transporteren en vervolgens de vereiste assemblagehandelingen uit te voeren, zelfs als het voertuig in beweging is.



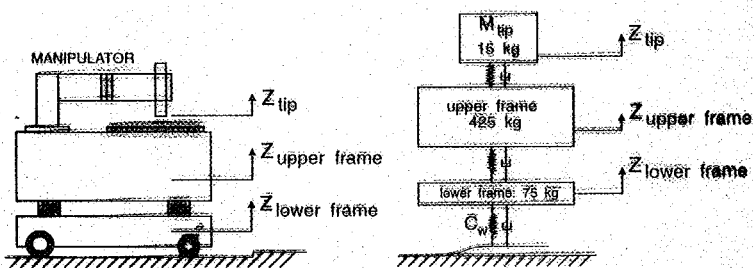
Figuur 1. Het voertuig van MART.

Het ontwerpproces in het project MART begon met de evaluatie van een aantal fundamentele concepten op grond van eenvoudige modellen. De uitkomsten van die evaluaties bepaalden de ontwerpen van de diverse systeemdelen. Naarmate de deelontwerpen zich uitbreidden, groeide ook de gedetailleerdheid van de modellen. Het was daarbij interessant te constateren dat de afwijking tussen de eerste voorspellingen, de simulaties in het eindstadium en de praktische resultaten niet meer dan 20 % bedroegen. Er kan worden geconcludeerd dat het opstellen van eenvoudige modelregels erg nuttig is bij de sturing van een dergelijk grootschalig project.

Het voertuig

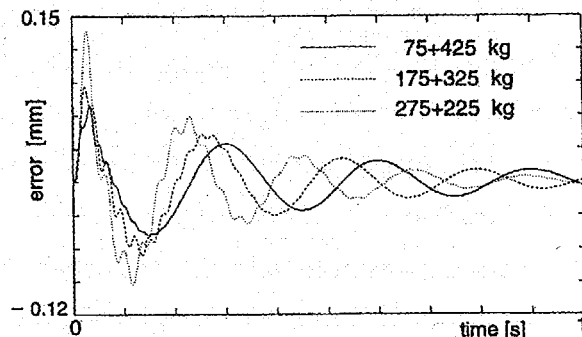
Een van de eisen waaraan het voertuig moet voldoen, is dat de manipulator aan boord in staat moet zijn assemblagehandelingen uit te voeren als er gereden wordt over een vloer met oneffenheden. Het aandeel ten gevolge van het passeren van een drempel van 2,5 mm in de totale fout van de gripper mag niet meer dan 0,1 mm bedragen ten opzichte van het montagevlak. Om aan deze eis te kunnen voldoen is het voertuigframe onderverdeeld in een onderframe en een bovenframe; figuur 2. Het onderframe is stijf geveerd op relatief stijve wielen, die daarom geschikt zijn voor odometrische plaatsbepaling; het bovenframe steunt via slappe luchtveren op het onderframe.

Figuur 2. Mechanisch model ter beschrijving van het passeren van een drempel ter hoogte van 2,5 mm.



De optimale massaverdeling tussen onder- en bovenframe is door middel van computersimulaties bepaald. Als resultaat daarvan laat figuur 3 de afwijking ($z_{grijper} - z_{voertuig}$) zien bij het passeren van een drempel met een snelheid van 1 m/s bij drie verschillende massaverdelingen. Naarmate het bovenframe zwaarder is, fungeert het des te beter als een laagdoorlaat-filter. Derhalve maken de relatief zware accu's (ca. 500 kg) deel uit van het bovenframe. Dat laatste fungeert ook als een stijve schakel tussen de manipulator en het mechanisme voor de koppeling aan de voorraadstations. Dit mechanisme vereist de aanwezigheid van drie bevestigingspunten, die stijf

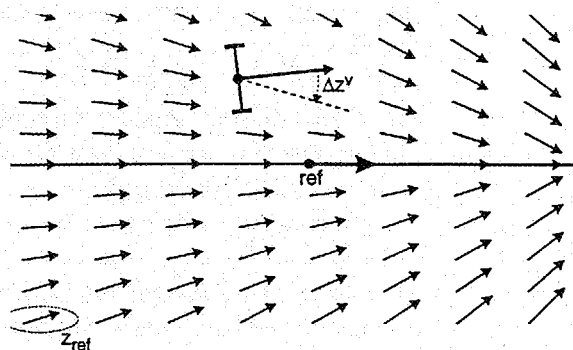
zijn verbonden met de manipulatorvoet. Daarom is er een bovenframe ontwikkeld in de vorm van een tweetal viervlakken, zie figuur 1. Het gemeenschappelijke topvlak draagt de manipulator. Het onderframe wordt ondersteund door een zwenkwiel aan de voorzijde en twee wielen die door servomotoren worden aangedreven, aan de achterzijde. Het aandrijfmechanisme van de achterwielen bevat ook encoders voor het meten van de hoekverdraaiing ten behoeve van de odometrische plaatsbepaling.



Figuur 3. De afwijking ($z_{grijper} - z_{voertuig}$) als functie van de tijd bij het passeren van een drempel met een snelheid van 1 m/s.

Het volgen van de baan

De positie (x,y) en de hoekoriëntatie (ξ) van het voertuig volgen uit een schatting door middel van een Kalman-filter (te vergelijken met het navigeren op "gegist bestek"), waarbij gebruik wordt gemaakt van de meetresultaten van de plaatsbepaling ten opzichte van vaste bakens. Daar het voertuig een niet-holonom systeem is (een fiets, die niet zijwaarts kan uitwijken zonder een voorwaartse beweging te maken, is een voorbeeld van zo'n systeem, FZ), kunnen geen zijwaartse snelheidscorrecties worden uitgevoerd zonder dat er een verplaatsing in de richting van de baan plaatsvindt, zie figuur 4. In plaats van de drie uitdrukkingen voor de snelheidsafwijking:



Figuur 4. Het terugsturen in de richting van de gewenste baan.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x}^v &= \Delta v + [1 - \cos(\Delta \phi^v)] v_{ref} + \omega \Delta y^v \\ \Delta \dot{y}^v &= \sin(\Delta \phi^v) v_{ref} - \omega \Delta x^v \\ \Delta \dot{\phi}^v &= \Delta \omega \end{aligned}$$

wordt er een ander foutsignaal gedefinieerd:

$$\Delta z^v = \Delta \phi^v + \alpha \Delta y^v \text{sign}(v_{ref}),$$

dat het signaal voor $\Delta \phi$ vervangt. Dit nieuwe signaal voor de baanafwijking is mede evenredig met de fout in zijdelingse richting Δy [2,3]. Het eenvoudige stuur algoritme dat wordt gebruikt, wordt nu:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x}^v &= \Delta v + [1 - \cos(\Delta \omega^v)] v_{ref} + \omega \Delta y^v \\ \Delta \dot{z}^v &= \Delta \omega + \alpha \sin(\Delta \phi^v) |v_{ref}| - \alpha \omega \Delta x^v \text{sign}(v_{ref}) \end{aligned}$$

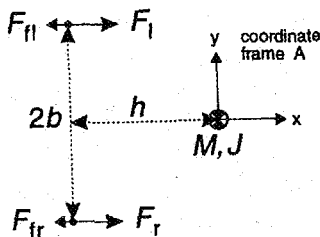
De parameter α bepaalt de sterkte van het sturen in de richting van de bedoelde baan. Een simpel stuur algoritme werd gebruikt:

$$\Delta \dot{x}^v = -K_x \Delta x^v; \quad \Delta \dot{z}^v = -K_z \Delta z^v$$

Met $\Delta v = \delta v_{ref}$ en $\Delta \omega = \delta \omega_{ref}$ resulteert dit uiteindelijk in de volgende vergelijkingen voor de correctiesignalen:

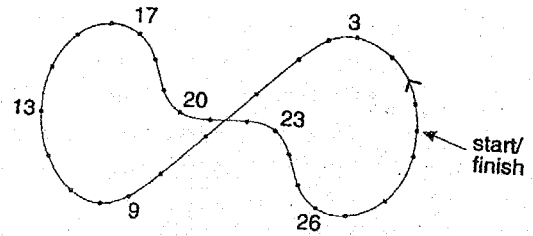
$$\begin{aligned} \delta v_{ref} &= -K v_x \Delta x^v - (1 - \cos(\Delta \phi^v)) v_{ref} - \omega \Delta y^v \\ \delta \omega_{ref} &= -K_z \Delta z^v - \alpha \sin(\Delta \phi^v) |v_{ref}| - \alpha \omega \Delta x^v \text{sign}(v_{ref}) \end{aligned}$$

Figuur 5. De symbolen voor het opstellen van de bewegingsvergelijkingen van het voertuig.



Met het model van figuur 2 en de symbolen van figuur 5 kunnen de volgende bewegingsvergelijkingen voor het voertuig worden opgesteld:

$$\begin{aligned} M \dot{v} &= h M \omega^2 + F_l + F_r - F_{fl} - F_{fr} \\ (J + M h^2) \dot{\omega} &= h M v \omega + b(F_r - F_l - F_{fr} + F_{fl}) \\ F_{fl} &= K_l \text{sign}(v_{wl}); \quad F_{fr} = K_r \text{sign}(v_{wr}) \end{aligned}$$

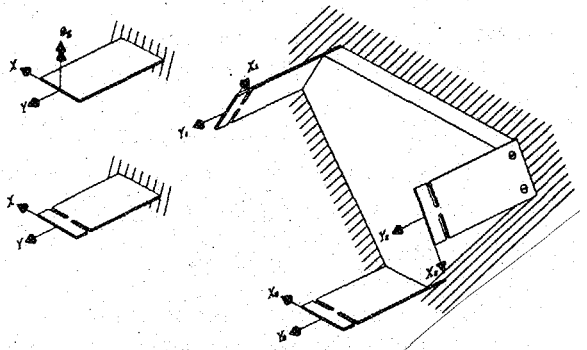


Figuur 6. Referentiebaan met een lengte van 12 m, die wordt afgelegd in 34 s.

De niet-lineaire componenten $hM\omega^2$ en $hMv\omega$ in de bewegingsvergelijkingen worden gecompenseerd door middel van terugkoppeling. Dat alles resulteert in een afwijking die nergens een waarde van 10 mm overschrijdt bij het afleggen van een referentiebaan van 12 m lengte in 34 seconden, zie figuur 6. Vergelijkbare resultaten zijn verkregen met behulp van een zelflerend regelsysteem met voorwaartse tegenkoppeling. Voor dat systeem is slechts een eenvoudig model van het voertuig nodig [4].

Productaanvoerstations

Een productaanvoerstation (PS) bestaat uit een voorraad producten, een productuitneemsysteem en een koppelmechanisme. Het voertuig nadert het koppelmechanisme met een afwijking kleiner dan 10 mm, bepaald door de nauwkeurigheid van de baansturing. Het koppelmechanisme zorgt voor het vastgrijpen van het voertuig, zodanig dat er geen enkele graad van vrijheid overblijft. Het koppelmechanisme berust op het concept van drie bladveren die ieder twee graden van vrijheid vastleggen [5], zie figuur 7. Elke

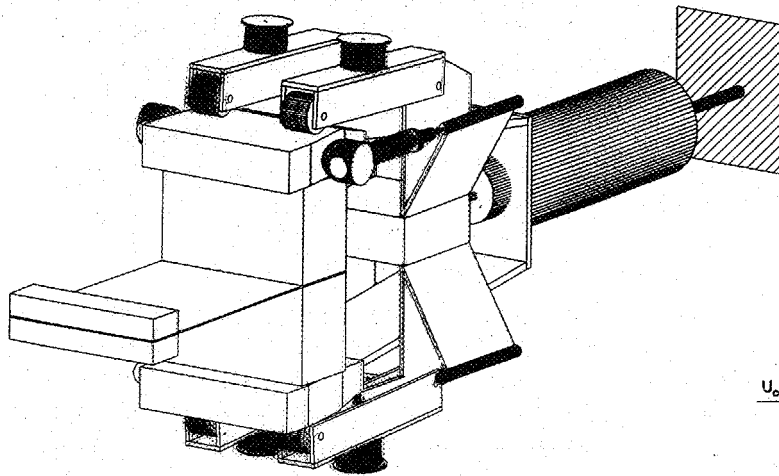


Figuur 7. Concept koppelmechanisme.

bladveer aan boord van het voertuig wordt vastgehouden door een klem, zie figuur 8, waarvan er drie op het PS zijn gemonteerd. De bladveren, die zijn bevestigd op drie hoeken van het viervlak (figuur 1), garanderen dat de verbinding tussen het

werkvlak van de manipulator en het PS eenduidig en zeer stijf is zolang het voertuig aan het PS gekoppeld is. In die toestand zwenkt de manipulator boven PS en herkent een aantal merkpunten, waardoor de coördinaten van het voertuig en het PS aan elkaar worden gerelateerd. In tegenstelling tot verschillende (mechanische) oplossingen uit het verleden ziet men hoe hier, dank zij de relatieve nauwkeurigheid van het navigeren, de bereikte positie met mechanische klemmen kan worden gefixeerd, waarna het relatieren van het voertuig aan het PS met camera's en coördinatentransformatie plaatsvindt. Er is hier derhalve sprake van een mechatronische oplossing.

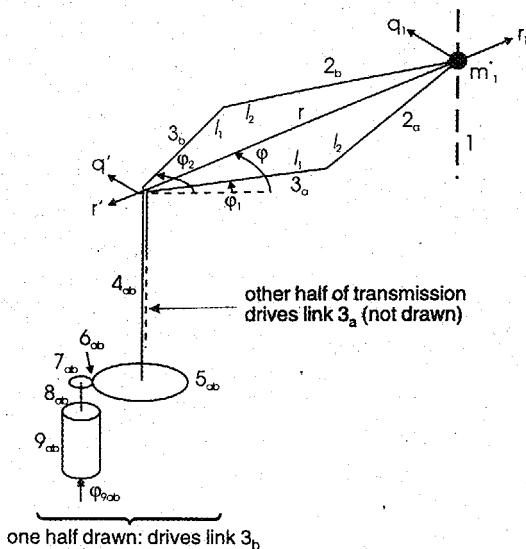
Figuur 8.
Klem (waarvan er drie zijn gemonteerd op het productaanvoerstation) voor het vasthouden van een der bladveren van figuur 7; zie ook figuur 1.



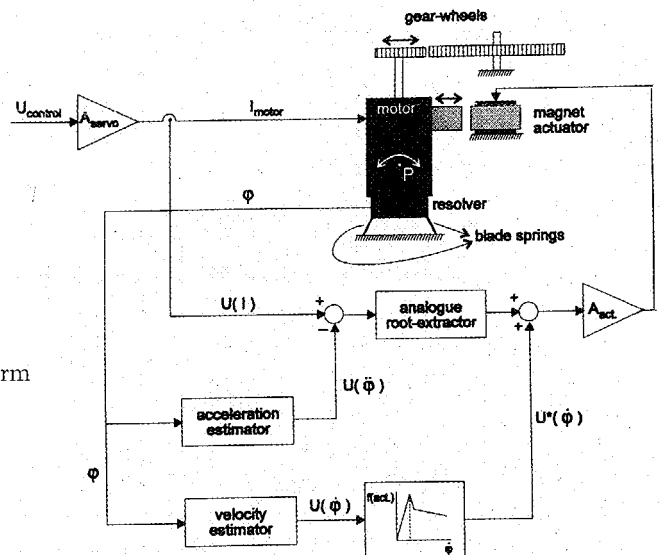
De manipulator

De manipulator, zie figuur 9, is samengesteld uit twee delen, die ieder bestaan uit een aandrijving (9,8,7,5), een aandrijf-as (4), een dubbele bovenarm

Figuur 9.
De manipulator.



(3) en een dubbele onderarm (2). De beide onderarmen komen bij elkaar in het polsgewricht (1). Deze (r,φ)-configuratie met twee vrijheidsgraden met de aandrijving in het voetstuk heeft het voordeel dat de bewegende massa relatief gering is. De armen zijn ontworpen als dunwandige dozen met grote stijfheid en kleine massa. Met geblokkeerde servomotor (9) blijkt de laagste eigenfrequentie van het mechanisme te liggen tussen 60 en 130 Hz. Het polsgewricht zelf bezit twee graden van vrijheid: rotatie rondom zijn eigen as en translatie in de richting van die as. De servomotoren voor het beheersen van deze vrijheidsgraden zijn eveneens in het voetstuk ondergebracht. Om een voldoende grote bandbreedte te bereiken is gezorgd voor een zeer stijve aandrijving tussen deze motoren en het polsgewricht. Die aandrijving bestaat uit twee assen die in het hart zijn gemonteerd van de holle assen (4) en waaraan tandriemen zijn gekoppeld binnen de doosvormige armen. Door de hoge eigenfrequenties van de manipulator kon worden volstaan met PD-regelaars voor de diverse motoren.



Figuur 10. Het principe van de gestuurde voorspanning van de tandwielen (7) en (5) van figuur 9.

De tandwielen (7) en (5) zijn regelend voorgespannen [6], enerzijds om speling te vermijden, anderzijds om hysteresis als gevolg van wrijving te minimaliseren. De voorspanning tussen het rondsel en het grote tandwiel wordt bewerkstelligd door een elektromagneet, zie figuur 10. De voorspanning zou in principe gelijk moeten zijn aan

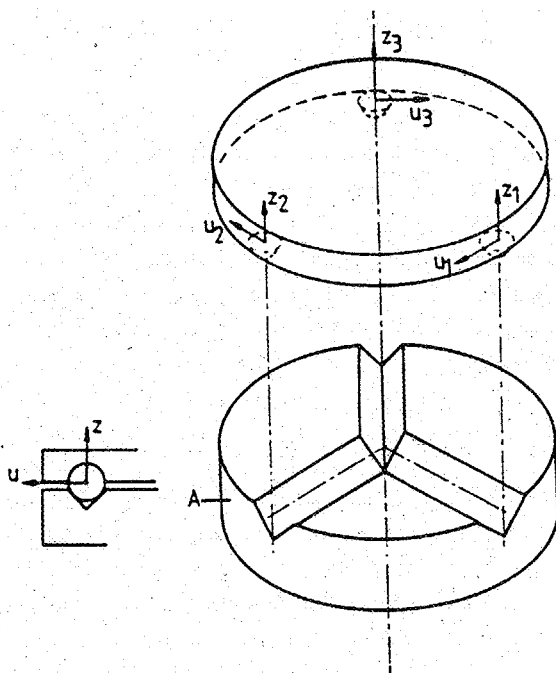
$$F_v = \frac{(T - J\ddot{\phi})(\tan \alpha)}{r} = \frac{(K_m I - J\ddot{\phi})(\tan \alpha)}{r}$$

met T het elektromagnetische koppel, J het massa-tragheidsmoment van de motor, r de straal van het rondsel, α de drukhoek behorende bij de tandwielgeometrie en K_m de motorconstante. Figuur 10 laat ook zien dat er een enigszins uitgebreider algoritme is toegepast. De versnelling ($\partial^2\varphi/\partial t^2$) en de snelheid ($\partial\varphi/\partial t$) moeten worden geschat door een waarnemer. De analoge worteltrekker compenseert het niet-lineair zijn van de magnetische actuator. Ook hier is er sprake van een mechatronische oplossing. Er is immers regeltechniek toegepast om het aloude spelingsprobleem in een tandwieloverbrenging te elimineren.

Het grijperwisselsysteem

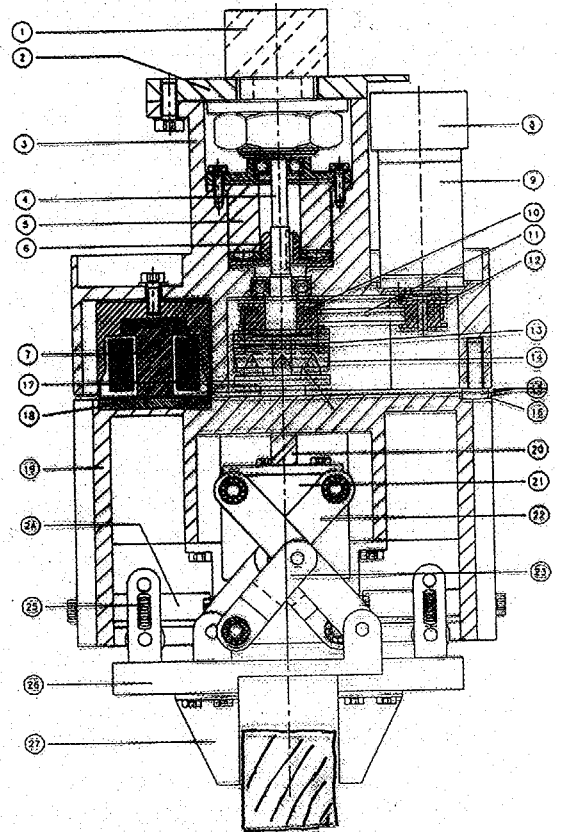
De manipulator moet achtereenvolgens verschillende componenten kunnen pakken. Het universele grijpermechanisme wordt uniek door de uitrusting met vingers die zijn aangepast aan de diverse componenten. De verbinding tussen het polsgewricht van de manipulator en het grijpermechanisme bepaalt eenduidig de plaats van de grijper ten opzichte van de robot, doordat op drie plaatsen een bol in een V-

Figuur 11.
De reproduceerbare koppeling tussen grijper en robot.



groef valt [5], zie figuur 11. De benodigde motor maakt deel uit van de manipulator. De motoras heeft een hoog toerental (derhalve een relatief laag koppel) en wordt op dit niveau doorgeschakeld naar de as van de grijper. De verbinding vindt plaats via een klauwkoppeling volgens het idee van figuur 11, in combinatie met een flexibele koppeling volgens het concept van ([5] voorbeeld V 1.2.4).

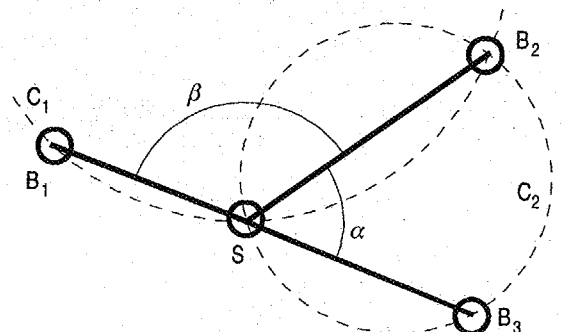
Figuur 12 toont het complete grijper-wisselsysteem.



Figuur 12. Het grijper-wisselsysteem. 1. spil manipulator; 2. flens; 3. frame; 4. as; 5. rem; 6. remschijf; 7. elektromagneet; 8. encoder; 9. motor; 10. tandriemschijf; 11. tandriem; 12. tandriemschijf; 13. flexibele koppeling; 14. koppeling manipulatorzijde; 15. kogel; 16. V-groef; 17. koppeling grijperzijde; 18. stalen schijf; 19. frame grijper; 20. spil; 21. kogelomloopmoer; 22. aandrijfstang; 23. rechtgeleidingsstang; 24. rail; 25. V-wiel/veer/kogellager-configuratie; 26. bek; 27. vinger.

De navigatie

Drie actieve infrarood-bakens zijn voldoende om de plaats van het voertuig te bepalen volgens de triangulatiemethode van Snellius [7], zie figuur 13. Er



Figuur 13. Plaatsbepaling volgens de triangulatiemethode van Snellius [7].

kan echter van meer bakens gebruik worden gemaakt. Een met een frequentie van 4 Hz roterende sensor detecteert achtereenvolgens de hoekoriëntatie van de bakens. Dit kan worden uitgedrukt als

$$\alpha_n = a \tan \frac{b_{y,i} - y_n}{b_{x,i} - x_n} - \varphi_n + v_n$$

waarin (x_n, y_n, φ_n) de positie van het voertuig (dus de as van de roterende detector) is en $(b_{x,i}, b_{y,i})$ de positie van baken i . Verder is α_n de gemeten hoek en v_n de "ruis" in de meting. Daar het voertuig in beweging is, wordt ook het tijdstip van de meting van α_n geregistreerd. Het bakendetectiesysteem heeft een aftastfrequentie van slechts 4 Hz en werkt samen met een odometrisch plaatsbepalingssysteem. Daartoe is ieder van de aangedreven wielen uitgerust met een hoek-encoder.

Het bakendetectiesysteem en het discrete Kalman-filter [7] bepalen samen iedere 1/4 seconde een nieuwe schatting van de correctie op koers en snelheid om op de bedoelde baan terug te komen. Het terugkoppelsignaal van de odometrie zorgt ervoor dat de servomotoren het voertuig de nieuwe correcties doen volgen. Het model van het voertuig in het Kalman-filter is zo eenvoudig mogelijk gehouden: alleen de dynamica van de servomotoren en van het voertuig zijn opgenomen. Door het combineren van twee navigatiesystemen vullen de voordelen van beide systemen elkaar aan: enerzijds het ontbreken van drift, anderzijds de hoge positie-bemonsterfrequentie, die zorgt voor een bandbreedte van de baansturing die beduidend hoger is dan 4 Hz.

Hard- en software

De hardware bestaat uit boord-transputers, een radioverbinding en een computer die vast is opgesteld in de omgeving. De transputers aan boord van het voertuig zijn belast met de besturing van de aandrijving, de manipulatie, de positiebepaling, het grijperwisselsysteem en de videocamera's van de robot. De gegevensverwerking die te maken heeft met alle fabricagetaken, zoals productinformatie en routing, wordt verzorgd door de vast opgestelde computer. Het ontwerp van de hardware maakte het mogelijk een modulair software-systeem te ontwikkelen.

Conclusies

- Dank zij de samenhangende oplossingen ontleend aan mechanica, regeltechniek en informatica functioneert het systeem overeenkomstig de tevoren gestelde eisen.
- De samenwerking van specialisten van verschillende disciplines is van cruciaal belang voor het welslagen van een mechatronisch project.
- Modelvorming is daarbij een waardevol hulpmiddel gebleken om het wederzijdse begrip voor elkaars probleemoplossingen te vergroten.

Het project MART is in vijf jaar tot een goed einde gebracht. Het projectteam was samengesteld uit een hoofdprojectleider en projectleiders voor ieder van de vier disciplines. Er werd intensief samengewerkt met de staf van de mechanische en elektrische werkplaatsen. Ongeveer vijftig studenten werktuigbouwkunde, elektrotechniek (regelen, meten) en informatica voltooiden binnen het project MART hun afstudeeropdracht.

Over de auteur

Prof.dr.ir. M.P. Koster is deeltijdhoogleraar aan de Universiteit Twente in het C.J. Drebbe Institute for Systems Engineering. Hij is tevens werkzaam bij Philips CFT. Het hier beschreven werk is uitgevoerd aan de UT.

Het artikel is vertaald en bewerkt door Frans Zuurveen

Literatuur

- [1] J. Abrahams, mondelinge mededeling, Philips Electronics, Eindhoven 1990.
- [2] W. Oelen, Modelling as a tool for design of mechatronic systems, afstudeerrapport Universiteit Twente, 1995.
- [3] W. Oelen en J. van Amerongen, Robust Tracking Control of Two Degrees of Freedom Mobile Robots, Control Engineering Practice, 2(1994)2 p. 333-340
- [4] J.G. Starrenburg, W.T.C. van Luenen, W. Oelen en J. van Amerongen, Learning Feedforward Controller for a Mobile Robot Vehicle, Control Engineering Practice, 4(1994)9, p. 1221 - 1230.
- [5] M.P. Koster, Constructieprincipes voor het nauwkeurig bewegen en positioneren, Uitgeverij Universiteit Twente 1996.
- [6] C.W. Kruijer, Regelend voorspannen van tandwielen, Mikroniek 32(1992)9 p.117 - 121.
- [7] A.J. de Graaf, On-line measuring systems for a mobile vehicle and a manipulator gripper, afstudeerrapport Universiteit Twente, 1994.