

Mechatronica

IR positiebepalingssysteem voor mobiele robot

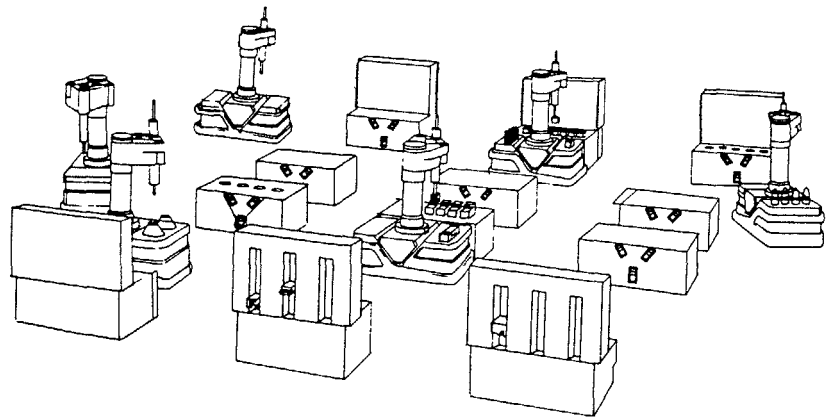
Harry van der Schoot

Het meten van posities in een fabrieksruimte krijgt steeds meer aandacht door de automatisering van de transportfunctie. Aan de Universiteit Twente is een positiebepalingssysteem ontworpen en gerealiseerd, dat de positie van een mobiele robot bepaalt in een fabriek. Het systeem bestaat uit een roterende sensor op de mobiele robot en in de fabriek geplaatste actieve bakens. In het volgende wordt eerst de toepassing van het systeem op de mobiele robot besproken, waarna het gerealiseerde systeem toegelicht wordt.

Mobiele Autonome Robot Twente

De huidige markt van consumentenartikelen kenmerkt zich door een grote diversiteit van produkten binnen één produktfamilie. Het onderscheid tussen produkten bestaat vaak uit niet meer dan kleine uitvoeringsverschillen zoals kleur, opgenomen vermogen, accessoires en dergelijke. Deze verscheidenheid maakt automatisering moeilijk uitvoerbaar. Aan de Universiteit Twente wordt in mechatronicaverband gewerkt aan een automatiseringsconcept dat een hoge flexibiliteit heeft. Er wordt door de deelnemende faculteiten (Werktuigbouwkunde, Elektrotechniek en Informatica) gewerkt aan een 'assemblagefabriek van de toekomst'. Hiernaan staat een mobiele robot (MR) centraal. De mobiele robot rijdt door de fabriek, waarbij op verschillende plaatsen (de zogenaamde *Part Supply Stations*) onderdelen van het produkt-in-wording opgehaald worden, om vervolgens op het werkblad van de mobiele robot geassembleerd en getransporteerd te worden. Overschakelen op een ander produkt is nu mogelijk door de robot een andere route door de fabriek te laten rijden. Figuur 1 geeft een indruk van de fabriek.

Om aan de vereiste flexibiliteit te voldoen, moet de mobiele robot in staat



Figuur 1. Indruk van een fabriek van de toekomst. Mobiele robots rijden in een fabriek met onderdelenbuffers (Part Supply Stations) en halen onderdelen op die ze tijdens de rit monteren.

zijn vrij te navigeren, zonder padgebonden te zijn. Er mag dus geen gebruik gemaakt worden van 'starre' AGV-technieken als inductielussen of optische volglijnen. Het navigatiesysteem bevat daarom een positiebepalingssysteem dat bestaat uit relatieve positiebepaling door odometrie (dit is het meten van de omwentelingen van de wielen) en een absoluut positiebepalingssysteem. Het relatief positiebepalingssysteem levert vrijwel continue positiegegevens op, wat noodzakelijk is voor het regelen van de motoren van de mobiele robot. De fout die gemaakt wordt door het relatief werkend systeem is incrementeel. Met andere woorden de fout die in een meting optreedt, werkt door in alle volgende metingen. Correctie met behulp van een absoluut positiebepalingssysteem is hierdoor van tijd tot tijd noodzakelijk. Het absoluut werkend systeem vangt signalen uit de omgeving op en bepaalt hiermee de positie. In het volgende wordt het gerealiseerde absoluut positiebepalingssysteem beschreven.

Eisen

Om op de mobiele robot te kunnen functioneren zijn de belangrijkste eisen aan het systeem:

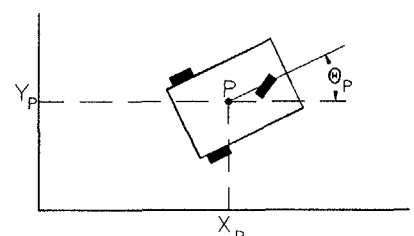
- In het horizontale vlak moet de plaats met een nauwkeurigheid van 10 mm bepaald worden;
- De oriëntatie moet met een nauwkeurigheid van 17 mrad bepaald worden, zie figuur 2;

- De meetfrequentie moet 4 Hz zijn, relevant bij een rijdende MR;
- Het systeem moet in staat zijn zelf de startpositie te bepalen, de zogenaamde *autolocate-optie*;
- Het moet in een industriële omgeving kunnen functioneren. Dit stelt eisen aan de robuustheid, zowel mechanisch als elektronisch. Tevens moet het systeem uitbreidbaar zijn naar grote fabrieksruimten.

Meetprincipe

Voor de positiebepaling – bepaling van plaats en oriëntatie in een horizontaal vlak – wordt gebruik gemaakt van triangulatie. De positie wordt bepaald door het meten van hoeken tussen bekende bakens, zie kader. De posities van de bakens zijn opgeslagen in het geheugen van de mobiele robot en vormen de bekende omgeving.

Er kan gebruik gemaakt worden van passieve of actieve bakens. Omdat in een fabriek gebruik gemaakt zal wor-



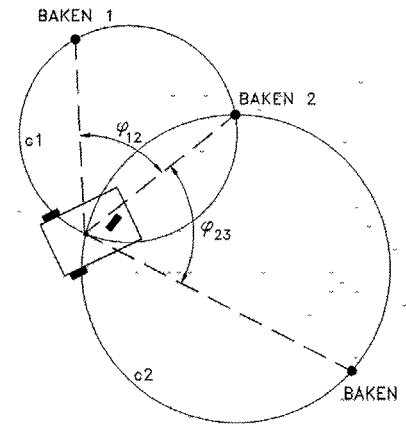
Figuur 2. Positie van de mobiele montagerobot

Triangulatie volgens Snellius

Onze landgenoot Snellius bepaalde in 1615 de positie van zijn woning door het meten van hoeken tussen markante punten in de omgeving. Voor de positiebepaling had hij drie bekende 'bakens' nodig. Door het meten van de hoek tussen twee bakens (1 en 2), is de cirkel (c_1) te berekenen waarvandaan de meting uitgevoerd is, zie figuur 3. Door een tweede meting uit te voeren met een derde bakens, is nog zo'n cirkel (c_2) te trekken. Hiermee is de positie waarvandaan de metingen uitgevoerd zijn bekend, namelijk het snij-

punt van de cirkels. Omdat de positie bepaald wordt door hoekmeting, moet de eis voor de plaatsnauwkeurigheid vertaald worden naar een eis voor de hoeknauwkeurigheid. Deze eis ligt op 1,2 mrad bij een onderlinge bakensafstand van 5 meter.

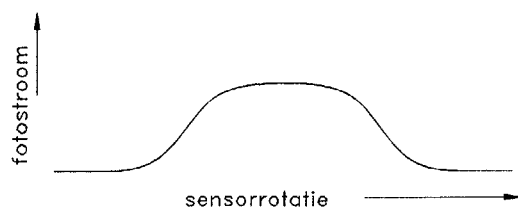
Omdat bij een rijdende mobiele robot de opeenvolgende hoeken vanuit verschillende posities gemeten worden, is een algoritme noodzakelijk waarbij de afgelegde weg tussen de opeenvolgende metingen in de positiebepaling verrekend wordt. Dit is mogelijk door van de meetgegevens uit de odometer gebruik te maken [1].



Figuur 3. Triangulatie

den van een groot aantal bakens, moeten de bakens identificeerbaar zijn om een eenduidige positie op te leveren. Er is daarom voor actieve infraroodbakens gekozen, die een identificatiecode uitzenden. Deze bakens worden gedetecteerd door een roterende sensor op de MR. De sensor bevat fotocellen die het ontvangen optische signaal omzetten naar een elektrisch signaal. Voor het bepalen van de detectiehoek zijn verschillende signaalontvangst en verwerkingsmethodes beschouwd [2]. De constructief meest eenvoudige oplossing zou een sensor met één fotocel opleveren. Het hiermee verkregen elektrisch signaal zal de vorm hebben zoals in figuur 4 geschetst is.

Door de vlakke top van het signaal zal maximumdetectie geen goede meting opleveren. Andere methoden om uit zo'n signaal toch de positie te bepalen vereisen een bekende signaalform of maken gebruik van bemonstering van het signaal. De vorm van het signaal is onder andere afhankelijk van de afstand tussen het bakens en de sensor en is dus vooraf niet bekend. Bemonsteren



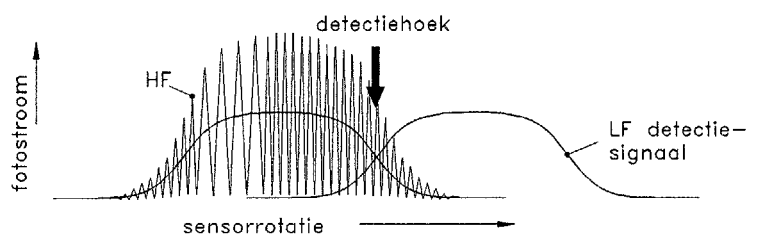
Figuur 4. Signaal bij gebruik van één fotocel bij het detecteren van een bakens

van een deel van het signaal maakt gebruik van meerdere metingen in de tijd. Hierbij treden problemen op die het moeilijk maken een nauwkeurige meting uit te voeren.

Omwillen van de robuustheid en de nauwkeurigheid is voor een systeem met twee fotocellen gekozen [3]. De zichtvelden van de beide fotocellen zijn in het horizontale vlak ten opzichte van elkaar verdraaid, waarbij ze een overlap hebben. Hierdoor ontstaat een signaal zoals in figuur 5 geschetst is. De detectiehoek is nu bepaald door die rotatiehoek waarbij de beide signalen gelijke sterkte hebben. De meting is nu onafhankelijk van de afstand tussen het bakens en de sensor en onafhankelijk van de sterkte van het ontvangen signaal.

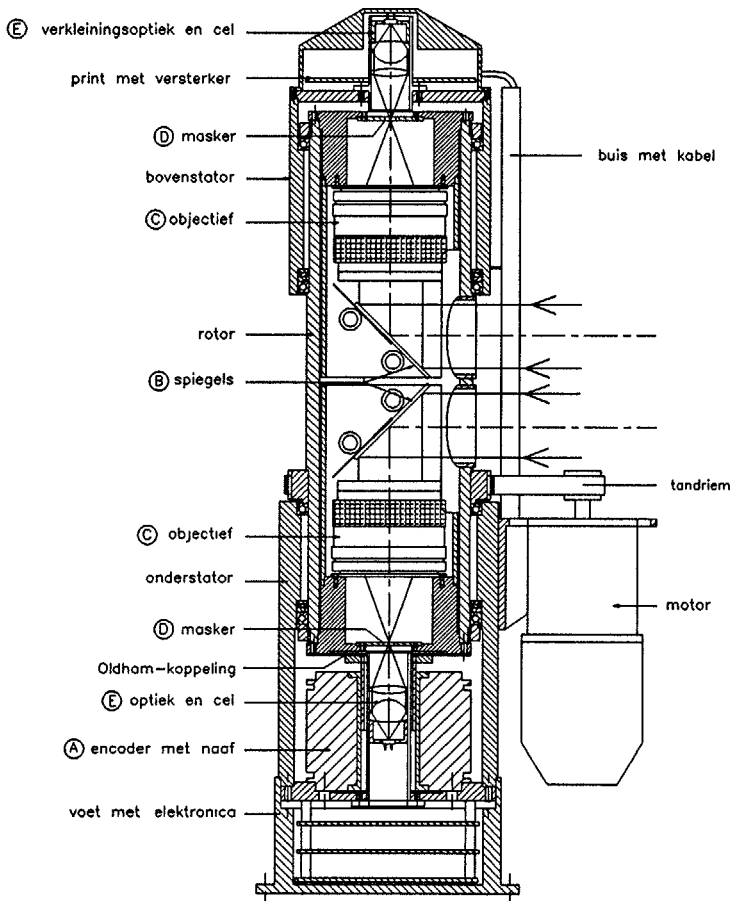
Om de uitvoering van de bakens en de sensor eenvoudig te houden, zal de detectie en de identificatie met hetzelfde signaal plaatsvinden. Hiertoe is het uitgezonden signaal voorzien van een bakencode. Dit is toegevoegd door Frequency Shift Keying-modulatie (FSK), een vorm van frequentie-modulatie. In figuur 5 is het ontvangen signaal sche-

matisch weergegeven. Om het gemoduleerde signaal te kunnen gebruiken voor detectie, moet de modulatiefrequentie voldoende hoog zijn (Door de vorming van het laagfrequente detectiesignaal door een integrator, is de modulatiefrequentie van invloed op de detectie-nauwkeurigheid). De frequenties van de boven- en onderzijband zijn gekozen op respectievelijk 80 kHz en 160 kHz. Hiermee wordt de bakencode verzonden met een bitrate van 10.000 bits/s. De vorm van het signaal wordt verder bepaald door de gebruikte optiek en de rotatiefrequentie van de sensor. De optiek moet zo gekozen worden dat op een afstand van 10 meter tussen een bakens en de sensor een betrouwbare meting uitgevoerd kan worden. Daarnaast moet de totale signaalduur zo zijn, dat een bakencode ontvangen kan worden. In dit geval moet een bakens ontvangen worden over een rotatiehoek van 40 mrad). De vensterbreedte moet echter minimaal zijn. Hierdoor is de kans verkleind dat een zich naast het bakens bevindende optische stoorbron gelijktijdig wordt waargenomen.

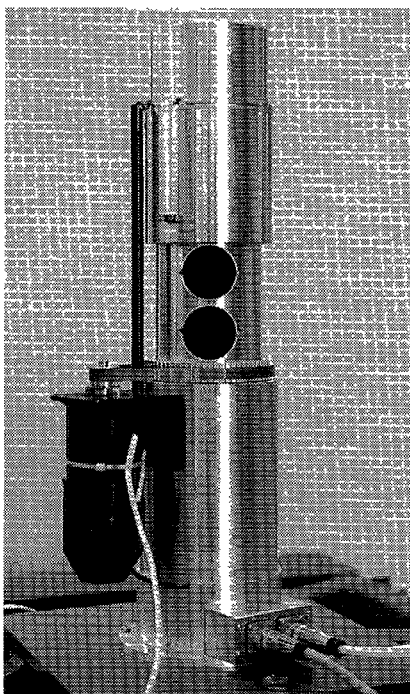


Figuur 5. Signaal bij gebruik van twee fotocellen (gemoduleerd HF signaal voor één cel getekend).

IR positiebepalingssysteem voor mobiele robot



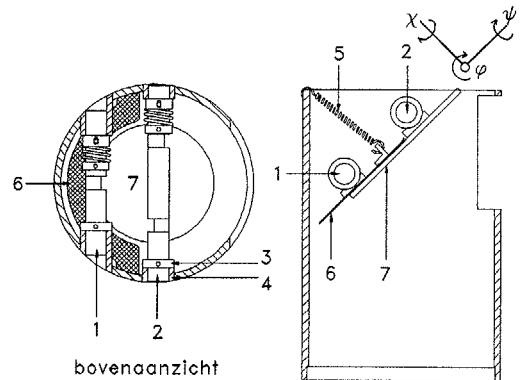
Figuur 6a. Doorsnede van de sensor



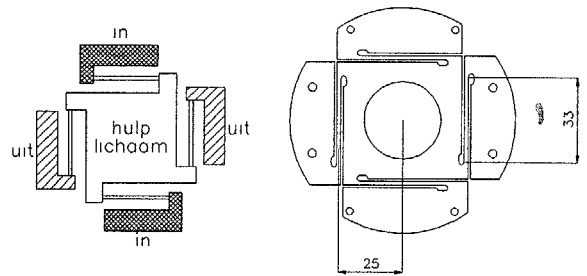
Figuur 6b. De sensor met bovenelkaar de twee waarnemingsopeningen voor de twee fotocellen.

Uitvoering

De bakens zijn opgebouwd uit een verticale rij LED's, die onderling zo verdraaid geplaatst zijn dat een verticale lijnbron gevormd is die over 180 graden zichtbaar is. Ieder bakken heeft zijn identificatiecode ingeprogrammeerd, zodat een spanningsbron voldoende is voor het functioneren van een bakken. De ontworpen sensor is in figuur 6 als doorsnede afgebeeld. Om een hoge hoekresolutie te verkrijgen, is een encoder (A) in de constructie opgenomen. Hiermee wordt met eenvoudige signaalverwerking en regeling van de rotatiesnelheid de vereiste nauwkeurigheid gehaald. Essentieel in het ontwerp van de sensor is de overdracht van het signaal van de rotor naar de stator. Om de introductie van ruis te voorkomen, geschiedt dit optisch. De infraroodstraling uit het horizontale vlak wordt daartoe afgebogen door spiegels (B) die onder 45 graden staan met de rotatieas van de rotor. Doordat de optische as van een cel nu samenvalt met de rotatieas van de rotor, kan de fotocel vast gemon-



Figuur 7. Positioneringsmechanisme van de spiegel. 1. excenteras, 2. excenteras, 3. wrijvingsring, 4. lagerbus, 5. trekveer, 6. bladveer, 7. spiegel.



Figuur 8. Oldham-koppeling uit 1 mm plaat.

teerd worden in de stator. Dit is dubbel uitgevoerd, waarbij één van de fotocellen boven en de andere fotocel onder de rotor gemonteerd is. De belangrijkste constructieve componenten van de sensor worden in het volgende toegelicht.

Optiek

Omwille van de snelheid en de kleine donkerstroom zijn fotodiodes met een kleine apertuur toegepast (UDT-5D) Deze fotocellen hebben desondanks een veel groter zichtveld dan wenselijk is. Om veel signaal te kunnen opvangen is de apertuur vergroot door een lens ($50 \text{ mm}/f=1,4$) voor de cel te plaatsen (C). Hiermee is de apertuur met een factor 14 vergroot en daarmee is de sterkte van het inkomend signaal met een factor 196 vergroot. Om onnodige storing door een groot zichtveld te voorkomen, is een meerterend spleetvormig masker (D) in het brandvlak van de lens geplaatst. Deze blokkeert straling in het horizontale vlak die met de optische as een hoek maakt die groter is dan 12 mrad. Om storing door

verlichting en dergelijke te voorkomen, wordt straling in het verticale vlak geblokkeerd vanaf een hoek die 60 mrad maakt met de optische as. Omdat de afbeelding op het masker groter is dan de cel, is een lenzenstelsel (E) opgenomen dat het beeld verder verkleint en op de cel projecteert.

Voor het verkrijgen van een snijpunt van de signalen uit beide fotocellen, is een helling in de opgaande en afgaande flank van het signaal noodzakelijk. De helling wordt veroorzaakt doordat het baken niet gefocuseerd is op het masker. De afbeelding op het masker, dat in het brandvlak van de lens staat, is dus vaag. De geringe scherptediepte van de gebruikte 50 mm-lens bepaalt de afmeting van de vage afbeelding en daarmee de grootte van de helling. De vage afbeelding van het baken passeert bij rotatie van de sensor het masker, waarbij de flanken ontstaan doordat slechts een deel van de afbeelding door het masker op de fotocel valt. (Bij focussing van de lijnbron ontstaat een lijnvormige afbeelding op het masker met een blok-vormig signaal als gevolg).

Positionering van de spiegels

Voor de gebruikte signaaloverdracht van de rotor naar de stator, moeten de spiegels nauwkeurig gepositioneerd kunnen worden. Om dit nauwkeurig te doen wordt gebruik gemaakt van drie oplegpunten, die zo te beïnvloeden zijn dat de spiegel in twee vrijheidsgraden φ en ψ instelbaar is, zie figuur 7. De gevraagde nauwkeurigheid rond de assen is 2 mrad. De instelling is mogelijk door de excenterassen 1 en 2 te verdraaien. Om een ontkoppelde instelling te bewerkstelligen, zijn de excenters zo aangebracht dat de rotatieassen van de spiegel loodrecht op elkaar staan en dat de beide oplegpunten op 2 symmetrisch rond de ψ -rotatieassen liggen. Om te voorkomen dat de instelling bij het fixeren wijzigt, is het stelmechanisme zo uitgevoerd dat het direct fixeert. Dit gebeurt op wrijving door de ring (3) die door een veer tegen lagerbus (4) gedrukt wordt. Merk op dat dit (helaas) alleen het geval is aan de zijde waar de veer niet gemonteerd is. De overige vrijheidsgraden zijn vastgelegd door een bladveer (6). De instelling is uitgevoerd met behulp

van een autocollimator en een microscoop. Door de goede toegankelijkheid van de instelpunten en de ont koppeling van beide vrijheidsgraden kon de spiegel, ondanks de vrij grote overbrengingsverhoudingen: $i_1 = 0,019$ en $i_2 = 0,038$, binnen enkele minuten ingesteld worden.

Hoekmeting

Voor het meten van de rotatiehoek wordt gebruik gemaakt van een encoder. De encoder kan op de motor of aan de rotor gemonteerd worden. Hoewel de resolutie bij de encoder op de motor een factor $1/i_{\text{aand}}^2$ lager kan zijn dan bij montage aan de rotor, is de encoder toch aan de rotor gemonteerd. Dit omdat montage op de motor zware eisen stelt aan de kwaliteit van de overbrenging. Door de plaatsing van de fotocellen op de rotatieassen, moet gebruik worden van een encoder met een naaf. Eén van de fotocellen wordt nu in de naaf van de encoder geplaatst. De gebruikte encoder (ELCIS 90 Z) wordt een resolutie van 36000 pulsen/omw behaald. Samen met de onnauwkeurigheid van de encoder is de hoekfout maximaal 0,2 mrad.

Omdat de naaf van de encoder eigen lagers heeft, mag deze niet star aan de rotor gemonteerd worden. Dit zou immers een vijfvoudige overbepaaldheid tot gevolg hebben. De koppeling moet echter hoekgetrouw zijn, waardoor simpelweg elastisch opstellen van de encoder niet mogelijk is. Daardoor is van een Oldham-koppeling gebruik gemaakt. Door deze in plaat uit te voeren als een mechanisme bestaande uit trek- en drukstangen, is een rotatie-stijve, hoekgetrouwe en spelingsvrije koppeling verkregen die bovendien geen voorkeursstand heeft, zie figuur 8, [4]. De koppeling is in de niet bepaalde richtingen voldoende slap om de lagers geen noemenswaardige invloed op elkaar te laten uitoefenen.

Bovenstator

Door de constructie waarbij één fotocel boven, en één fotocel onder de rotor gemonteerd is, moet aan de bovenzijde van de rotor een niet meedraaiend huis aanwezig zijn. Wanneer dit door één of meerdere steunpilaren uitgevoerd is, zal het zichtveld van de sensor beperkt

worden. Om dit te voorkomen wordt de bovenstator door de rotor gedragen. Hiertoe zijn in de bovenstator dunning-lagers opgenomen. Een dunne buis, waardoor de signaalkabel van de bovencel loopt, hoeft alleen de wrijving van de twee lagers in de bovenstator op te vangen. Door de lagering op de rotor, zal de fotocel zelfs bij slingering van de rotor gecentreerd blijven ten opzichte van de spiegel en het optisch stelsel.

Conclusie

In het gerealiseerde systeem is gebruik gemaakt van een aantal bekende principes. Door een grondige probleembeschuiving en een ontwerpaanpak waarbij meerdere disciplines betrokken waren, is hiermee een systeem gerealiseerd dat niet alleen nauwkeurig is, maar ook geschikt is voor industriële toepassing. Door het gebruik van goedkope, door de sensor identificeerbare, bakens is het systeem goed uit te breiden naar een fabrieksofstelling. Eerste tests gaven resultaten die ruimschoots binnen de specificaties liggen.

Literatuur

- [1] Laarhuis, E., Pose determination of a mobiele robot using a combination of a beacon sensor and dead reckoning measuring systems, Universiteit Twente, Enschede, 1993 (BSC-93M010)
- [2] Schoot, H K van der, Ontwerp van een absoluut positiebepalingssysteem voor een mobiele robot, Universiteit Twente, Enschede, 1992 (WA-267)
- [3] McGillem, D en Rappaport, T S., A beacon navigation method for autonomous vehicles, IEEE transactions on vehicular technology, augustus 1989, p 132-139
- [4] Koster, M P., Constructieprincipes voor het nauwkeurig bewegen en positioneren, collegedictaat Universiteit Twente, Enschede, 1990 (WA-163)

Auteursnoot

Ir Harry van der Schoot is op de ontwikkeling van deze infraroodsensor afgestudeerd aan de Universiteit Twente bij de faculteit Werktuigbouwkunde onder leiding van prof dr ir M P Koster. Deze ontwikkeling is onderdeel van het project Mobile Autonome Robot Twente (MART) een mechatronisch samenwerkingsproject van de faculteiten Werktuigbouwkunde, Elektrotechniek en Informatica dat gericht is op 'de fabriek van de toekomst'.

Electronics Trophy '93

Van der Schoot heeft met het ontwerp en de realisatie van deze sensor de Electronics Trophy '93 en een geldprijs gewonnen. Deze prijs is ingesteld door de Nederlandse Branche-organisatie voor Industriële Elektronica. In overleg met het Mechatronica Platform Nederland heeft het branchebestuur besloten de Electronics Trophy '93 te bestemmen voor studenten die een bijzonder mechatronisch ontwerp gemaakt hebben. De beoordeling door de jury vond plaats op basis van de criteria mechatronische kenmerken, originaliteit, realiteitswaarde, voorbeeldwaarde en helderheid van beschrijving.