

Optische scanners met detector-arrays *

Ir. C. Smorenburg en ir. J. W. Klumpe, Technisch Fysische Dienst TNO-T.U. Delft

Sinds de ontwikkeling van de optische detector-arrays worden deze detectoren in toenemende mate toegepast. Hierbij kan men constateren, dat de klassieke manier van scannen, waarbij met behulp van een roterende spiegel een voorwerp wordt afgetast, steeds meer plaats maakt voor het elektronisch scannen.

Een bijkomende ontwikkeling die het gebruik van elektronische scanners bevordert, is de toename van computersystemen, waardoor een snelle verwerking van grote hoeveelheden meetgegevens steeds eenvoudiger wordt. Men kan hierbij denken aan industriële toepassingen, zoals het opmeten van voorwerpen (controle van kwaliteit, afmeting enz.) en aan waarneming van het aardoppervlak in verschillende spectrale banden (de zogenaamde Remote Sensing). Ontwikkelen van dergelijke scanners is echter meer dan het aan elkaar koppelen van objectief, detector en computer. Per geval dient een scansysteem zorgvuldig ten opzichte van de specificaties ontwikkeld te worden. Dit artikel licht eerst de algemene aspecten toe betreffende het scannen, de meetnauwkeurigheid, de optische problematiek en de detectoreigenschappen, vervolgens komen een aantal "praktijk"-voorbeelden aan de orde, die de verschillende toepassingsmogelijkheden van detector-arrays illustreren.

Detectie

In het algemeen kan een voorwerp worden waargenomen door detectie van de elektromagnetische straling, die er van afkomstig is. Hierbij kan men onderscheid maken tussen voorwerpen welke straling uitzenden (zogenaamde stralingsbronnen) en voorwerpen die opvallende straling reflecteren. Analyse van deze straling kan informatie verschaffen omtrent:

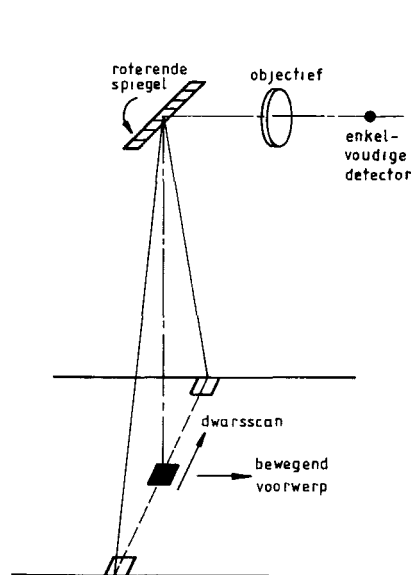
- reflectie (contrast ten opzichte van omgeving),
- spectrale samenstelling (binnen het zichtbare deel van het spectrum aangeduid met het begrip "kleur"),
- ruimtelijke verdeling (afmeting, vorm) en
- variatie in de tijd.

Scanmethoden

Voor het opmeten van een voorwerp met een zekere uitgebreidheid dient men systemen te onderscheiden welke gebruik maken van een enkele detector en systemen waarin vele detectorelementen op een rij zijn gezet. Bij gebruik van een enkele detector wordt een klein deel van het voorwerp op de detector afgebeeld. De afmetingen van de detector c.q. een diafragma voor de detector en de vergroting van het optische sys-

teem bepalen de grootte van de afbeelding. Om een uitgebreid voorwerp op te meten, dient men na elkaar verschillende delen van het voorwerp op die ene detector af te beelden. De meest gebruikelijke methode hiervoor is weergegeven in figuur 1a. Deze methode staat bekend als mechanische scanning en maakt gebruik van een roterende spiegel.

In de afgelopen vijftien jaar heeft de techniek zich ontwikkeld in de richting

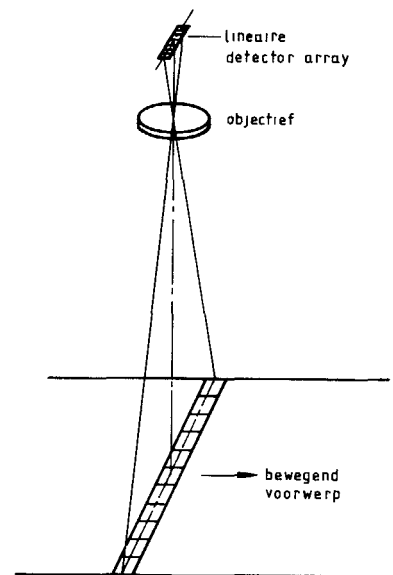


Figuur 1a Mechanisch scan principe

van vele, dicht bij elkaar op één drager aangebrachte detectorelementen. Hierdoor is het mogelijk een voorwerp op een andere manier te scannen. Het principe hiervan is weergegeven in figuur 1b. Van het voorwerp wordt een strook afgebeeld op een rij detectorelementen, waarvan de opgebouwde lading na een zekere integratietijd kan worden uitgelezen. De scan in dwarsrichting, waarvoor bij mechanische scanning de roterende spiegel dient, wordt nu verricht door het elektronisch uitlezen van een groot aantal in deze richting gepositioneerde elementen. Deze manier van scanning duidt men aan met elektronische scanning.

Voor een groot aantal toepassingen blijken de voordelen van elektronische scanning (geen bewegende onderdelen, langere integratietijd en derhalve kleinere compacte scansystemen met een goede signaalsterkte) de doorslag te geven. Deze goede eigenschappen van elektronische scanning hebben natuurlijk een prijs; het te gebruiken optische systeem is veelal complexer terwijl bovendien het totale gezichtsveld beperkt dient te blijven om de variatie van de optische kwaliteit in de hand te houden.

Het gebruik van matrix detectoren, die in speciale gevallen ook voor scandoelenden kunnen worden gebruikt, komt in dit artikel verder niet aan de orde.



Figuur 1b Elektronisch scan principe

* Dit artikel is eerder geplaatst in I²-Elektrotechniek/Elektronica, no. 7/8 1985

Detector-arrays

Een lineaire detector-array is een lichtgevoelige sensor die optische informatie langs één lijn omzet in een elektronisch signaal. Een dergelijke sensor is een geïntegreerd circuit (chip) bestaande uit een rij lichtgevoelige elementen, een uitleeschakeling en een uitgangscircuit. De huidige detector-arrays zijn hoofdzakelijk van silicium gemaakt. We onderscheiden:

- CCD arrays, waarbij CCD de afkorting is van Charge Coupled Device en
- fotodiode arrays

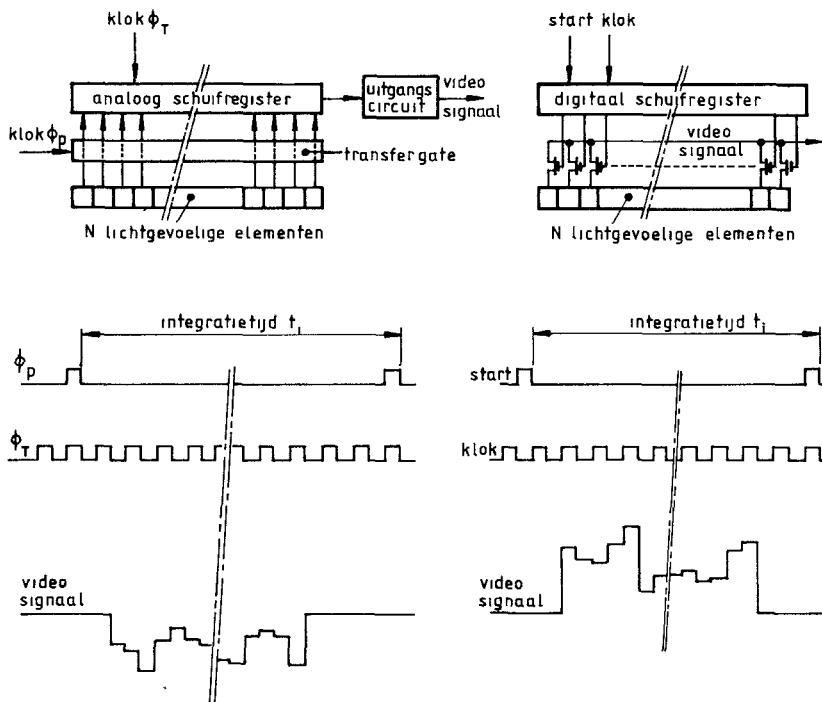
Het verschil tussen deze twee ligt in de methode van uitlezing van de lichtgevoelige elementen

Werkingsprincipe

Het beeldvormende gedeelte van een CCD array bestaat uit een rij van N lichtgevoelige elementen, onderling gescheiden door een isolatielaag. Licht dat invalt op deze elementen wordt geabsorbeerd in het silicium en maakt elektronen vrij. Deze elektronen worden verzameld in de bij elk element behorende opslagruimte (MOS-capaciteit). De hoeveelheid opgeslagen lading is recht evenredig met de intensiteit van het invallende licht.

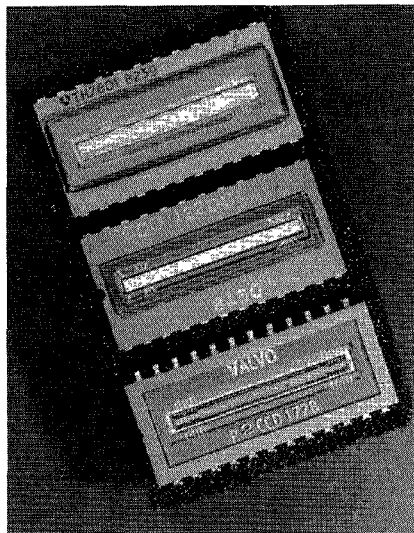
Het uitleesgedeelte bestaat uit een *analoog* schuifregister. Een zogenaamde transfergate isoleert het beeldvormende gedeelte van het uitleesgedeelte via een potentiaalbarrière. Op regelmatige tijdstippen wordt de transfergate geopend waardoor de ladingspakketjes van alle lichtgevoelige elementen parallel worden overgedragen naar het analoge schuifregister. De ladingspakketjes in het schuifregister worden vervolgens serieel getransporteerd naar het uitgangscircuit (zie figuur 2). Dit uitgangscircuit zet het ladingspakket per element om in een evenredig spanningsniveau. Aan de uitgang van de detector ontstaat aldus een videosignaal, waarvan het spanningsverloop correspondeert met het verloop van de lichtintensiteit langs de rij lichtgevoelige elementen.

Elk element integreert de gegenereerde lading gedurende een tijdsinterval tussen twee opeenvolgende uitlezingen. De integratietijd is altijd langer dan de tijd die nodig is voor het uitschuiven van de data; zowel datasnelheid als integratietijd zijn instelbaar via de externe klok. Elk lichtgevoelig element (fotodiode) van de fotodiode-array heeft een bijbehorende opslagruimte (capaciteit) en een MOS-multiplexschakelaar. Het uitleesgedeelte bestaat uit een *digitaal* schuifregister. Het op de fotodiode-elementen invallende licht wordt weer omgezet in een evenredige hoeveelheid elektrische lading. Onder aansturing



Figuur 2 Blokschema van lineaire detector-arrays, links een CCD-array en rechts een fotodiode-array

van klok en startsignalen activeert het digitale schuifregister serieel de multiplexschakelaars, waardoor de lading van elk fotodiode-element achtereenvolgens wordt "geleegd" op een gemeenschappelijk uitgangskanaal. Het resulterende videosignaal is in het algemeen een reeks ladingimpulsen die via uitwendige schakelingen kunnen worden omgezet in evenredige spanningsniveaus. In sommige gevallen is op de array-chip reeds een versterkerschakeling geïntegreerd.



Figuur 3 Een drietal lineaire CCD-detectoren, van boven naar onder: Thomson TH 7801, Fairchild CCD 122 en Philips p^2 CCD 1728 B. Aantal elementen: 1728; elementafmetingen: 13×13 micrometer.

Elk fotodiode-element integreert invallende lichtenergie over een tijdsinterval tussen twee opeenvolgende uitlezingen. De integratietijd per array-element wordt bepaald door het startsignaal. Het moment waarop een nieuwe integratieperiode begint is, vanwege de seriele uitleesmethode bij dit type array, voor elk element verschillend. De integratietijd is ook hier altijd langer dan de tijd die nodig is voor het uitlezen van alle array-elementen.

Eigenschappen

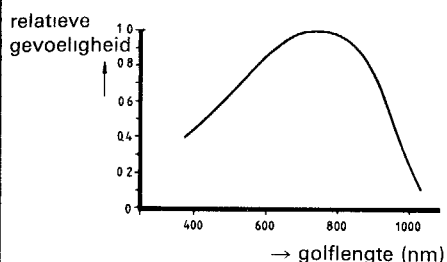
De voornaamste kenmerken van lineaire detector-arrays zijn: geometrie, spectrale gevoeligheid, absolute gevoeligheid en verzadiging, donkerstroom, dynamisch bereik en snelheid.

• Geometrie

De geometrie van het lichtgevoelige gedeelte van een lineaire array bestaat uit een rij van N rechthoekige (of vierkante) elementen. Bij de huidige typen varieert N van 50 tot maximaal 4096. Veel voorkomende waarden van N zijn: 64, 128, 256, 512, 1024, 1728 en 2048. Karakteristieke elementafmetingen zijn $13 \times 13 \mu\text{m}$, vooral bij langwerpige CCD's. Andere afmetingen komen echter ook voor ($25 \times 25 \mu\text{m}$ en langwerpige elementen van 13×16 of $300 \times 15 \mu\text{m}$). De "dode" ruimte tussen de elementen is in het algemeen klein ten opzichte van de elementafmeting.

• Spectrale gevoeligheid

De momenteel verkrijgbare detector-arrays zijn gevoelig voor licht in het golflengtegebied van ca. 400 nm (blauw) tot 1100 nm (nabij infrarood zie fig. 4). De indringdiepte van fotonen in het silicium neemt snel toe met de golflengte. Dit laatste leidt tot toenemende overspraak tussen naburige array-elementen en derhalve tot verminderde afbeeldingskwaliteit. In het algemeen is het daarom noodzakelijk een infrarood absorberend filter voor de detector te plaatsen.



Figuur 4 Spectrale gevoeligheidskromme

• Absolute gevoeligheid en verzadiging

De hoeveelheid gegenereerde lading per element is recht evenredig met het produkt van invallende lichtintensiteit en integratietijd. Indien de belichting een bepaalde grenswaarde overschrijft, is het verband niet langer lineair, maar treedt verzadiging op. Naar gelang de toepassing dient de integratietijd en de verlichtingsconfiguratie zodanig te worden gekozen dat de detector array in het lineaire gebied werkt.

De absolute gevoeligheid is gedefinieerd als de resulterende lading of spanning op de uitgang per eenheid van belichting. De fabrikant specificeert deze vaak in volts per $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ voor licht met een bepaalde spectrale inhoud. Het belichtingsniveau waarbij verzadiging optreedt is eveneens gespecificeerd. Typische waarden voor een CCD-detector zijn bijvoorbeeld een gevoeligheid van $3,0 \text{ V}/\mu\text{J}/\text{cm}^2$ en een verzadigingsbelichting van $0,4 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ (een en ander bij toepassing van een wolfram lamp met kleurentemperatuur 2854 K in combinatie met een Schott KG1 infrarood filter).

De lichtgevoelige elementen van een detector array vertonen gevoeligheidsverschillen van circa tien procent.

• Donkerstroom

Als gevolg van thermische excitatie worden in het silicium voortdurend elektronen gegenereerd, ook wanneer geen licht invalt op de detector. De totale hoeveelheid gegenereerde lading

per element bestaat dus uit twee bijdragen: de door het invallende licht gegenereerde lading (het signaal) en de thermische gegenereerde lading (de donkerstroom). Deze donkerstroom hangt af van twee grootheden:

- temperatuur (de donkerstroombijdrage verdubbelt bij elke 5 à 10°C temperatuurstijging);
- integratietijd (bij toenemende integratietijd neemt de donkerstroomwaarde evenredig toe)

Een indicatie voor de gemiddelde donkerstroom is $0,2\%$ van het videosignaal-niveau bij verzadiging, bij 25°C en een integratietijd van 10 ms . Behalve dit gemiddelde donkerstroomniveau vertonen de elementen van de detector onderling verschillen in donkerstroomwaarde. Bij toepassingen waarin lage lichtniveaus gedetecteerd moeten worden en een lange integratietijd gewenst is, kan het noodzakelijk blijken de detector te koelen om de donkerstroom te beperken.

• Dynamisch bereik

Het dynamische bereik is gedefinieerd als de verhouding tussen het videosignaalniveau bij verzadiging en de effectieve ruiswaarde van de detector-array. Als globale waarde voor het dynamische bereik van de huidige detector-arrays kan een verhouding $2000:1$ worden genoemd. De uiteindelijk gerealiseerde signaal-ruisverhouding hangt echter ook af van de verwerking van het videosignaal. Bij genoemde definitie van het dynamische bereik is de invloed van de donkerstroom niet in rekening gebracht. Bij toepassing van lange integratietijden of bij hoge omgevingstemperatuur zal de donkerstroom het dynamische bereik reduceren.

• Snelheid

De maximale datasnelheid verschilt per type array, maar bedraagt bij de huidige arrays maximaal 20 MHz . Dit betreft de snelheid waarmee de data van de verschillende array elementen in het video-signaal elkaar opvolgen. De maximale lijnscanfrequentie, dat wil zeggen het aantal volledige scans van de array per seconde, wordt bepaald door genoemde datasnelheid en het aantal elementen per array.

Anderzijds bestaat er een ondergrens aan de snelheid waarmee de detector-array bedreven kan worden, doordat bij toenemende integratietijd de donkerstroom een steeds groter aandeel in het videosignaal krijgt

CCD-array versus fotodiode array

Een volledige vergelijking tussen CCD-

en fotodiode-array valt buiten het kader van dit artikel, maar enkele opmerkingen kunnen toch worden gemaakt.

- Met CCD-arrays zijn in het algemeen betere signaal-ruisverhoudingen te behalen dan met fotodiode-arrays, zodat met CCD's bij lagere lichtniveaus kan worden gewerkt.
- Bij CCD's legt het transportmechanisme via analoge schuifregisters een beperking op aan de hoeveelheid lading per element. In vergelijking met CCD's kan bij een fotodiode-array per element meer lading worden opgeslagen, zodat fotodiode-arrays bij hogere lichtniveaus minder snel verzadigd raken
- Bij de huidige commercieel verkrijgbare detector-arrays wordt bij de fotodiode-arrays een grotere varietet in geometrie-specificaties aangeleverd, bijvoorbeeld ten aanzien van de lengte-breedte afmetingen van de elementen

Componenten en camera-systemen

Het aanbod van de verschillende fabrikanten op het gebied van detector-arrays betreft zowel afzonderlijke componenten als complete line scan camera's. Losse detector-arrays worden geleverd op een printkaart met componenten en schakelingen die noodzakelijkerwijs dicht bij de array aanwezig moeten zijn. Verder zijn printkaarten leverbaar voor generatie van de benodigde stuursignalen en voor de verwerking van het videosignaal. Ontwerpers kunnen deze afzonderlijke componenten optimaal integreren met het optische systeem, rekening houdend met specifieke randvoorwaarden en eisen. Ook zijn complete line scan camera's verkrijgbaar, waarbij eerder genoemde onderdelen zijn opgenomen in een mechanische behuizing, inclusief afbeeldingsobjectief. Tevens worden elektronische modules geleverd voor onder andere signaalverwerking en koppeling met een computer

Dataverwerking

De detector-array levert per scan een analogo videosignaal dat representatief is voor het verloop van de lichtintensiteit langs een lijn in de afbeelding van een object. Verdere behandeling van dit signaal is afhankelijk van de toepassing, toch zijn er een aantal functies die regelmatig terugkeren, zoals:

- integratie, sample/hold;
- analogo/digitaal-omzetting;
- datacorrectie;
- data-opslag,
- drempeling.

Voor veel toepassingen is het gewenst de data per array-element in digitale vorm beschikbaar te hebben.

Indien het videosignaal de vorm heeft van een reeks ladingimpulsen dient eerst een integratie plaats te vinden tot evenredige spanningsniveaus. Het videosignaal vertoont ook ongewenste variaties zoals schakelpieken, etc. Door uitvoering van een sample-and-hold bewerking kan het signaal worden verbeterd. Dit sample/hold signaal kan vervolgens via een A/D-omzetter met de gewenste resolutie worden gedigitaliseerd.

Het videosignaal dient in principe te worden gecorrigeerd voor donkerstroom en gevoeligheidsverschillen. Per array-element i ($i = 1, \dots, N$) kan deze correctie als volgt worden omschreven:

$$DATC_i = (DAT_i - DOS_i) \times MUL_i$$

waarin:

$DATC_i$ = gecorrigeerde data van element i

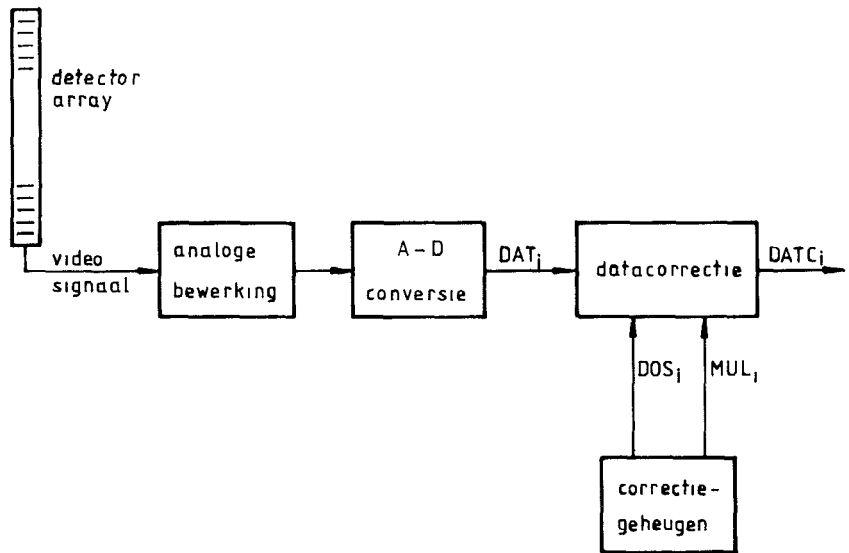
DAT_i = ongecorrigeerde (gedigitaliseerde) data van element i

DOS_i = donkerstroom correctiewaarde voor element i

MUL_i = gevoeligheidscorrectiefactor voor element i

Per array-element i zijn er twee correctiegetallen: DOS_i en MUL_i . Deze getallen stelt men in een ijkprocedure met het systeem vast; ze worden vervolgens opgeslagen in een geheugen. De uitvoering van deze correctie kan zowel in hardware als in software geschieden. De keuze zal afhangen van de snelheidseisen en de vraag of de videodata direct dan wel achteraf verwerkt moet worden. In de gevoeligheidscorrectie kunnen ook andere systeemvariëaties worden meegenomen zoals intensiteitsverloop van de lichtbron, plaatsafhankelijkheid van de irradiantie in de afbeelding ten gevolge van het optische systeem, etc. Verwerking van de detectorsignalen is schematisch weergegeven in figuur 5.

In een aantal toepassingen zal vervolgens de gecorrigeerde data per element in een geheugen worden opgeslagen, waarna desgewenst verwerking met een (micro)-computer kan plaatsvinden. In sommige gevallen kan worden volstaan met verwerking van een binair videosignaal. Het analoge of gedigitaliseerde (gecorrigeerde) signaal wordt daartoe vergeleken met een drempelwaarde. Een voorbeeld is het opmeten van de posities van buitencontouren en gaten van een object, via een contrastopname. De overgangen in het binaire videosignaal geven de verschillende randposities aan.



Figuur 5 Datavorbewerking in schema. Een gedigitaliseerd videosignaal wordt gecorrigeerd voor donkerstroom en gevoeligheid

Optisch systeem

Het optische systeem heeft een aanzienlijke invloed op de totale kwaliteit. Dit is niet verwonderlijk als men bedenkt, dat bij CCD-detectoren de afmetingen van één detectorelement $13 \times 13 \mu\text{m}$ bedragen, zodat de uiteindelijke beeldkwaliteit van het gezichtsveld van de detector van dezelfde grootte-orde moet zijn. Voor de toe te passen optische configuratie zijn van belang: het gezichtsveld, het spectrale gebied en de lichtsterkte.

• Gezichtsveld

Bij afbeelding door een optisch systeem treden een aantal beeldfouten op, waardoor de van één voorwerppunt afkomstige straling als een beeldvlak wordt afgebeeld. De optische ontwerper zal proberen door keuze en vormgeving van de verschillende optische componenten deze beeldvlak zo klein mogelijk te maken.

In het beeldcentrum treedt alleen sferische aberatie op. Is het gezichtsveld zeer beperkt, dan is het voldoende het systeem alleen voor deze beeldfout te corrigeren. Indien echter een groter gezichtsveld gewenst is, dan dienen ook de overige beeldfouten gecorrigeerd te worden. De moeilijkheid een goed gecorrigeerd optisch systeem te ontwikkelen neemt toe met het vergroten van het gezichtsveld.

• Spectraal gebied

In een afbeeldend systeem wordt gebruik gemaakt van staling-doorlatende materialen (optisch glas, kristallen), van reflecterende materialen (spiegels) of van een combinatie hiervan. Het ge-

bruik van oppervlakte-spiegels heeft als voordeel, dat geen kleurfout optreedt en dat het systeem derhalve voor een breed golflengtegebied toepasbaar is. Daar staat tegenover, dat de mogelijkheden voor correctie van de overige aberraties beperkt zijn, vooral bij gebruik over een wat groter gezichtsveld. Voor correctie over een groter gezichtsveld maakt men gebruik van een combinatie van componenten van verschillende glassoorten, hetgeen tot vrij complexe optische stelsels kan leiden.

De meeste objectieven, zoals gebruikt voor camera's of projectoren, zijn gecorrigeerd voor een beperkt spectraal gebied (bepaald door de spectrale gevoeligheid van het oog). De meeste detectoren zijn echter gevoelig over een breder spectraalgebied (figuur 4). Dit eist van het optische systeem een speciale correctie van de kleurfout. Verder beperkt men veelvuldig het spectrale gebied met optische filters.

• Relatieve opening

De lichtsterkte van een optisch systeem is eveneens van belang voor een scanner. Een grotere lichtsterkte betekent in het algemeen een groter probleem om een goede beeldkwaliteit te realiseren, terwijl tevens de scherptediepte afneemt. In de praktijk volgt de vereiste lichtsterkte van een systeem uit de dimensionering waarbij zowel de verlichting als de signaalsterkte ten opzichte van het achtergrondsignaal bekeken wordt.

Meetnauwkeurigheid

Een belangrijke specificatie van een detectiesysteem is de nauwkeurigheid

waarmee een voorwerp kan worden opgemeten. In eerste instantie neemt men hiervoor dikwijls de afmetingen van een op het voorwerp geprojecteerd detector-element, maar de werkelijkheid is gecompliceerder. In de optica wordt de kwaliteit van een systeem vaak uitgedrukt in MTF-waarden (MTF = Modulation Transfer-Function), die de achteruitgang in contrastwaarde van het "overgedragen" beeld weergeven. Volgens figuur 6a is het contrast gedefinieerd als

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

Analoog aan de elektronische definitie voor signaaloverdracht wordt hierbij uitgegaan van een sinusvormig intensiteitsverloop. De contrastoverdracht is het contrast in het uiteindelijke beeld gedeeld door het contrast in het voorwerp. Het voordeel van deze benadering van de kwaliteit is, dat op eenvoudige wijze de invloed van verschillende deelsystemen op de totale kwaliteit is aan te geven. Voor een elektronisch scansysteem kan men stellen:

$$MTF_{\text{tot}} = MTF_{\text{opt}} \times MTF_{\text{bew}} \times MTF_{\text{det}}$$

Hierbij geldt.

MTF_{tot} = Totale contrastoverdracht van het scansysteem.

MTF_{opt} = Contrastoverdracht van het optische systeem. Deze wordt beïnvloed door beeldfouten en door strooilicht.

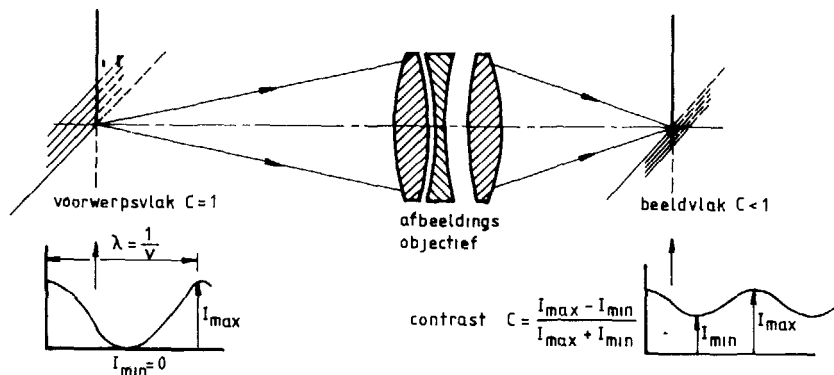
MTF_{bew} = Contrastvermindering door de scanbeweging. Door de integratietijd wordt het beeld in de bewegingsrichting uitgesmeerd.

MTF_{det} = Contrastvermindering door de detectoreigenschappen, zoals de afmetingen van een detectorelement, overspraak, ladingstransportverliezen enz.

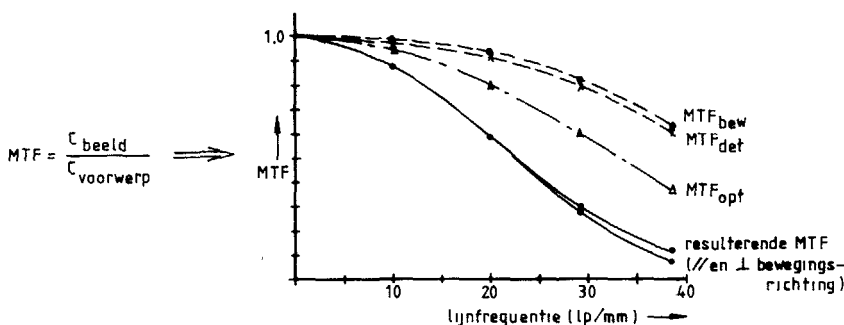
In figuur 6b is eveneens de MTF van een scansysteem weergegeven, met aanduiding van de MTF van de verschillende onderdelen. Hiermee wordt de kwaliteit van het totale scansysteem weergegeven. Het oplossend vermogen van het systeem, waardoor de uiteindelijke meetnauwkeurigheid wordt bepaald, vindt men bij het detail, waarbij de MTF tot 10% is afgenomen. In dit voorbeeld is uitgegaan van een 100% voorwerpcontrast. In werkelijkheid zal dit minder zijn, mede afhankelijk van de verlichting van het voorwerp

Verlichting

Voor sommige toepassingen ligt de verlichting vast en kan men alleen de



Figuur 6a Definitie van contrast



Figuur 6b Contrastoverdrachtsfunctie (MTF)

lichtsterkte en de spectrale handbreedte nog kiezen. Bijvoorbeeld bij de waarneming van het aardoppervlak, met de zon als verlichtingsbron. Bij inspectiesystemen daarentegen is wel een keuze van de verlichtingsbron mogelijk. Indien men contouren meet, is het aanbrengen van een lichtbron achter het voorwerp een ideale oplossing. Bij meting in opvallend licht vormen de hoeveelheid licht en de optische reflectie-eigenschappen van het object vaak een probleem. In de eerste plaats tracht men hier, door zorgvuldig ontwerpen van het verlichtingssysteem, de verlichtingssterkte zoveel mogelijk op te voeren. Een bijkomend probleem is het vermijden van spiegellende reflectie of juist het verlichten onder een bepaalde hoek, om een bepaald verschijnsel zo goed mogelijk zichtbaar te maken. Daarna probeert men de lichtsterkte van het optische systeem en de spectrale bandbreedte zodanig te kiezen, dat men met de gewenste snelheid en nauwkeurigheid kan meten. Als laatste middel heeft men dan nog het verlagen van de meetsnelheid, wanneer verminderen van de meetnauwkeurigheid onaanvaardbaar is.

Samenvattend kan men stellen, dat voor elektronische scanning van voorwerpen geen eenduidig systeem te be-

denken is, maar dat voor vrijwel iedere toepassing apart bekeken dient te worden, welk systeem optimaal voldoet.

Enkele scansystemen

Een beschrijving van enkele bij de Technische Fysische Dienst ontwikkelde scansystemen illustreert de verschillende hiervoor beschreven aspecten. De voorbeelden die volgen hebben betrekking op de waarneming van het aardoppervlak vanuit satelliet of vliegtuig en op inspectie van objecten. Beide toepassingen hebben gemeen, dat ze op snelle wijze informatie verschaffen over een voorwerp, op grond waarvan anderen beslissingen kunnen nemen over te voeren beleid, goed- of afkeuren, vervanging enz.

CEASAR-scanner

Waarneming van het aardoppervlak (Remote Sensing) is een zich snel ontwikkelende activiteit. Hiervoor zijn en worden scanners ontwikkeld, waarbij vooral het verzamelen van spectrale informatie over een groot oppervlak centraal staat.

De eerste satellietssystemen bevatten meestal conventionele scanners, die in bepaalde gevallen nog steeds gebruikt worden (bijvoorbeeld de Landsat scan-

ner). Het voordeel hierbij is, dat deze systemen ook in het infrarode gebied kunnen meten. Een nieuwe generatie scanners gebaseerd op elektronische aftasting vindt men in de door de Fransen ontwikkelde SPOT-satelliet, waarin CCD-detectoren worden gebruikt. Lancering hiervan heeft eind 1985 plaatsgevonden.

Bij de TPD is een met CCD-detectoren uitgeruste scanner ontwikkeld voor gebruik vanuit een vliegtuig. Deze ontwikkeling geschiedt in samenwerking met het nationaal Lucht- en Ruimtevaart Laboratorium (NRL), waarbij laatstgenoemde zorg draagt voor de elektronica ten behoeve van verwerking en opslag van de grote hoeveelheid meetgegevens.

De scanner heeft de naam CAESAR gekregen, hetgeen is afgeleid van CCD Airborne Experimental Scanner for Applications in Remote Sensing. Het oorspronkelijk door Wetenschapsbeleid gefinancierde project heeft enerzijds als doelstelling het vergroten van de Nederlandse "know-how" met betrekking tot het toepassen van CCD-detectoren en anderzijds het bijdragen aan een Nederlands instrumentenpakket ten behoeve van Remote Sensing. De voornaamste instrumentenspecificaties zijn weergegeven in tabel 1 en behelzen waarnemingen boven land in een drietal spectrale banden en boven zee in acht banden. Tevens zijn waarnemingscondities en maximaal oplossend vermogen vastgelegd. Bij een eerste dimensionering (rekening houdend met het zonnenspectrum, stand van de zon, atmosferinvloeden, detectoreigenschappen enz.) werd de gewenste lichtsterkte van het optisch systeem bepaald. Na keuze van de detector (CCD met 1728 elementen) bleek het gezichtsveld bij gebruik van een standaard objectief ($f = 50 \text{ mm}$) 25° te bedragen, een voor Remote Sensing acceptabele waarde.

Verder werd gekozen voor een modulaire opzet, waarbij iedere module meten in drie spectrale banden mogelijk maakt. Een module bestaat uit een objectief, drie CCD-detectoren, die op een instelmechanisme voor nauwkeurige onderlinge justering gemonteerd zijn, een verwisselbare lade met filters voor selectie der spectrale banden en een tweetal printplaten met elektronica voor besturing en voeding van de CCD-detectoren en voor uitvoer van de signalen (figuur 7)

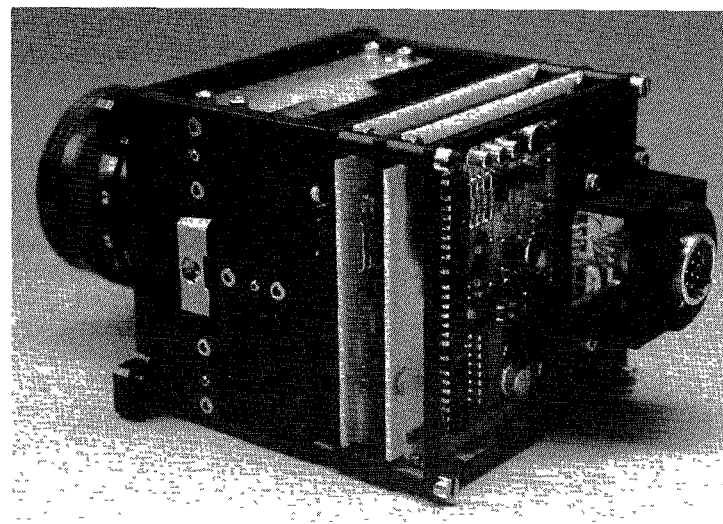
Een drietal modules bevindt zich in een naar beneden gerichte doos, een vierde module kijkt onder een hoek van 52° in voorwaartse richting. Deze modules zijn geplaatst in een rek, dat boven een ruit in de bodem van een vliegtuig is

Spectrale banden		NE $\Delta\rho[\%]$	
band 1	535 - 585 nm	0.5	landobservatie
band 2	655 - 685 nm	0.5	
band 3	845 - 895 nm	0.5	
			minimaal oplossend vermogen 0.5 m meetomstandigheden: maart-september 10-16 uur
band 1	400 - 420 nm	0.05	zeeobservatie
band 2	435 - 455 nm	0.05	
band 3	510 - 530 nm	0.05	
band 4	555 - 575 nm	0.05	
band 5	620 - 640 nm	0.05	
band 6	675 - 695 nm	0.05	
band 7	770 - 800 nm	0.05	
band 8	990 - 1050 nm	0.05	
			oplossend vermogen: 10 - 20 m meetomstandigheden gehele jaar 10 - 16 uur

gezichtsveld totaal 25° , per detector element: 0,26 mrad

* NE $\Delta\rho$ = kleinste detecteerbare signaalverschil, gerelateerd aan verschil in reflectiepercentage

Tabel 1 Voornaamste CAESAR-specificaties



Figuur 7 CAESAR module, links het objectief, de CCD-detectoren en instelmechanismen, rechts: de elektronica voor voeding en signaalbehandeling

gemonteerd. Ruime aandacht is besteed aan de keuze der CCD-detectoren. Drie verschillende merken zijn uitvoerig getest op donkerstroom, spectrale gevoeligheid, uniformiteit en lineariteit. Ook verschijnenselen als optische overspraak en transportefficiency zijn onderzocht. Uiteindelijk is gekozen voor een CCD type Thomson TH 7801.

Enkele bijzonderheden van CAESAR.

- De grote doos met 3 modules kan over 20° gekanteld worden om de invloed van zonspiegelingen op water te verminderen
- Het instrument kan met gekoelde lucht worden doorblazen, zodat gebruik in tropische gebieden mogelijk is.
- De snelle dataverwerkingselektronica

kan een datastroom van maximaal 8,5 Mbits/s aan Hiermee wordt één vluchttape in circa 15 minuten volgeschreven.

De eerste proefvluchten met CAESAR zijn reeds gemaakt. De Scanner bevindt zich in het laatste stadium van ontwikkeling, waarbij de TPD alleen nog de definitieve radiometrische kalibratie verricht [1].

Meting aan bovenleiding

In opdracht van de Nederlandse Spoorwegen heeft de TPD onderzocht of het mogelijk is vanuit een rijdende meetwagen de bovenleiding te inspecteren zowel op slijtage (dikte meting) als op het optreden van lokale "kraters", die kunnen ontstaan door het optreden van vonken en grote lokale stroomafname

De problemen zijn.

- rijdend met een snelheid van 90 km/uur wil men elke centimeter rijdraad inspecteren,
- de rijdraad (2 rijdraden vlak naast elkaar) bevindt zich niet op een vaste positie, maar beweegt in horizontale richting over maximaal 90 centimeter (voor gelijkmatige slijtage van de stroomafnemer) en in verticale richting over meer dan 100 centimeter;
- de meetnauwkeurigheid van de rijdraaddikte dient ongeveer 0,25 mm te zijn.

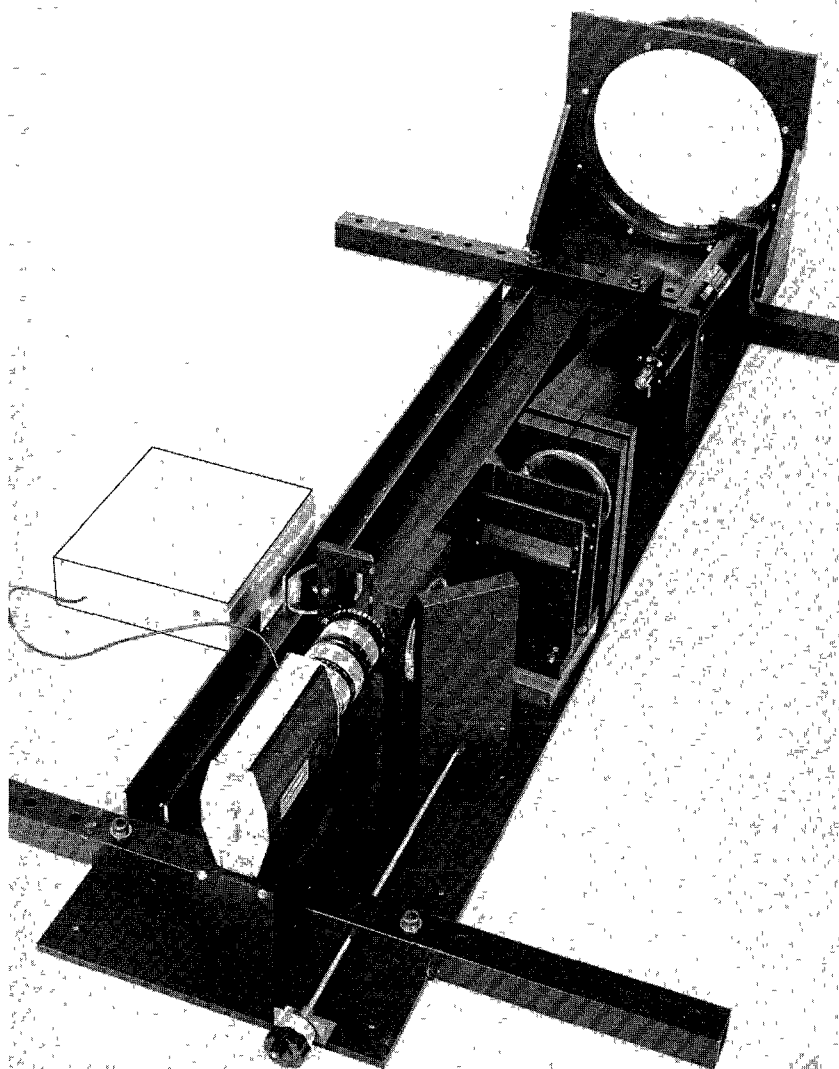
Door toepassing van lineaire CCD-detectoren is het mogelijk dit inspectieprobleem op te lossen. Daartoe is een prototype meetsysteem ontwikkeld, dat in figuur 8 is weergegeven.

De CCD-detector wordt loodrecht op de rijrichting geplaatst, zodat de beweging van de rijdraad in deze richting gevolgd kan worden. De rijdraad wordt verlicht met een He-Ne laser ($\lambda = 633 \text{ nm}$) en het door het slijtvlak van de rijdraad gereflecteerde licht wordt door een optisch systeem op de detector afgebeeld. De invloed van de heldere achtergrond onderdrukt men met een optisch filter dat alleen licht rond de lasergolflengte doorlaat.

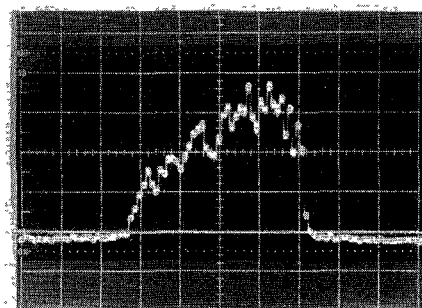
Voor proefmetingen werd een standaard Fairchild CCD-camera gebruikt. Het CCD-sigitaal werd op een oscilloscoop weergegeven. Bij laboratoriummetingen aan monsters van rijdraden bleek het mogelijk de gewenste nauwkeurigheid te halen. Metingen in de praktijk

(rijdend met een snelheid van 60 km/uur) leverde signalen op waaruit de dikte van de rijdraad zeer goed te bepalen is (figuur 9). Het meetsignaal heeft bovendien een duidelijke structuur, die aanwijzingen geeft over plekken met extra slijtage.

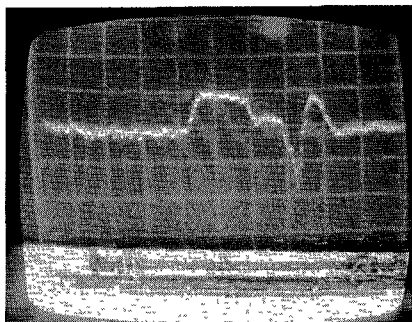
Het probleem is in principe oplosbaar, maar het scansysteem moet nog worden uitgewerkt tot een volwaardig operationeel systeem, waarbij vooral de ontwikkeling van zeer snelle elektronica en een optimaal detectie-algoritme veel aandacht zal vergen.



Figuur 8 Prototype voor metingen aan bovenleidingen. Zichtbaar zijn laser, frontlens en CCD-camera met voeding. In de lichtbaan bevinden zich enige cilinderlenzen voor een juiste afbeelding van de lichtbundel.



Figuur 9a Laboratoriummeting aan bovenleiding; de signalen der afzonderlijke CCD-elementen zijn goed zichtbaar.



Figuur 9b Meting vanuit NS-meetwagen bij 60 km/uur.

Inspectie van bankbiljetten

In opdracht van De Nederlandse Bank is door de TPD een systeem ontwikkeld voor de schoon/vuil-keuring van gebruikte bankbiljetten, ten behoeve van een inspectie op hun geschiktheid voor recirculatie. Het systeem heet BFIS (Banknote Fitness Inspection System [2]) en keurt op circulatie-effecten als vervuiling, kreukels, gaten, scheuren, plakband, ezelsoren en lokale afwijkingen zoals schrift.

De keuring is gebaseerd op meting van de optische reflectie van het biljetoppervlak. De intensiteit van deze reflectie verandert als gevolg van circulatie-effecten. De bankbiljetten worden in een transportmachine langs het detectiesysteem gevoerd. Het biljet wordt in reflectie afgetast met behulp van een lineaire fotodiode-array, type Reticon

RL 64A, met 64 elementen. Daartoe wordt een lijnvormige strook van het biljet loodrecht op transportrichting via een optisch systeem verlicht met een 50 W-halogenelamp. De verlichte biljetstrook wordt afgebeeld op de fotodiode-array, zodanig dat één array element correspondeert met een biljetelement van 2×2 mm. Via een biljetranddetector en een transportsensor wordt het scannen gesynchroniseerd met het biljettransport. Het fotodiode array-sig-naal wordt per element gedigitaliseerd (8 bits) en, na hardware voorbewerking, ingelezen in een microprocesorgeheugen. De keuring vindt in software plaats door de data van alle biljetelementen volgens bepaalde algoritmen te verwerken, gebruik makend van door gebruiker gespecificeerde keurdrempels en biljet-geometriegegevens.

Het uiteindelijke keurresultaat per biljet gaat naar een sorteercomputer, die onder meer de mechanische sortering van het bankbiljet bestuurt.

Enkele gegevens:

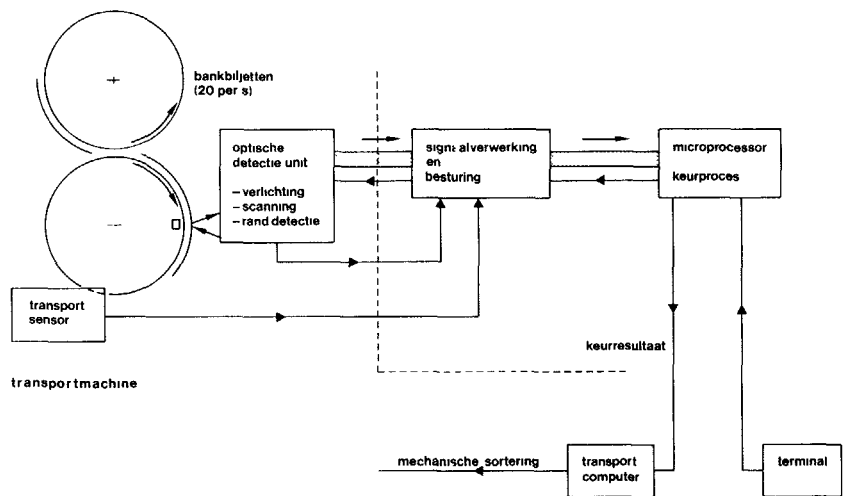
- per seconde worden twintig bankbiljetten gekeurd;
- detectie vindt plaats in spiegelende reflectie, in het zichtbare golflengtegebied (uit ontwerpstudies is gebleken dat het merendeel van de circulatie-effecten op deze wijze het beste waarneembaar is);
- het digitale detectorsignaal wordt per element gecorrigeerd voor donkerstroom en gevoeligheidsvariaties inclusief irradiantie-verloop (de correctie vindt, vanwege de snelheidseisen, on-line in hardware plaats);
- de benodigde gegevens voor de datacorrectie worden door het systeem zelf bepaald in een ijkprocedure, na opstarten en tussen opeenvolgende sorteercycli.

Bijzondere aandacht is gegeven aan hoge datasnelheid, reproduceerbaarheid van de reflectiemeting, beperkte beschikbare ruimte voor optische detectie-eenheid en stof afkomstig van de bankbiljetten.

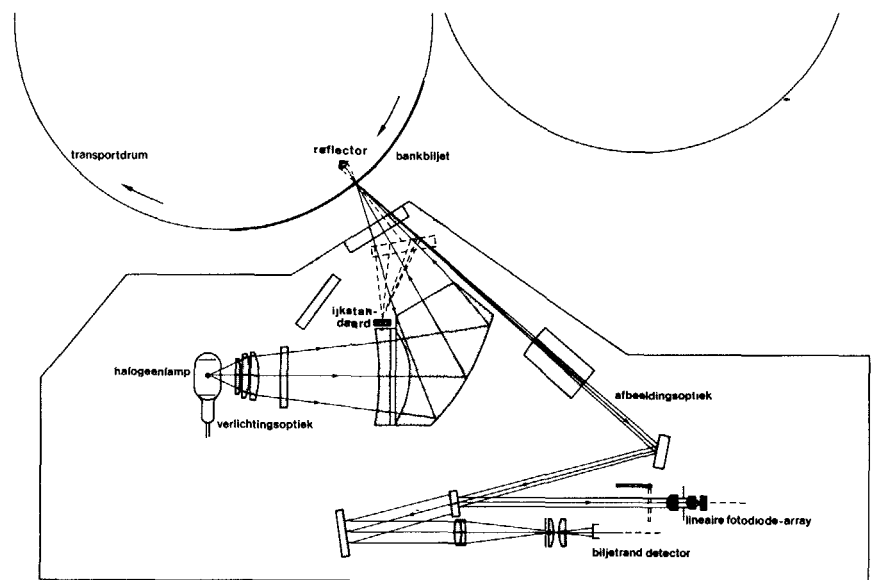
Een prototype BFIS is bij De Nederlandse Bank te Amsterdam geïnstalleerd en vervolgens uitvoerig in de praktijk getest. Een Nederlandse industrie gaat de serieproductie van BFIS-systemen verzorgen. De eerste serie-systemen worden nu in operationeel bedrijf gesteld.

Kwaliteitssortering van fruit

Het sorteren van fruit op oppervlakteafwijkingen en lokale kleurkenmerken gebeurt meestal handmatig. Daartoe zijn in sorteer- en verpakkinglijnen zogenaamde leestafels opgenomen, waaraan de kwaliteit van de vruchten



Figuur 10a Schoon/vuil-detectie voor bankbiljetten, gekoppeld aan transportmachine (blokschema)



Figuur 10b Optische configuratie schoon/vuil-detectie

visueel beoordeeld wordt door keurmeesters. De TPD heeft een onderzoek ingesteld naar de mogelijkheden tot automatisering van deze kwaliteitssortering. Dit project is gestart op initiatief van het Centrum voor Micro-Elektronica Delft TNO en wordt uitgevoerd in samenwerking met AWETA B.V. te Nootdorp. Het project richt zich voorlopig op het keuren van appels. Kwaliteitskenmerken waarop gekeurd moet worden zijn: kleurafwijkingen, schilbeschadigingen, ruw-schiligheid, vormafwijkingen etc. De keuring dient plaats te vinden met een snelheid van circa drie vruchten per seconde per transportbaan. Bij het onderzoek zijn verschillende methoden voor detectie en signaalverwerking betrokken. Eén van de methoden is de toepassing van een lineaire CCD-array.

De meetopstelling is schematisch weergegeven in figuur 11. De appel wordt via een condenseroptiek en een infraroodfilter dat alleen het zichtbare licht doorlaat met een halogenelamp verlicht. Een strook van de appel wordt in reflectie afgebeeld op een lineaire CCD-array. Bij de experimenten was de afbeeldingsmaatstaf zodanig dat de elementafmetingen op de appel circa $0,05 \times 0,05$ mm bedroegen. Het oppervlak van de appel geeft zowel spiegelende als diffuse reflectie van de invallende bundel. Teneinde de ongewenste spiegelende reflectie in detectierichting volledig weg te filteren blijkt het noodzakelijk een polarisatiefilter in de verlichtingsbundel op te nemen, in combinatie met een analysator vóór de CCD-detector. Het videosignaal van de CCD wordt via A/D-omzetting ingelezen in een compu-

ter ten behoeve van signaalverwerking. Figuur 12a geeft een videosignaal weer van een CCD-scan over een goede appel. Figuur 12b toont een signaal van een scan over een appel met een afwijking. De afwijking geeft plaatselijk een aanzienlijke verandering in het videosignaal. Door toepassing van goed gekozen filtertechnieken kan een aantal soorten oppervlakte-afwijkingen op deze wijze worden gedetecteerd.

Eén van de problemen is de willekeurige orientatie waarin de appels het sorteerstation passeren. Aanwezigheid van kelken steel zal aanleiding geven tot signaalveranderingen in een CCD-scan. Teneinde deze te kunnen onderscheiden van de signaalveranderingen veroorzaakt door kwaliteitsafwijkingen, moet de orientatie van de appel automatisch worden bepaald. Verschillende methoden hiervoor worden op hun bruikbaarheid onderzocht.

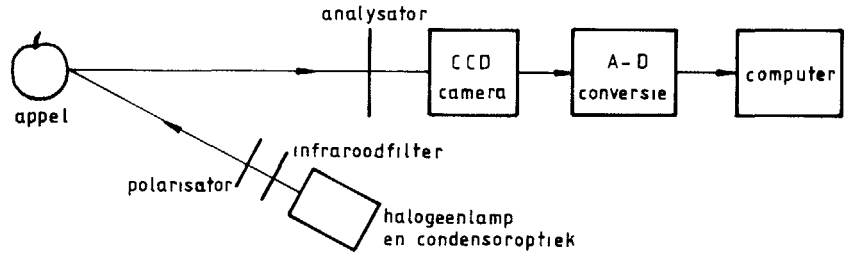
Slotbeschouwing

Dit artikel tracht enig inzicht te geven in de eigenschappen en toepassingsmogelijkheden van lineaire optische detector-arrays. Het gebruik van deze solid-state sensoren als beeldscanners neemt toe en met name in scansystemen voor aardobservatie en in meet-systemen ten behoeve van industriële automatisering (kwaliteitscontrole van producten etc.) Uit het voorafgaande blijkt een sterke onderlinge afhankelijkheid van optisch systeem, verlichting, detector en signaalverwerking. Elk systeemgedeelte vergt daarbij maximale aandacht om een, ten opzichte van de gestelde specificaties, zo optimaal mogelijk functionerend totaalsysteem te verkrijgen. Het meest opvallende verschil met de klassieke (mechanische) scanmethode is het ontbreken van bewegende onderdelen.

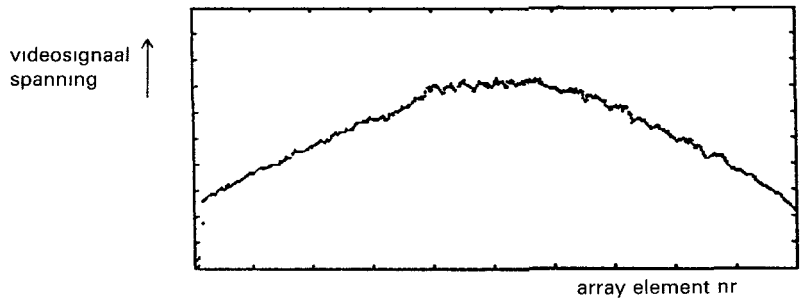
Verbetering van de elektronische scanners is mogelijk geworden door vrijwel gelijktijdige snelle ontwikkelingen op het gebied van lineaire detector-arrays, computersystemen en IC-technologie. Ten aanzien van de toekomstige ontwikkelingen kan het volgende worden gesignaleerd.

• *Verbetering van detector-eigenschappen*

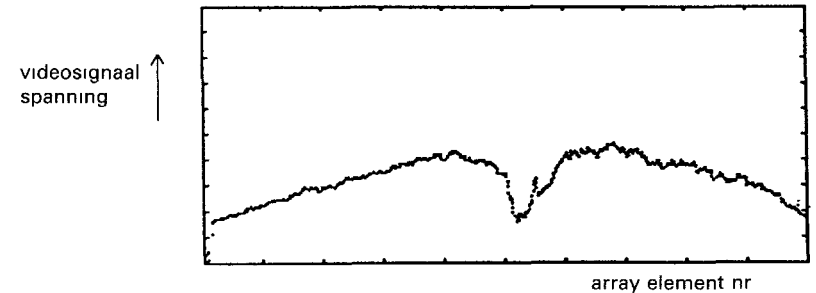
Deze verbetering betreft onder andere het oplossend vermogen (groter aantal detector-elementen per chip), de gevoeligheid, de uniformiteit van de elementen en de snelheid. Naast silicium zullen andere materialen voor de arrays worden gebruikt (bijvoorbeeld GaAs).



Figuur 11 Blokschema kwaliteitssortering van appels met lineaire CCD-detector-array (laboratorium-opstelling)



Figuur 12a CCD-siganaal van een scan over een goede appel



Figuur 12b CCD-siganaal van een scan over een appel met een kwaliteitsafwijking (vlek van ca 3mm)

• *Uitbreiding van het spectrale gebied*

Op dit moment worden detector-arrays ontwikkeld, die voor langgolvlige straling gevoelig zijn. Zij bevinden zich echter nog in het prototype stadium. Vooral bij toepassing in het thermische infrarood treft men totaal andere ontwerproblemen (speciale optiek, cryogene koeling etc.)

• *Uitbreiding van on-chip elektronica*

Hiermee zal het mogelijk zijn de signaalverwerkingsfuncties uit te breiden en signaalverwerkingsnelheden te verhogen.

• *Ontwikkeling van arrays voor speciale toepassingen*

Als voorbeeld geldt het aanbrengen van het spectrale filter op de detector-array. Hierdoor is het mogelijk een beeld in de

drie basiskleuren af te tasten. Deze ontwikkelingen zullen de kwaliteit van elektronische scanners sterk doen toenemen en daarmee het gebruik ervan stimuleren.

Literatuur

[1] N. J. J. Bunninken, C. Smorenburg, Caesar Bijdrage om Remote Sensing op hoger niveau te brengen TNO-Project, 12e jaargang nr 3 maart 1984
 [2] J. W. Klumper, H. Visser: "Apparates for automatically detecting and evaluating the characteristics of prints". Canadees patent no. 1168467 d.d. 840605, verleend aan De Nederlandse Bank N.V.
 [3] CCD-The solid state image technology Fairchild CCD Imaging, 3440 Hillview Avenue, Palo Alto, California 94304.
 [4] Charge coupled devices and systems. Editors M. J. Howes, D. V. Morgan, John Wiley & Sons Ltd., 1979