



Lund Reports on Atomic Physics, LRAP-242

Examensarbete

Optiskt sensorsystem
för mynt

Daniel Nilsson F93¹
Magnus Johansson F93²

Handledare:
Manfred Jönsson³
Stefan Kröll⁴

21 januari 1999

¹E-mail: f93dn@efd.lth.se

²E-mail: f93mjo@efd.lth.se

³SCAN COIN AB, Jägershillgatan 26
213 75 Malmö, Sverige

⁴Avdelningen för atomfysik, Box 118
221 00 Lund, Sverige

Abstract

The identification of coins is often based upon factors as the diameter and the material of the coin. There are however situations when these parameters are insufficient to make an unambiguous identification. One remedy for this problem would be to optically recognize the surface structure of the coin. In this thesis we present one possible way to achieve a threedimensional image of the surface of the coin based on sheet-of-light range imaging using a sensor system based on a twodimensional image sensor and cylindrical optics. We also discuss different principles of measurement and identification that could be used in optical identification of coins. Finally we present some design considerations relevant to consider for anyone who wish to construct this kind of sensorsystem.

Keywords: sheet of light range imaging, coin identification, MAPP2200, threedimensional imaging, smart image sensors, machine vision applications, optical imaging, optical pattern recognition

Förord

Först och främst skulle vi vilja tacka våra handledare Manfred Jönsson och Stefan Kröll för den hjälp och de goda råd de har gett oss. Dessutom vill vi tacka René Nilsson, Maria Petersson och alla andra kollegor och bekanta för deras stöd och uppmuntran.

Det är med tillfredsställelse vi kan konstatera att arbetet har varit lärorikt och intressant för oss båda. Arbetet har medfört både motgångar och framgångar, ofta genom "trial & error", men så här på slutet är vi ändå nöjda med resultatet. Vi hoppas dessutom att SCAN COIN ska ha någon framtida nytta av vårt arbete. Vi avslutar detta förord med ett gammalt folkligt visdomsord från Örkelljunga-traktens obygdor och hoppas att du som har orkat läsa detta något krystade förord ska finna rapporten desto mer intressant och lärorik. Mycket nöje!

Magnus Johansson
Daniel Nilsson

*"Tro inte folk och mynt för väl:
mynt gör falska folk, och falska folk gör mynt."*

Innehållsförteckning

<u>Abstract</u>	1
<u>Förord</u>	2
<u>Innehållsförteckning</u>	3
<u>1. Inledning och bakgrund</u>	4
<u>2. Optiska mätprinciper</u>	5
2.1 Linjescanning med 1D bildsensor.....	5
2.2 Ögonblicksbild med 2D bildsensor.....	5
2.3 Optisk triangulering.....	6
2.3.1 Optisk triangulering med 1D bildsensor.....	6
2.3.2 Optisk triangulering med 2D bildsensor.....	7
2.3.3 Ocklusion.....	7
<u>3. Förbehandling av data</u>	9
<u>4. Identifieringsmetoder</u>	11
4.1 Mönsterigenkänning m h a optisk korrelation.....	11
4.2 Digital korrelation mellan bilder av mynten.....	12
4.3 Moment.....	13
4.4 Hotellingtransform.....	14
4.5 Histogram.....	16
<u>5. Ljuskällor</u>	17
<u>6. Detektorer</u>	19
6.1 PSD (Position Sensitive Device).....	19
6.2 CCD-baserade sensorer.....	21
6.3 CMOS-baserade sensorer.....	21
<u>7. Vår uppställning</u>	22
7.1 Ljuskällan.....	22
7.2 Mynttranslatoren.....	23
7.3 Sensorsystemet.....	23
7.3.1 Optik.....	23
7.3.2 Bildsensorn MAPP2200.....	24
7.3.3 PC med instickskort och programvara.....	26
7.3.4 Vertikal respektive horisontell optisk triangulering:.....	27
7.3.5 Algoritmer för att läsa ut höjdvärden.....	27
7.3.6 Upplösningen hos sensorsystemet.....	30
7.3.7 Diffraction och avbildningsfel (aberrationer).....	31
7.3.8 Extra fokusering av laserlinjen.....	35
<u>8. Resultat</u>	37
<u>9. Tekniska data om sensorsystemet</u>	39
<u>10. Systemdesign</u>	40
<u>11. Slutsatser och diskussion</u>	43
<u>Appendix A – Myntbilder erhållna med vårt system</u>	44
<u>Appendix B – Programlista för IMAGE.C</u>	48
<u>Appendix C – Programlista för IMAGE.M</u>	54
<u>Referenser</u>	55

1. Inledning och bakgrund

I detta examensarbete har vi utvecklat och konstruerat ett sensorsystem som kan användas vid optisk identifiering av mynt. Vi utnyttjar optisk triangulering med en laserlinje, där höjdstrukturen hos mynten bestämmer hur laserlinjen ser ut när den avbildas på en bildsensor. Bildsensorn vi använder är en sk smart bildsensor av typen MAPP2200 ISA Smart Vision System, tillverkad av Integrated Vision Products i Linköping. Vi har gjort vårt examensarbete för företaget SCAN COIN i Malmö som tillverkar och utvecklar maskiner för mynt- och sedelhantering. I de myntsorterarmaskiner som SCAN COIN hittills har byggt har identifieringen grundats på främst storleken och materialet hos mynten. Detta har då genomförts med sofistikerade mekaniska anordningar samt med givare som bygger på induktiva principer. Problemet vi har tagit upp gäller identifieringen av mynt där både storleken och materialet sammanfaller med andra myntsorter. I sådana fall krävs det kännedom om ytterligare parametrar för att inte göra en felbedömning. Eftersom reliefmönstret på olika sorters mynt alltid skiljer sig, om än ganska lite, så borde en identifieringsmetod baserad på reliefmönstret kunna lösa problemet.

Med tanke på att mynten rör sig med hög hastighet är det lämpligt att göra mätningen beröringsfritt. Ett optiskt sensorsystem kan då tänkas vara lösningen.

Problemområdena vid en optisk analys av mynt kan delas upp enligt följande:

1. Transport och placering av myntet framför bildsensorn
2. Optisk mätprincip
3. Exponeringsförhållanden
4. Förbehandling av bildinformationen
5. Val av identifieringsalgoritmer
6. Analys av bildinformation
7. Identifiering och kvalitetsbedömning av myntet grundat på analysen.

Vi har valt att koncentrera oss på punkterna 2-5 i vårt examensarbete. Syftet med examensarbetet har varit att

- i) Göra en förundersökning om vilka mätprinciper som kan komma ifråga samt undersöka vad för slags utrustning som kan vara lämplig till ett optiskt sensorsystem för mynt
- ii) Konstruera en prototyp
- iii) Utvärdera resultatet och systemdesignen

2. Optiska mätprinciper

Optiska mätprinciper har fördelarna att mätningen kan ske beröringsfritt, snabbt och med hög precision. Snabbheten i ett optiskt mätsystem begränsas oftast av sensorn eller av tiden det tar att behandla mätdata. Precisionen begränsas däremot ytterst av diffraktionen i de optiska komponenterna, vilket innebär att man ofta kan få en noggrannhet på ett tiotal mikrometer när. De mätprinciper som vi har valt att ta upp är de vi har bedömt som intressantast i fråga om identifiering av mynt.

2.1 Linjescanning med 1D bildsensor

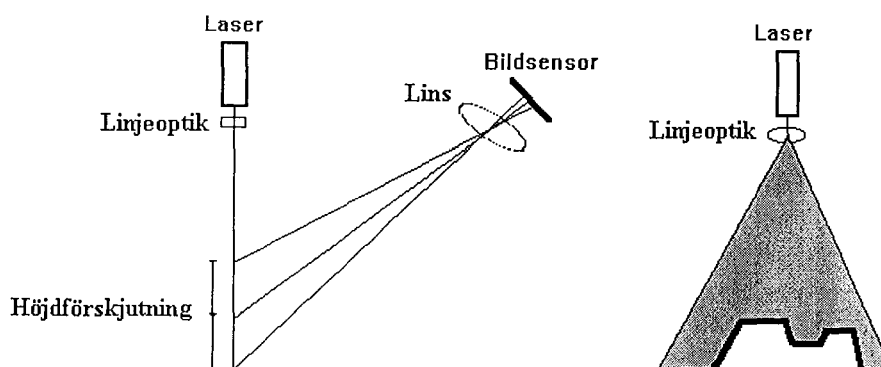
Allteftersom myntet rör sig under sensorn registreras myntets utseende som en intensitetsbild linje för linje tills dess att en hel bild har erhållits. Detta kan vara en enkel och billig metod att lösa problemet på. Tyvärr får man inte information om höjdvariationerna på den undersökta ytan utan bara en intensitetsbild av denna. Detta är en nackdel då myntytan kan vara missfärgad och förorenad av allehanda substanser (främst p g a ärgning, fett eller smuts) och således blir bilden beroende av detta. Metoden är även känslig för skillnader i bakgrundsljus, men detta kan förvisso lösas genom att skärma bort bakgrundsljuset. Fördelarna med metoden är att endimensionella sensorer är billiga och att det krävs få komponenter i systemet. Nackdelen är främst att identifieringen av mynten kan bli vansklig och beräkningskrävande.

2.2 Ögonblicksbild med 2D bildsensor

Denna metod bygger på samma princip som ovanstående, med skillnaden att vi tar en ögonblicksbild av myntet i flykten. Fördelarna är att vi slipper scanna in myntet linje för linje. Nackdelarna är att priset är högre för en tvådimensionell sensor än en endimensionell dito. Denna metod är dessutom också känslig för skillnader i färg hos mynten och bakgrundsljus. För att inte bilderna ska bli suddiga p g a myntets rörelse är det viktigt att bildsensorn har en kort slutartid (eller nödvändig exponeringstid). Ett enklare alternativ kan vara att pulsa belysningen.

2.3 Optisk triangulering

Huvudtanken med denna metod är att belysa mätobjektet på ett väldefinierat sätt, samt att sedan registrera utseendet hos det belysta området med en detektor som är placerad en bit ifrån enligt figur 1 nedan.



Figur 1. Grundprincipen vid optisk triangulering. Vänstra bilden, som är en sidovy, visar hur höjdskillnader hos objektet ger upphov till positionsförskjutningar hos det detekterade spridda ljuset. I den högra bilden ser vi hur laserstrålen (det grå fältet) expanderas av linjeoptiken och den tjocka heldragna linjen är laserlinjens utseende sett från detektorn när laserstrålen träffar mätobjektet.

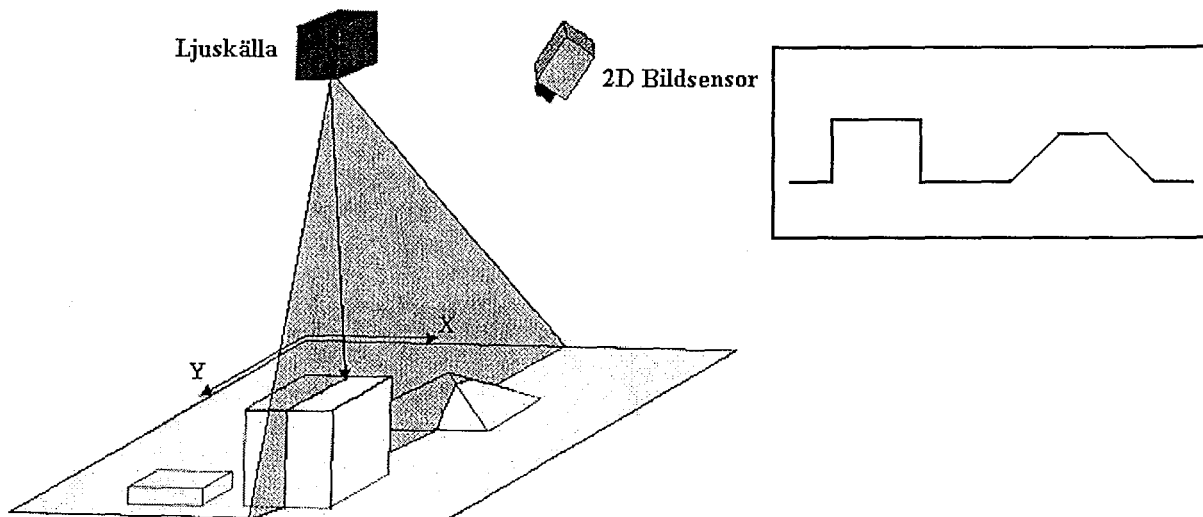
Som man ser från bilden så får man höjdvariationerna i form av utslag på detektorn som läses av med hög hastighet medan objektet rör sig genom laserlinjen. Varje belyst linje av mätobjektet ger alltså upphov till en krökt linje på bildsensorn (se högra bilden). Genom att sätta samman flera sådana relieflinjer får man en tredimensionell topologisk bild av ytan på myntet.¹

2.3.1 Optisk triangulering med 1D bildsensor

Här belyser man myntet med en laserstråle som xy-scannas över myntets yta. Läget hos ljusfläcken sett från sensorn ger höjdinformationen om myntet i den aktuella mätpunkten. Om bilden av myntet ska innehålla $N \cdot M$ höjdvärden, där N och M är antalet pixlar i x -respektive y -led så behövs $N \cdot M$ avläsningar av sensorn för att få en hel reliefbild av myntet. Detta gör att metoden blir tämligen omständlig och långsam.

2.3.2 Optisk triangulering med 2D bildsensor

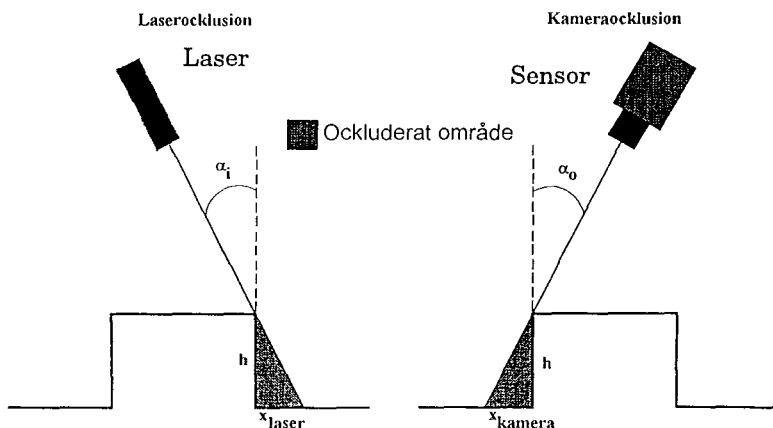
I detta fall expanderas ljusstrålen i en dimension m h a en cylindrisk lins eller annan linjegererande optik. Den platta ljusstrålen (som kallas "sheet-of-light" i engelskspråkig litteratur) belyser en linje på myntet, där denna linje är vinkelrät mot myntets rörelseriktning. Om ljuskällan och bildsensorn placeras rätt så kommer utseendet hos den belysta linjen att avspegla myntets höjdreliéf längs denna linje. Då är det möjligt att registrera belysningslinjen på denna bildsensor. Eftersom myntet rör sig, så kommer vi att scanna av myntet successivt och genom att sätta samman alla dessa relieflinjer får vi en tredimensionell bild av myntet. Se figur 2 nedan.



Figur 2. Optisk triangulering med en 2D bildsensor. Den inflikade bilden till höger visar laserlinjens utseende på sensorytan. (Källa: Referens 1)

2.3.3 Ocklusion

Ett av problemen med optisk triangulering är ocklusionsfenomenet. Ocklusion inträffar när delar av den undersökta höjdstukturen inte kan belysas eller inte kan observeras, vilket illustreras i figur 3. I det första fallet kallas fenomenet laserocklusion och i det senare fallet kameraocklusion. Detta är något man måste ta i beaktande när man designar sitt system.



Figur 3. De två typerna av ocklusion som uppkommer vid optisk triangulering.

De område man missar när man får laserocklusion beror på höjden hos strukturen som skymmer och vinkeln mot normalen som laserstrålen infaller med. Man får att områdets längd blir:

$$x_{laser} = h \cdot \tan \alpha_i \quad (1)$$

På samma sätt får man området som inte syns p g a kameraocklusion till

$$x_{kamera} = h \cdot \tan \alpha_o . \quad (2)$$

3. Förbehandling av data

Det kan vara nödvändigt att redan i ett tidigt skede utföra matematiska operationer på bilddata för att t ex minska redundansen i systemet, framhäva vissa detaljer i bilden eller minska oönskat brus.^{2,3} Nedan följer några exempel på operationer som kan tänkas behövas. Vi kan tillägga att samtliga av dessa operationer finns tillgängliga eller kan relativt lätt utföras m h a färdigskrivna rutiner och funktioner i IVP's macroassembler (IVPMASM) för MAPP2200 Smart Vision System. De funktioner eller macron som då finns har vi skrivit med fetstil.

- Högpasfiltering av bilden för att framhäva konturerna i bilden. Tyvärr förstärks brus av en sådan operation.

Användbara rutiner:

LAPLACE

Filtermasken som används är en approximation av laplaceoperatorn och masken ser ut på följande sätt:

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & -12 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

SOBEL

Detta är en variant av högpasfilter som inte förstärker bruset lika mycket. Filtermasken består av två masker, en i x-led och en i y-led:

$$\text{X-led: } \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Y-led: } \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

- Lågpasfiltering för att minska bruset i bilden. Resultatet blir en viktad medelvärdesbildning över närliggande pixlar.

Användbara rutiner:

LOWPASS

Filtermasken är här:

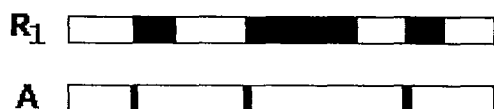
$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

- Detektion av vänstra och högra kanten hos objekt i bilden. Detta kan användas för att t ex lokalisera var laserlinjen ligger på sensorytan, men det kan också tänkas att detta behöver göras för att kunna lokalisera myntets centrum i bilden. Om man är intresserad av att plocka ut och jämföra specifika delar eller objekt i myntets struktur, så kan det vara naturligt att ha myntets centrum som en slags utgångspunkt.

Användbara rutiner i IVPASM:

LEDGE

Dessa macron letar upp de vänstra kanterna hos områden med ettor i MAPP2200 ackumulator (mer om detta längre fram i rapporten). I bilden nedan representerar R1 den obehandlade sensorraden och A (ackumulatorn) visar resultatet av operationen. I manualen till MAPP2200 representeras nollor med vit färg och ettor med svart färg och vi har använt oss av deras konvention i nedanstående bilder.



Figur 4. Resultatet av operationen LEDGE

REDGE

Som LEDGE fast för de högra kanterna.

LFILL

Dessa macron fyller alla bitar till vänster om den till vänster mest belägna kanten med nollor och alla övriga bitar sätts till ett. Bilden nedan visar den obehandlade sensorraden R1 och resultatet som lagras i A.



Figur 5. Resultatet av operationen LFILL

RFILL

Som LFILL fast den fyller nu alla bitar till höger om den till höger mest belägna kanten med nollor.

- Adaptiv reglering av ljussättningen i bilden om myntets reflektans är för låg/hög för att ge en identifierbar bild. Detta kommer nog endast ifråga om man är ute efter att ta en ren intensitetsbild, där myntets reflektans har stor inverkan på bildens kvalitet. Färdigt programexempel som utför adaptiv reglering av ljussättningen följer med MAPP2200 kameran. Detta är dock ingen operation som vi har använt eller fördjupat oss i.
- Tröskling av pixlarna m a p intensitet eller tröskling av höjdvärdena m a p en viss minimihöjd. Detta är mycket användbar operation som kan användas för att skala bort orimliga värden eller värden som uppenbart kommer att försämra bildens kvalitet.

Användbara funktioner i IVPASM:

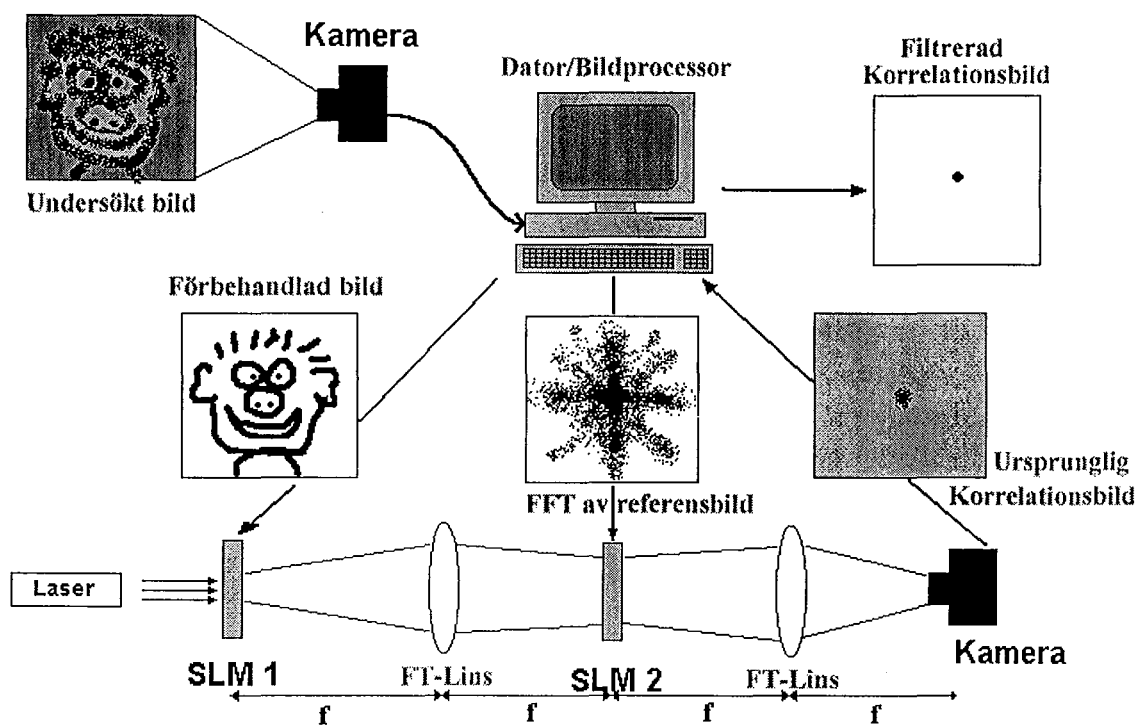
SETV tröskelnivå

Detta kommando sätter tröskelnivån som A/D-omvandlaren i MAPP2200 kameran jämför den analoga intensitetssignalen för varje pixel med. Värdet hos tröskelnivån ska ligga mellan 0 och 255.

4. Identifieringsmetoder

4.1 Mönsterigenkänning m h a optisk korrelation

Denna metod har klara fördelar: den är potentiellt extremt snabb och den kräver ingen programmering av mönsterigenkänningsalgoritmer. Precis som man fouriertransformerar en digital bild med en FFT-algoritm, så kan man med hjälp av vanliga linser fouriertransformera en bild optiskt. Med hjälp av s k SLM's (*Spatial Light Modulator*) kan sedan ljusstrålen moduleras av en digital bildsignal, vilket möjliggör korrelation mellan två digitala bilder. I korthet kan korrelationen ske på följande sätt:



Figur 6. Schematisk skiss över en optisk korrelator av s k 4f-modell.

Först låter man modulera ljusstrålen från en laser med bilden som ska identifieras (den förbehandlade bilden av gubben) via en SLM. Den modulerade ljusstrålen fouriertransformeras sedan av en lins och multipliceras i frekvensplanet med en 2D funktion som modulerar en andra SLM. Denna 2D funktion utgörs i detta fall av resultatet av en FFT av referensbilden. Slutligen fouriertransformeras ljusstrålen på nytt, vilket ger upphov till en bild där korrelationstoppar kommer att ha hög intensitet. Dessa korrelationstoppar kan detekteras m h a en CCD-kamera. De digitala bilderna i figur 6 är egentligen inverterade så att svarta linjer motsvarar transmission av ljus i modulatorerna. Vi får nämligen bara transmission av ljus då vi har överensstämmelse mellan den okända bilden och referensbilden. Korrelatoruppställningen benämns 4f för att avstånden mellan två närliggande optiska komponenter är lika med linsernas brännvidd f .

Institutet för optisk forskning (IOF) har gjort en sådan apparat⁴ och uppger att korrelatorn ska klara en bildfrekvens på 220 Hz under förutsättning att bilderna som ska behandlas ligger som digitala filer i datorn. Om bilderna tas från en CCD-kamera så måste de först läsas av en *framegrabber*, laddas ner till ett lokalt minne i ljusmodulatorerna (SLM) och sedan skickas till modulaton. På detta sjunker korrelatorns prestanda avsevärt ner till en bildfrekvens på ca 1 Hz.

Om sensorn och kommunikationen mellan den och övriga korrelatorn vore snabbare så skulle vi anse denna metod som mycket intressantare.

4.2 Digital korrelation mellan bilder av mynten

Denna metod är troligtvis lättare att implementera än den optiska korrelationen då man gör korrelationen i en dator med lämpliga algoritmer. Detta ställer dock stora krav på processorns och algoritmernas snabbhet.

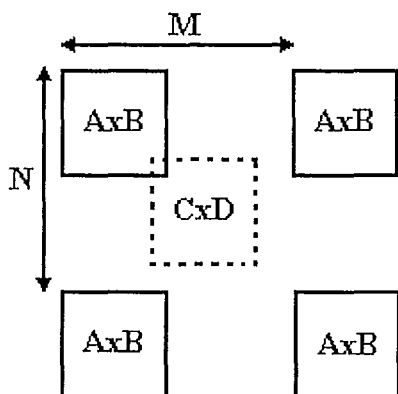
Förbehandling av bilddata, som t ex kantdetektering och tröskling, kan ske i bildsensorn men själva identifieringen utförs av en digital signal processor (DSP) eller en dator.

Vi tänker nu ge en matematisk beskrivning av hur digital korrelation går till.² Antag att vi vill korrelera två digitala bilder vars intensitet beskrivs av de tvådimensionella funktionerna $f(x,y)$ respektive $g(x,y)$ med dimensionerna $A \times B$ respektive $C \times D$. För att undvika matematiska felaktigheter måste man göra periodiska utvecklingar av bilden i x- och y-led. Speciella utvecklingar av $f(x,y)$ och $g(x,y)$ införs så att de individuella perioderna inte överlappar varandra:

$$f_e(x, y) = \begin{cases} f(x, y) & \text{då } 0 \leq x \leq A \text{ och } 0 \leq y \leq B - 1 \\ 0 & A \leq x \leq M - 1 \text{ eller } B \leq y \leq N - 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$g_e(x, y) = \begin{cases} g(x, y) & \text{då } 0 \leq x \leq C - 1 \text{ och } 0 \leq y \leq D - 1 \\ 0 & C \leq x \leq M - 1 \text{ eller } D \leq y \leq N - 1 \end{cases}$$

Dessutom har vi två ytterligare villkor, nämligen att $A+C < M$ och $B+D < N$. I figur 7 nedan illustreras detta med att matrisen med dimensionerna $C \times D$ ej får överlappa två $A \times B$ matriser samtidigt, då $C \times D$ -matrisen förs över $A \times B$ -matrisen vid själva korrelationen.



Figur 7. Digital korrelation mellan en $A \times B$ matris och en $C \times D$ matris.

Den diskretiserade korrelationen mellan dessa två digitala bilder kan då beskrivas med följande formel:

$$f_e(x, y) \circ g_e(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f_e^*(m, n) g_e(x + m, y + n) \quad (4)$$

där $x = 0, 1, 2, 3, \dots, M - 1$ och $y = 0, 1, 2, 3, \dots, N - 1$

Vidare så gäller för både kontinuerlig och diskret korrelation de båda korrelationsteoremen:

$$\begin{aligned} f(x, y) \circ g(x, y) &\Leftrightarrow F^*(u, v) G(u, v) \\ f^*(x, y) g(x, y) &\Leftrightarrow F(u, v) \circ G(u, v) \end{aligned} \quad (5)$$

Enligt det första teoremet så motsvaras korrelationen i spatialplanet av en multiplikation i frekvensplanet. Om de båda matrisernas dimensioner inte skiljer sig alltför mycket så utförs beräkningen av korrelationen ofta effektivare i frekvensplanet m h a FFT-algoritmer.

Om de båda bildmatriserna är lika så kommer vi att få ett relativt stort värde på korrelationen mellan dem. Genom att tröskla resultatet på lämpligt sätt borde man kunna få hög sannolikhet för korrekt identifiering av mynten.

Ett problem med denna metod är att fouriertransformen av en bild inte är rotationsinvariant. En roterad bild ger således upphov till en roterad fouriertransform. Alltså kan vi notera att vi måste vara säkra på vilket håll den registrerade myntbilden är roterad på för att kunna jämföra den med referensbilden. Därför vore det önskvärt att använda någon slags rotationsinvariant bildtransform. Hotellingtransformen kan vara svaret på detta problem men det återstår ännu att se.

Digital korrelation är relativt beräkningsintensivt, vilket gör att det kan ta lång tid att utföra. Om man siktar på att kunna identifiera mynt i hastigheter på ca 4000 mynt per minut så innebär det att varje mynt måste kunna identifieras och behandlas på 10-15 ms. Enligt våra bedömningar är det svårt att hinna med detta om beräkningarna ska utföras på en Pentium 133 MHz dator, men med tanke på hur snabbt beräkningsprestanda ändras så kan detta alternativ bli intressantare med tiden.

4.3 Moment

Ett betydligt snabbare sätt vore att räkna ut olika moment⁵ för myntets relief och hoppas på att de skiljer sig tillräckligt mycket från varandra.

Om intensiteten hos en digital bild beskrivs av funktionen $f(x, y)$ så ges det s k centralmomentet μ_{pq} för denna bild av:

$$\mu_{pq} = \sum_x \sum_y (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y) \quad (6)$$

där momentets ordning är $p+q$ och

$$\bar{x} = \frac{\sum_{k=0}^N \sum_{l=0}^M x_k f(x_k, y_l)}{\sum_{k=0}^N \sum_{l=0}^M f(x_k, y_l)} \quad \text{samnt} \quad \bar{y} = \frac{\sum_{k=0}^N \sum_{l=0}^M y_l f(x_k, y_l)}{\sum_{k=0}^N \sum_{l=0}^M f(x_k, y_l)}$$

Ekvation (6) förutsätter att $f(x,y)$ är skild från noll endast på ett begränsat område (i vårt fall bildens yta).

Mellan en bild $f(x,y)$ och dess momentmängd råder ett entydigt samband. Ju fler moment man beräknar och har med, desto bättre representerar momenten originalbilden.

Genom att lagra värdena hos flera ordningars moment för referensbilderna i en databas, så kan man vid identifieringen jämföra den okända bildens moment med databasens moment. Det finns även normaliserade moment ur vilka man kan få fram moment som är invarianta för translation, rotation och skalning, vilket kan vara värdefullt vid en identifiering av mynt.

Metoden är förmodligen känslig för variationer hos ljusintensiteten i bilden av myntet. Om man använder optisk triangulering så är den troligtvis också känslig för felaktiga höjdvariationer. Optisk triangulering är nog ändå att föredra om moment ska utnyttjas vid identifieringen.

4.4 Hotellingtransform

Denna transform kan användas för att komma förbi problemet med att mynten har en okänd vridningsvinkel då de fotograferas. Hotellingtransformen har den egenskapen att den vrider bilden så att den orienteras efter den egenvektor till bilden som svarar mot det största egenvärdet. Genom att transformera både referensbilden och den upptagna bilden så erhålls ett rotationsinvariant jämförelsematerial. I korthet utförs det hela på följande sätt:

Vi vet att läget hos varje pixel i bilden ges av koordinaterna x_1 och x_2 . Först beräknas medelvärdena av bildens alla x_1 - respektive x_2 -värden. Dessa medelvärden bildar en ny medelvärdesvektor:

$$\mathbf{m}_x = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \mathbf{x}_k \quad \text{där } M = \text{antalet pixlar i bilden} \quad (7)$$

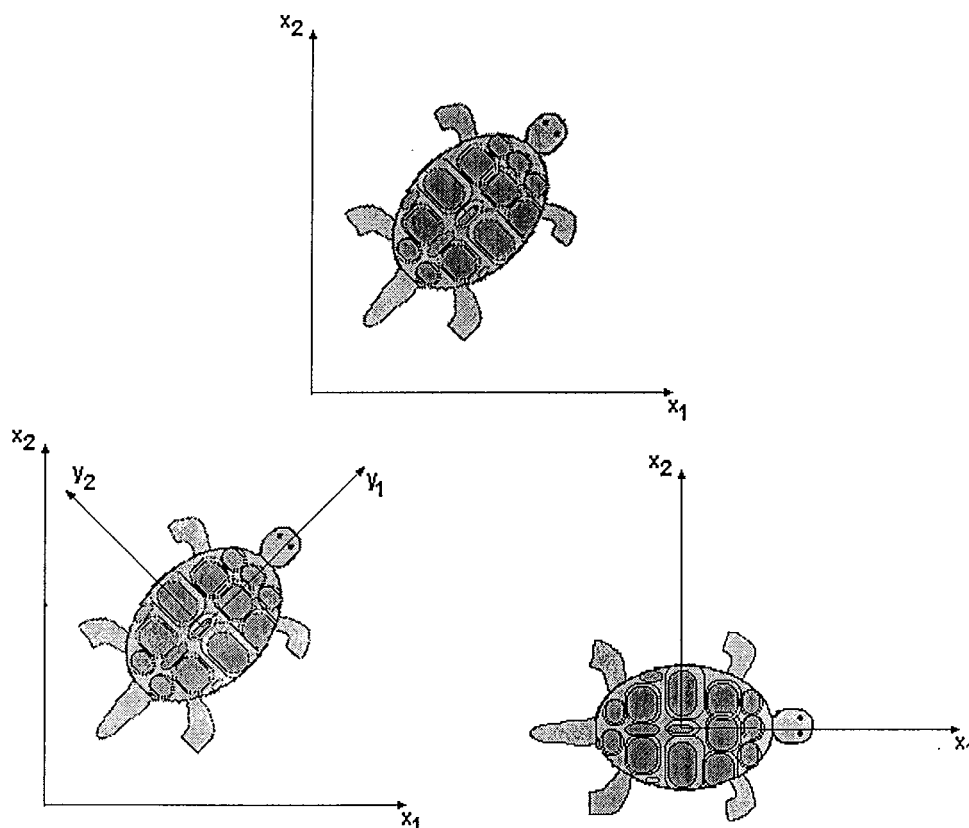
Sedan beräknas en kovariansmatris utifrån vektorn \mathbf{m}_x . Denna kovariansmatris kan beräknas enligt följande formel:

$$\mathbf{C}_x = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \mathbf{x}_k \mathbf{x}_k^T - \mathbf{m}_x \mathbf{m}_x^T \quad (8)$$

Egenvärdena och egenvektorerna för denna kovariansmatris kan sedan beräknas. Antag nu att \mathbf{A} är en transformationsmatris som ges av egenvektorerna till \mathbf{C}_x . Då ges Hotellingtransformen av följande ekvation:

$$y = A \cdot (x - m_x) \quad (9)$$

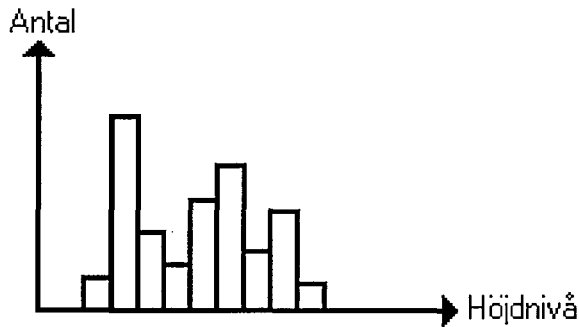
där y_1 - och y_2 -koordinaterna i det nya koordinatsystemet. Hotellingtransformen kan alltså användas för att vrida bilden i de riktningar i vilka bilden har störst symmetri. Egenvärdena anger i någon mening hur symmetrisk bilden är och skulle också möjligtvis kunna användas för identifieringen mot någon databas med egenvärden hos referensbilderna. Figur 8 nedan visar hur hotellingtransformen påverkar en bild. För mer information om hotellingtransformen hänvisar vi till referens (2).



Figur 8. Hotellingtransformens inverkan på en bild

4.5 Histogram

En ännu enklare metod för mönsterigenkänning vore att lägga in ytans höjd i varje pixel i ett histogram med ett visst antal staplar, se figur 9 nedan. Sedan kan man jämföra varje stapels höjd med referensernas höjder.



Figur 9. Ett exempel på histogram över myntets höjdfördelning

Antingen kan man jämföra varje stapel var för sig med de olika referenserna och säga att ett visst antal av alla staplar ska ligga inom ett intervall för de olika referenserna och välja den referens som har flest matchningar. Ett annat alternativ vore att summera alla differenser för de olika staplarna gentemot olika referenser och välja den referens som har minst differenssumma.

Man skulle kanske också kunna beräkna förväntningsvärdet och variansen för staplarna i histogrammet och utnyttja dem för identifikation.

Innan man histogramtransformerar är det lämpligt att göra någon form av brusreducering och tröskling för att lägga en topologisk nollnivå. Man kan då eventuellt få problem med att myntet inte ligger helt plant på underlaget. Detta kan då ge felaktiga värden på topologin. För att få bukt med detta problem kan man plocka ut ett antal punkter längs myntets ytterkant och låta dessa punkter utgöra ett normalplan där höjdnivån anses vara noll. Ocklusion kan också påverka vilka delar av myntet som detekteras och därmed identifieringen av myntet. Problemet med ocklusion blir störst där myntet har stora och/eller snabba höjdförändringar. Avslutningsvis kan vi dessutom konstatera att histogrammetoden är känslig för ljusvariationer och att man då troligtvis måste använda optisk triangulering, vilket vi också har gjort i detta arbete.

5. Ljuskällor

I det här avsnittet ger vi en sammanfattning av de ljuskällor vi har provat och använt under utvecklingen av systemet. Vissa ljuskällor har aldrig varit riktigt realistiska att använda men vi har tagit med dem i listan för fullständighetens skull. Ljuskällornas uteffekt och deras pris är ungefärliga och varierar naturligtvis beroende på modell och tillverkare.

- **HeNe-laser**

Effekt: 3-4 mW

Cirka Pris: 1500-2000 SEK

Typ av ljus: Koherent

Fördelar: Ger smal och fin laserlinje.

Nackdelar: Ganska stor.

Övrigt: Relativt enkel att hantera.

- **Diodlasermodul (Lasiris lasermodul modell SNF-501L)**

Effekt: 5 mW

Cirka Pris: 7000 SEK

Typ av ljus: Koherent

Fördelar: Inbyggd linjeoptik. Liten, kompakt och robust. Mycket lätthanterad. Ger ganska smal linje (ca 100 μ m linjebredd) samt relativt hög intensitet.

Nackdelar: Kostar lite mer än en vanlig diodlaser.

Övrigt: Troligtvis det lämpligaste alternativet om ljuskällan ska användas i en riktig mynträknarmaskin.

- **Diodlaser**

Effekt: 4 mW

Cirka Pris: 5-700 SEK

Typ av ljus: Koherent

Fördelar: Ger smal och fin laserlinje. Liten storlek.

Nackdelar: Kräver speciell strömtillförsel. Har relativt kort livslängd.

Övrigt: Smidig ljuskälla. Kan lätt integreras i ett större system.

- **Lysdiod**

Effekt: 1 mW

Cirka Pris: 0.50 SEK

Typ av ljus: Inkoherent

Fördelar: Mycket billig och liten. Enkel funktion.

Nackdelar: Dålig ljusintensitet. Problem med att kollimera strålen.

- **Lysdiod med riktad stråle**

Effekt: ca 1-2 mW

Cirka Pris: 0.50-2 SEK

Typ av ljus: Inkoherent

Fördelar: Som ovan fast med lite högre intensitet i strålen.

Nackdelar: Samma som ovan.

- **Xenon - lampa**

Effekt: ca 1 kW

Cirka Pris: okänt

Typ av ljus: Inkoherent

Fördelar: Ger tillräcklig intensitet.

Nackdelar: Stor och klumpig. Svårt att kollimera ljuset samt att fokusera det till en smal linje. Ger dessutom UV-strålning.

Övrigt: Det fokuserade ljuset kan antända brännbara saker som papper m m. Dåligt alternativ.

- **Glödlampa (Philips)**

Effekt: 60 W

Cirka Pris: 5 SEK

Typ av ljus: Inkoherent

Fördelar: Enkel att få tag på (finns i ICA-butiken).

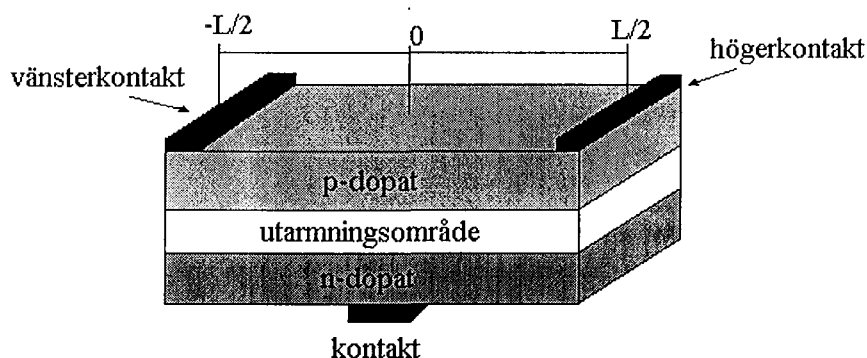
Nackdelar: Avger värme. Svårt att kollimera. Kort livstid.

Övrigt: Dåligt alternativ.

6. Detektorer

6.1 PSD (Position Sensitive Device)

En endimensionell PSD består av en strimla av ett p- och ett n-dopat halvledarskikt ovanpå varandra (se figur 10). I varje ände av strimlan sitter en elektrod kopplad till yttre elektronik. Om en backspänning lägges mellan skikten (d v s högre potential till det n-dopade lagret än till det p-dopade) så uppstår ett utarmningsområde i gränsytan mellan n- och p-skiktet. I utarmningsområdet saknas det fria laddningsbärare men däremot finns det orörliga rymdladdningar i form av joniserade donatorer och acceptorer i n-delen respektive p-delen av utarmningsområdet. När en foton sedan träffar sensorytan bildas det elektron-hålpar genom fotoelektrisk effekt. Det faktum att fria laddningsbärare skapas där fotonerna träffar minskar utarmningsområdets tjocklek lokalt. Elektron-hålparen rör sig sedan i det elektriska fält som finns i utarmningsområdet p g a de fasta rymdladdningarna och den pålagda spänningen. På så sätt genereras en ström genom kontakterna. Beroende på hur nära de två kontakterna detta sker blir strömmen olika stor genom dem.⁶ Detta fenomen kallas lateral fotoeffekt och beskrivs matematiskt av den s k Lucovsky-ekvationen.



Figur 10. PSD-strimlans uppbyggnad

Om denna löses med gällande randvillkor (vilket vi inte går närmare in på här) så fås lösningar av typen:

$$I_1 = I_{totalfotoström} \cdot \frac{\sinh(\alpha_0(L-x))}{\sinh(\alpha_0 L)} \quad (I_1 = \text{strömmen genom vänstra kontakten}) \quad (10)$$

där α_0 är Lucovskys laterala "fall-off parameter" (se referens 6 för mer detaljer om hur denna definieras), L är strimlans längd och x ljusfläckens läge. Under förutsättning att en backspänning läggs på pn-övergången, så kan värdet på α_0 närma sig noll och då kan ekvation (10) skrivas om till:

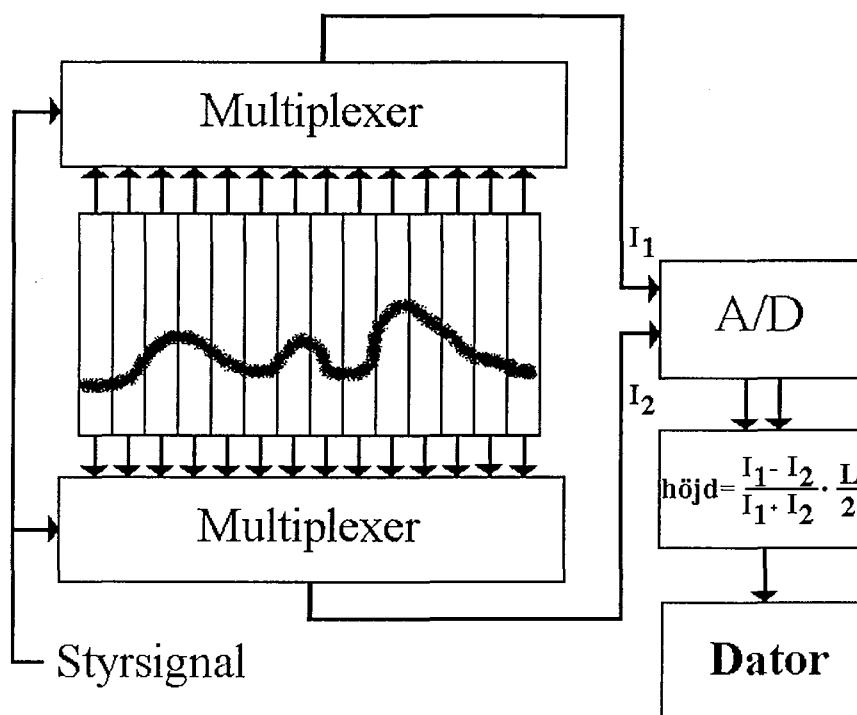
$$I_1 = I_{totalfotoström} \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right) \quad (11)$$

Strömmen genom den högra kontakten kan härledas på analogt sätt och från dessa två strömmar kan ljusfläckens läge på strimlan bestämmas:

$$x = \frac{L(I_1 - I_2)}{2(I_1 + I_2)} \quad (12)$$

där L är strimlans längd, I_1 och I_2 är strömmarna ut från de båda respektive elektroderna på strimlan.

Om man ska använda PSD-baserad teknik i optisk triangulering av mynt, så behöver man lämpligtvis en hel array med endimensionella PSD-strimlor. Genom att multiplexa strimlornas ut signaler till en AD-omvandlare så kan man snabbt mäta bildens höjdvariation. Ett tänkbart förslag på en sådan konstruktion kan beskådas i figur 11 nedan.



Figur 11. Ett tänkbart trianguleringsystem baserat på en PSD-array.

Fördelen med en sådan här sensor är att den är mycket snabb. Nackdelen är att den troligtvis är mycket dyr men framförallt det faktum att den inte finns tillgänglig än (åtminstone inte med tillräckligt många strimlor). Forskare i Nederländerna håller på med att ta fram en kommersiell sensor baserad på sådan teknologi. Sensorn ska vara avsedd just för optiskt triangulering vilket hade gjort den idealisk för vår applikation. Tyvärr tar det nog ett tag innan de blir färdiga.

En annan nackdel är att utsignalen beror på summan av de två strömmarna och då även av den instrålade intensiteten vilket kan vara en nackdel i vårt fall då olika myntmetaller ger olika starka reflexer.

Eftersom detektorn beräknar en slags tyngdpunkt av totala ljusintensiteten som infaller mot sensorytan istället för bara läget hos den ljusstarkaste fläcken, så är det viktigt att eliminera brus eller oönskade reflexer med hög intensitet som annars kan påverka noggrannheten i mätningen.

6.2 CCD-baserade sensorer

En CCD-kamera är uppbyggd av $N \times M$ sensorelement som lagrar elektriska laddningar. Laddningens storlek beror på ljusintensiteten som infaller mot sensorelementet. Fördelen med CCD-kameror är främst att de kan ha hög upplösning och att det finns ett brett utbud på marknaden. Nackdelarna är att utläsningen av sensorelementen blir relativt långsam eftersom alla pixlar läses ut sekventiellt.

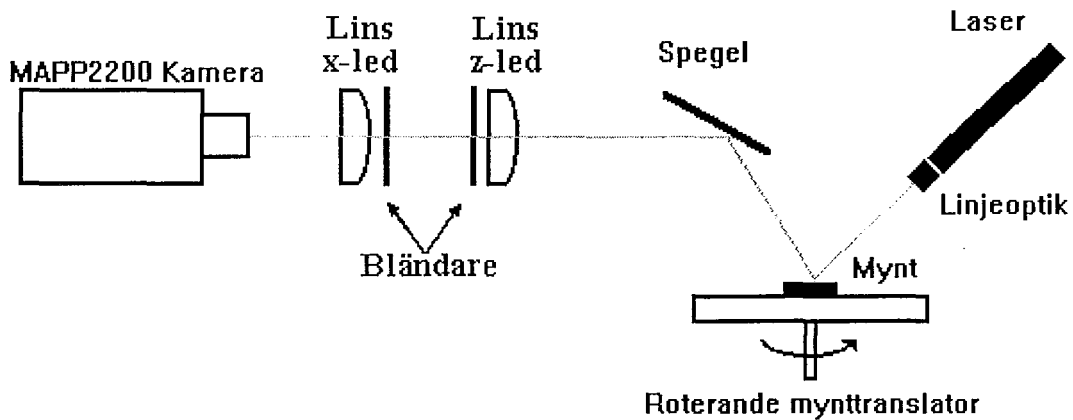
6.3 CMOS-baserade sensorer

CMOS-baserade bildsensorer har fördelen att själva sensorytan kan integreras med kringelektronik och processorer för bildbehandling. Detta gör att mycket snabba sensorer kan tillverkas. Ofta kan dessa sensorer programmeras på så sätt att t ex upplösningen och antalet grånivåer kan justeras för att öka prestandan. Om utläsningen av sensorelementen parallelliseras med ett stort antal AD-omvandlare och om processorerna arbetar med s k SIMD-arkitektur (Single Instruction Multiple Data stream) så kan mycket högre hastigheter uppnås än med t ex CCD-kameror.

Man kan utföra en hel del olika former av datareducering och bildbehandling direkt på sensorchipet s k NSIP (Near Sensor Image Processing). Till exempel kan man utföra morfologiska operationer och filtreringar direkt i spatialplanet. Bildsensorer där sådana operationer kan utföras brukar benämnas smarta bildsensorer.⁷ Nackdelen med sensorerna är deras höga pris.

7. Vår uppställning

Den mätuppställning som vi har arbetat med beskrivs schematiskt i figur 12:

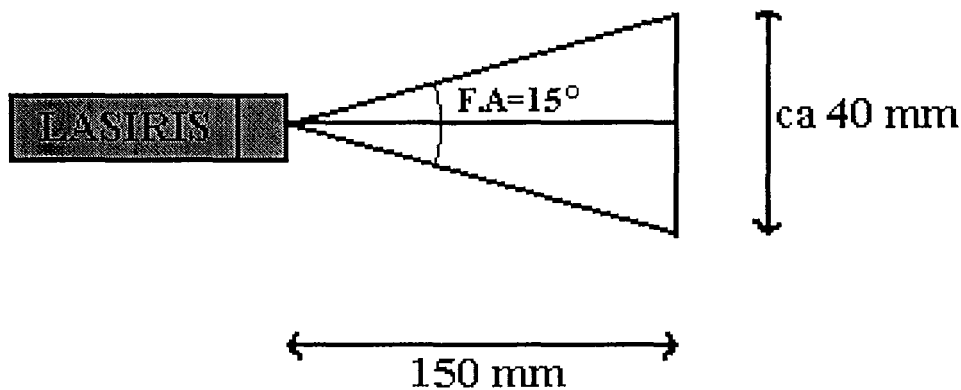


Figur 12. Principskiss över mätuppställningen.

7.1 Ljuskällan

Som ljuskälla valde vi att använda en lasermodul av fabrikat Lasiris modell SNF-501L, med våglängden 635 nm och 5 mW effekt. Själva modulen kombinerar en laserdiod med en patenterad linjeoptik som ger en icke-gaussisk intensitetsfördelning i linjens längdled. Fördelen med detta är att man får en jämnare intensitet hos laserlinjen. Lasermodulen är inställd för att ha optimalt fokus (linjetjocklek ca 80-90 μm) på ett avstånd av 150 mm, men detta kan justeras med en speciell nyckel. Spridningsvinkeln hos ljuset i linjens längdled (eng. fan angle) är 15° , vilket ger en ca 40 mm lång laserlinje på 150 mm avstånd. Detta illustreras i figur 13.

Under arbetets gång kom vi på att laserlinjens tjocklek skulle behöva minskas ytterligare. För att åstadkomma detta placerade vi en cylinderlins med brännvidd $f=75$ mm mellan lasermodulen och myntet.



Figur 13. Laserljusets geometriska utbredning från lasermodulen.

7.2 Mynttranslatorn

För att förflytta mynten genom vår laserlinje använder vi en sönderplockad mynträknarmaskin modell SC3003 försedd med en likströmsmotor samt en takometer. Vi utnyttjar då den roterande skivan hos maskinen till detta. För att få en mindre krökt rörelse hos myntet har vi försett mynttranslatorn med en skiva med större diameter. Mynten placeras sedan på denna. Hastigheten hos mynten regleras med en spänningskälla kopplad till likströmsmotorn. Positionen hos skivan kan mätas med takometern, som ger pulser med en frekvens beroende på rotationshastigheten. På varje helt varv som skivan roterar ger takometern ca 11200 pulser. Dessa pulser kan sedan registreras med ett instickskort i datorn, som i vårt fall kallas PC-14B.

För att inläsningen av myntets höjdstruktur ska bli optimal, är det av yttersta vikt att myntet rör sig med en jämn och kontinuerlig rörelse. Det är också viktigt att det inte är dynamisk obalans i den roterande skivan. Eftersom myntet passerar sensorn längs en cirkelrörelse så kommer myntet att samplas oftare längs innerkanten än ytterkanten. Detta kan få till följd att myntbilden blir något päronformad. För att få bukt med detta problem vid själva identifieringen så skulle man (om man använder histogrammetoden) kunna multiplicera höjdvärdet i varje pixel med en faktor r/R , där r är avståndet mellan pixelelementet och rotationscentrum och R är avståndet mellan den yttersta myntkanten och rotationscentrum. Myntbilden kommer i och för sig fortfarande att vara ”päronformad” men histogramvärdena kommer att kompenseras för fenomenet. En nackdel med att vikta höjdvärdena på detta sättet är att histogramvärdena måste uttryckas som reella tal istället för heltal, vilket kan medföra något tyngre beräkningar.

7.3 Sensorsystemet

7.3.1 Optik

För att få bättre dynamik i avbildningen använde vi två cylinderlinser mellan myntet och bildsensorn. Vi använde också en spegel för att vinkla ner den optiska axeln mot horisontalplanet. Eftersom det område vi ska avbilda, dvs det område som den krökta ljuslinjen upptar, har de ungefärliga dimensionerna 30 mm x 2 mm och sensorytan är ca 8 mm x 8 mm så behöver vi förminska bilden i x-led och förstora den i z-led (höjddled). Vi använder även två bländare för att minska diffraktionen och öka upplösningen samt en kartongstrut vid kameran för att förbättra signal-brusförhållandet. Vi täckte även över hela detektoroptiken (dvs lins och bländare) med kartonglådor så att bakgrundsljuset inte påverkade bildkvalitén.

Lateralförstoringen M_T för en avbildning⁸ med en lins ges av:

$$M_T = \frac{z_i}{z_o} = \frac{s_i}{s_o} \quad (13)$$

där z_o = objektets höjdförskjutning

s_o = avståndet mellan lins och objekt (objektavståndet)

z_i = bildens höjdförskjutning

s_i = avståndet mellan lins och sensorytan (bildavståndet)

Det är således förhållandet mellan bild- och objektavstånden som påverkar lateralförstoringen.

För att vi ska få en avbildning av den krökta laserlinjen på myntet krävs det dock att objekt- och bildavstånd för linserna är sådana att de uppfyller Gauss linsformel:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} \quad (14)$$

där f är linsens brännvidd.

Eftersom båda linserna ska ge en skarp bild på sensorytan får vi ett krav på att summan av objekt- och bildavstånd skall vara konstant, d v s:

$$s_{o,x} + s_{i,x} = s_{o,z} + s_{i,z} = L \quad (15)$$

där L är det konstanta avståndet mellan mynt och sensoryta.

Under arbetets gång använde vi främst två cylindriska linser med brännvidderna $f_x=150$ mm och $f_z=250$ mm. Avstånden för dessa är:

$$s_{o,x} = 1270 \text{ mm}, s_{i,x} = 330 \text{ mm}, s_{o,z} = 170 \text{ mm}, s_{i,z} = 1430 \text{ mm}$$

Detta medförde en lateralförstoring på $M_{T,x} = 0.26$ och $M_{T,z} = 8.41$.

För att ändra höjdsutslaget kan man även variera infalls- och observationsvinkeln mot myntet. Detta påverkar även graden av det tidigare nämnda ocklusionsfenomenet. Större infallsvinkel ger mer laserocklusion och större observationsvinkel ger mer kameraocklusion.

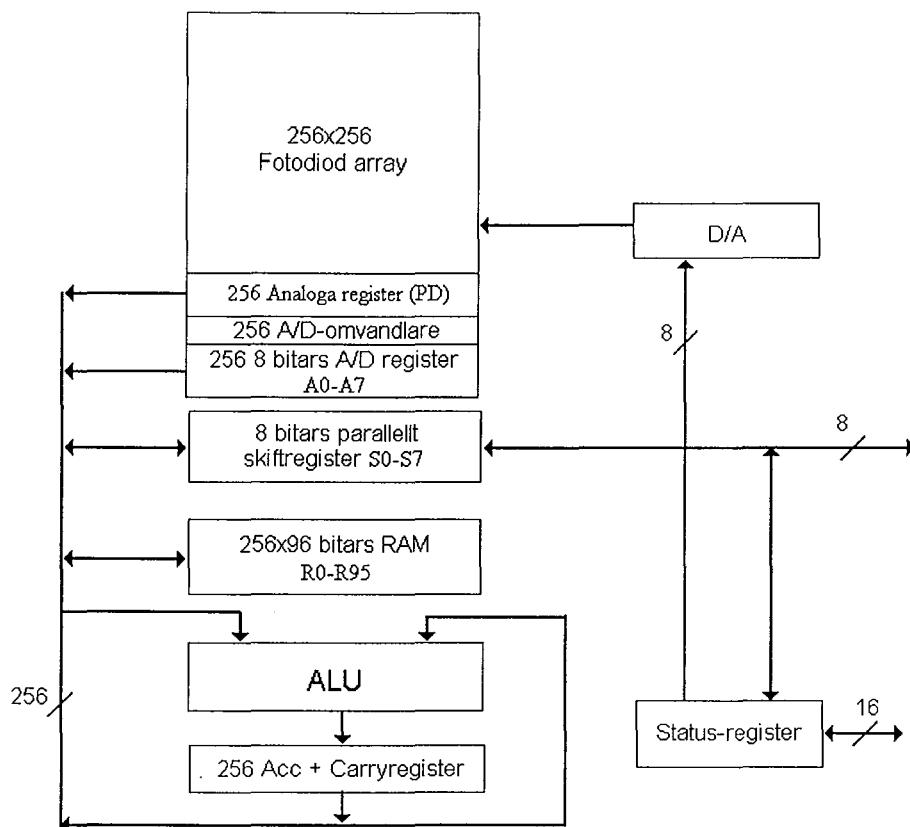
Om infalls- och observationvinkeln är lika stora får vi direktreflexer rakt in i kameran vilket inte är önskvärt eftersom det då uppkommer mer speckelmönster på sensorytan. Då differensen mellan vinklarna ökar minskar specklets inverkan men även intensiteten. Man får alltså kompromissa för att uppnå bäst resultat.

Avståndet mellan kameran och myntet påverkar även intensiteten hos den detekterade linjen eftersom intensiteten hos det från myntet spridda ljuset minskar med kvadraten på avståndet. Om man har för kort avstånd mellan kamera och mynt kan det dock bli praktiska problem med placering av linser och bländare.

7.3.2 Bildsensorn MAPP2200

Vi använder oss av ett MAPP2200 ISA Smart Vision System, som tillverkas och säljs av Integrated Vision Products (IVP) i Linköping. Detta kamerasystem består förutom själva kameran även av ett instickskort till datorn. Kameran har en upplösning på 256x256 pixels och arbetar med 256 parallella processorer (en för varje kolumn av sensorelement). Dess digitala konstruktion är uppbyggd enligt den tidigare nämnda SIMD-arkitekturen (Single Instruction Multiple Data stream) vilket gör att den lämpar sig väl för NSIP (Near Sensor Image Processing).

Kameran matas med instruktioner från det i datorn exekverande programmet och man kan göra diverse olika bildbehandlingsoperationer. Själva kameran kan man skriva mycket om. Vi ska bara i all enkelhet förklara dess uppbyggnad och möjligheter. I figur 14 nedan syns strukturen hos MAPP2200.



Figur 14. Kretskortsarkitekturen hos en MAPP2200.

Sensorn läses ur radvis till ett analogt register (PD-registret). Innehållet i PD-registret kan sedan AD-omvandlas och resultatet lagras i register A0-A7. Antalet bitar i AD-omvandlingen kan väljas mellan 1 och 8 bitar.

Ett särskilt skiftregister, S0-S7, finns för att kunna förflytta data internt eller externt. Skiftregistret kan läsas och skrivas via en 8-bitars dataport.

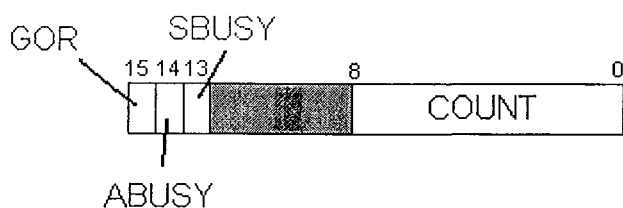
Dessutom finns ett generellt dataregister, R0-R95, för att kunna lagra undan information och mellanresultat i beräkningar.

På chipet finns även en ALU (aritmetisk logisk enhet) där olika logiska operationer kan utföras t ex addition och invertering men även större sammansatta operationer så som filtrering och kantdetektion.

ALU:n består av GLU, NLU, PLU, Acc (ackumulatorn) och C (carry). GLU:n hanterar globala beräkningar på hela sensorraden. NLU:n gör beräkningar på grupper av tre närliggande sensorelement och PLU:n gör beräkningar på enskilda sensorelement.

Via en 16-bitars instruktionsport skickas kommandon till bildsensorn och man kan även läsa innehållet i ett statusregister som innehåller statusbitarna SBUSY, ABUSY, GOR samt ett 9-bitars register COUNT. SBUSY och ABUSY anger om skiftregistret och AD-

omvandlaren är upptaget med förflytta data respektive AD-omvandla data. GOR anger om någon bit i ackumulatorn är satt till ett. Värdet hos COUNT anger hur många bitar i ackumulatorn som är satta till ett. Nedan följer en bild på statusregistret:

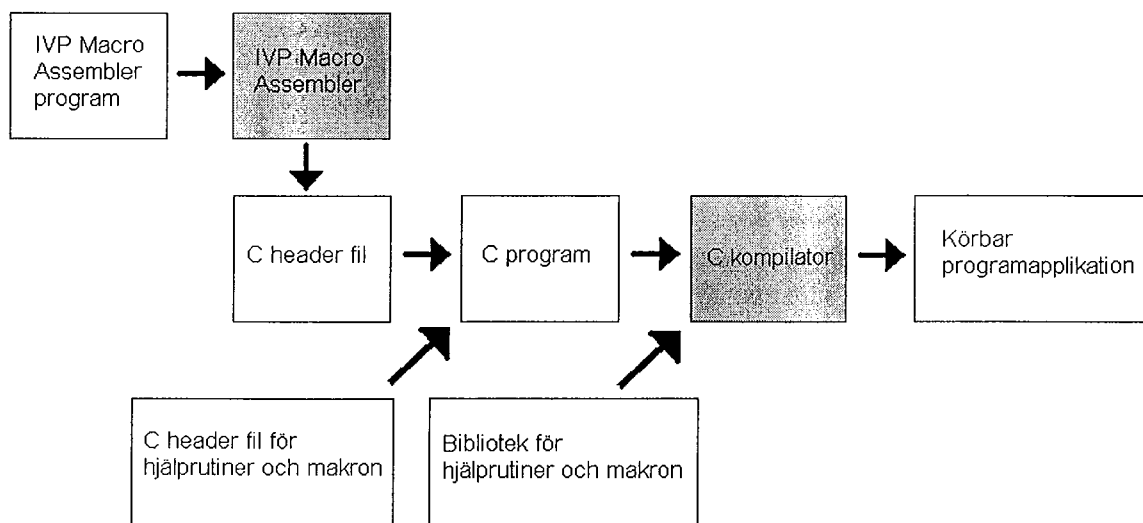


Figur 15. Statusregistret hos MAPP2200.

7.3.3 PC med instickskort och programvara

Datorn vi har använt är en Pentium 133 MHz PC med instickskort för att kunna kommunicera med MAPP2200-kameran och takometern. Själva mjukvaran utvecklades med hjälp av Borland Turbo C v2.0 och program som IVP har utvecklat specifikt för MAPP2200-systemet.

Ett flödesschema för hur mjukvaran är uppbyggd finns att beskåda i figur 16.

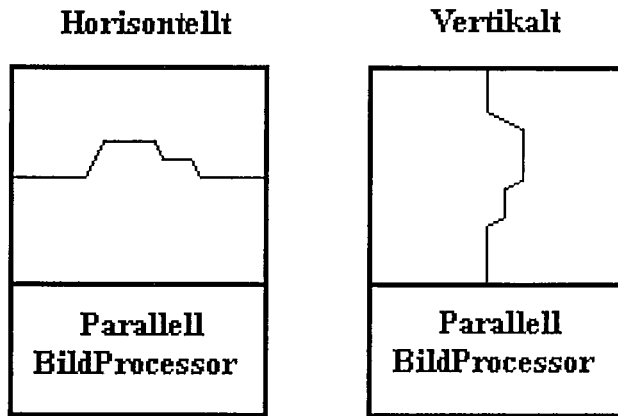


Figur 16. Flödesschema för programuppbyggnaden i en MAPP2200 applikation.

Assemblerkoden skrivs i en speciell fil med instruktioner till sensorn som assembleras med ett program, IVPASM, till en header-fil som senare länkas in i C-koden tillsammans med IVP:s egna header-filer och biblioteksrutiner.

7.3.4 Vertikal respektive horisontell optisk triangulering:

Bildsensorn MAPP2200 fungerar så att en hel sensorrad läses ut åt gången och behandlingen av de 256 intensitetsvärdena görs parallellt. Beroende på om laserlinjen ligger vertikalt eller horisontellt på sensorytan så kan olika typer av algoritmer utnyttjas.¹



Figur 17. Två sätt att orientera laserlinjen på sensorytan.

Vid horisontell triangulering utnyttjar man de 256 parallella processorerna oberoende av varandra. Intensiteten hos varje pixel jämförs med de andra pixlarna i kolumnen så att man hittar linjens position i kolumnen. Varje processor svarar således mot en egen sensorkolumn och hittar sitt eget höjdvärde parallellt med de övriga.

Vid vertikal triangulering, som lättast utförs genom att helt enkelt rotera kameran 90°, utnyttjar man kameran som en 256 bitars processor för att hitta höjdvärdet i den aktuella sensorraden. Sedan går man igenom alla sensorrader tills hela relieflinjens höjdvärden har lästs in. I vårt arbete har vi nästan uteslutande arbetat med vertikal triangulering eftersom detta förfaringssätt har det gjort det lättare att konstruera effektiva algoritmer.

7.3.5 Algoritmer för att läsa ut höjdvärden

I de följande algoritmerna kommer orden vertikal respektive horisontell att avse om metoden ska utföras med vertikal- eller horisontell optisk triangulering.

Vertikal tröskling:

Denna algoritm bygger på att intensiteten hos varje pixelelement i den avlästa sensorraden jämförs med ett tröskelvärde. Detta tröskelvärde skall då väljas så att endast de pixlar som är belysta av laserlinjen kommer över tröskeln.

Vi har provat två varianter: Den första skrevs huvudsakligen i C-kod där den första pixeln vars intensitet kom över tröskelnivån togs som positionen för laserlinjen. Följande funktion returnerar höjdvärdet för en avläst sensorrad:

```

uint Get_Height_Thresholding(WORD threshval)
{
    unsigned integer kol = 0;
    LINE sensor_row;
    storesreg(sensor_row);      /* Läser in intensitetsvärdena hos en */
                                /* hel sensorrad från S0-S7          */
    while (kol<256) {
        if (sensor_row[kol]>threshval) {
            return kol;
        }
        else
            kol++;
    }
    return 0;
}

```

Den del av koden som skrevs i IVP-ASM-kod hade endast till uppgift att förflytta den AD-omvandlade ljusintensiteten för alla pixlar i sensorraden till skiftregistret. I korthet utförs detta av följande programkod:

```

READPD          ; Läser in aktuell sensorrad till det analoga registret
INITAD          ; Startar AD-omvandlingen
ITER (8 i)      ; Loopar 8 gånger
    ST A(0 i),S(0 i) ; Flyttar A0-A7 till S0-S7
ENDI

```

Den andra varianten skrevs främst i IVP:s macroassembler och höjdvärdet beräknas därför i kameran istället för i datorn som i förra fallet. Denna andra variant visade sig senare vara mycket överlägsen i fråga om hastighet och enkelhet.

I IVP-ASM-kod kan händelseförloppet skrivas på följande sätt:

```

READPD          ; Läser in aktuell sensorrad till det analoga registret
INITAD          ; Startar AD-omvandlingen
LD A5           ; Laddar ackumulatormed värdet i den 6:e biten
REDGE A         ; Detekterar laserlinjens högra kant
RFILL A         ; Sätter alla bitar fram till laserlinjens högra kant till ett

```

Värdet hos variabeln COUNT i statusregistret ger sedan antalet bitar som är satta till ett i ackumulatorm. Höjdvärdet fås således genom att läsa av COUNT.

Vertikal tyngdpunktsberäkning:

Här beräknas tyngdpunkten hos det inkommande ljuset för varje avläst sensorrad enligt följande formel:

$$x_C = \frac{\sum_{k=0}^{255} x_k \cdot I_k}{\sum_{k=0}^{255} I_k} \quad (16)$$

där x_k och I_k betecknar kolumnvärdet respektive intensiteten hos det enskilda pixelelementet. Höjdvärdet sätts sedan till x_C . Motsvarande funktion för höjdvärdesinläsningen blir då:

```
uint Get_Height_CenterOfGravity(WORD threshval)
{
    uint kol,sum1, sum2;
    sum1=0;
    sum2=0;
    LINE Sensor_Row; /* Definierar en vektor Sensor_Row med 256 element */
    storesreg(Sensor_Row);

    for (kol=0;kol<256;kol++) {
        if (Sensor_Row[kol]>threshval) {
            sum1=sum1+ Sensor_Row[kol]*kol;
            sum2=sum2+ Sensor_Row[kol];
        }
    }
    if (sum2 ==0) /* Kontrollerar att vi inte delar med noll */
        return 0;
    else
        return (sum1/sum2);
}
```

Vertikal beräkning av pixel med maximal intensitet:

Här jämförs intensitetsvärdet hos varje pixel med den hittills största intensiteten, tills hela sensorraden har bearbetats. Positionen hos denna maxintensitetspixel blir höjdvärdet. Programkoden kan då skrivas:

```
uint Get_Height_MaxIntensity(WORD threshval)
{
    unsigned integer kol,kolmax,Imax;
    kolmax=0;
    Imax=threshval;
    LINE Sensor_Row;
    storesreg(Sensor_Row);
```

```

for (kol=0;kol<256;kol++) {
    if (Sensor_Row[kol]>Imax) {
        Imax= Sensor_Row[kol];
        kolmax=kol;
    }
}
return (kolmax);
}

```

7.3.6 Upplösningen hos sensorsystemet

För att veta hur små detaljer på myntet som kan upplösas är det viktigt att känna till upplösningen hos sensorsystemet. När vi i detta kapitlet pratar om x-, y- och z-led så är x-led parallellt med laserlinjens längdriktning och z-led höjded i den tredimensionella bilden av myntet.

I x-led beror upplösningen på antalet pixels sensor har i den leden samt vilken förstoring (förminskning) vi har i x-led.

Idealt sett så borde upplösningen kunna gå ner till enskilda pixel på sensorn och detta skulle då motsvara en upplösning i x-led på myntet:

$$\Delta x = \frac{\text{pixelpitch}}{M_{T,x}} \quad (17)$$

där pixelpitchen är den bredd som ett sensorelement har i x-led.

I vårt fall så har MAPP2200 en pixelpitch på 32 μm . Vi använder en optisk uppställning som ger $M_{T,x}=0.26$. Vi får då:

$$\Delta x = 123.1 \mu\text{m}$$

I y-led är det mer komplicerat eftersom upplösningen här påverkas av hur snabbt vi kan sampla relieflinjer hos myntet. Samplingshastigheten påverkas i sin tur av algoritmens snabbhet alternativt hur snabb dator som programmet körs på. Myntens hastighet och laserlinjens tjocklek påverkar också upplösningen.

När man ska identifiera mynten måste man troligtvis ha samma upplösning i x- och y-led om identifieringen ska vara rotationsinvariant. I vår mätuppställning regleras upplösningen i y-led främst genom att ändra spänningen till motorn som driver mynttranslatoren.

Hastigheten hos mynten kan enkelt beräknas utifrån kännedom om samplingsfrekvensen för relieflinjer och Δy .

Upplösningen i y-led är $\Delta y = \Delta x = 123.1 \mu\text{m}$ och samplingsfrekvensen är ca 200 relieflinjer/sekund. Mynthastigheten bör då vara:

$$v_{\text{mynt}} = f_{\text{relief}} \cdot \Delta y = 200 \text{ relieflinjer / s} \cdot 123.1 \mu\text{m} = 2.46 \text{ cm / s} \quad (18)$$

Detta är ingen direkt överväldigande hastighet, men det hänger ihop med att det är så små strukturer som ska avbildas. Man kan jämföra med det fall att mynthastigheten är ca 4 m/s. Med samma upplösning behövs då en samplingsfrekvens på 32 500 reliefniner/sekund eller 8.3 miljoner pixels/sekund med 256 pixels/reliefniner. Detta är uppenbarligen en mycket hög samplingsfrekvens, som troligtvis är omöjlig att uppnå även med dagens mest sofistikerade teknik.

I z-led (höjddled) påverkas upplösningen av infalls- och observationsvinklarna α_i respektive α_o . Förstoringen i höjddled och pixelpitchen i höjddled påverkar också.

I vårt fall har vi en förstoring i höjddled på $M_{T,z}=8.41$, $\alpha_i=22^\circ$ och $\alpha_o=32^\circ$. Med hjälp av ekvation (37) kan vi beräkna hur stor verklig höjdförskjutning på myntet en pixel på sensorytan motsvarar:

$$\Delta z = \frac{\text{pixelpitch}}{M_{T,z}} \cdot \frac{\cos \alpha_i}{\sin(\alpha_i + \alpha_o)} = \frac{32 \mu\text{m}}{8.41} \cdot \frac{\cos 22^\circ}{\sin 54^\circ} = 4.36 \mu\text{m} \quad (19)$$

I ovanstående beräkningar av upplösningen har vi antagit att vi kan upplösa enskilda pixels på sensorytan. Det är emellertid en sanning med modifikation eftersom vi har inte har tagit med diffraktionen i våra beräkningar.

7.3.7 Diffraktion och avbildningsfel (aberrationer)

I alla optiska system förekommer oönskad diffraktion i större eller mindre omfattning. Ljusets diffraktion är det fenomen som ställer de yttersta begränsningarna på upplösningen hos optiska system. Man kan t ex aldrig avbildas en punktformig ljuskälla till en godtyckligt liten bildpunkt. Det är också detta som gör att det krävs korta våglängder för att upplösa riktigt små detaljer (jfr svepelektronmikroskop).

Gauss linsformel bygger på den så kallade paraxiella approximationen, vilket innebär att man antar att ljusstrålarna färdas nästan parallellt med den optiska axeln hos linserna.

Approximationen innebär bl a att förenklingar av typen

$$\sin \theta = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} - \frac{\theta^7}{7!} + \dots \approx \theta \quad (20)$$

görs.

Den minsta diameter en ljusfläck kan ha på sensorn begränsas av diffraktionen. Denna diameter ges då av sambandet:

$$d_d = \frac{2 \cdot 1.22 \cdot \lambda}{D} \cdot s_i \quad (21)$$

där λ är ljusets våglängd, D är aperturans diameter och s_i är bildavståndet för linsen.

När tredje ordningens termer tas med i beräkningarna får man korrektionstermer som kallas aberrationer. Den allmänt viktigaste av dessa är den så kallade sfäriska aberrationen.

Bidraget från denna ges av uttrycket

$$d_a = K(n) \cdot \left(\frac{D}{f} \right)^3 \cdot s_i \quad (22)$$

där f är linsens fokallängd och $K(n)$ är en funktion som beror av linsens form och brytningsindex. Exempel på $K(n)$ för olika typer av linser följer nedan.

Symmetrisk positiv sfärisk lins:

$$1:1 \text{ avbildning } (s_i=2f) \quad K(n) = \frac{1}{128} \cdot \left(\frac{n}{n-1} \right)^2 \quad (23)$$

$$s_o \text{ eller } s_i \text{ oändligt} \quad K(n) = \frac{1}{32(n-1)^2} \cdot \left(n^2 - n - \frac{1}{4} + \frac{1}{2n} \right) \quad (24)$$

Plano-konvex lins:

s_o eller s_i oändligt

$$\text{krökta ytan vänd mot plana vågfronten} \quad K(n) = \frac{1}{32(n-1)^2} \cdot \left(n^2 - 2n + \frac{2}{n} \right) \quad (25)$$

Som vi kan se så bygger dessa formler på vissa antaganden om att antingen objekt- eller bildavståndet är oändligt, så det blir naturligtvis approximativa svar man får fram.

Den totala diametern hos en avbildad punktkälla blir då approximativt:

$$d_{TOT} = d_d + d_a \quad (26)$$

Den minsta totala diffraktionsdiametern får man genom att derivera d_{TOT} med avseende på D och sätta derivatan till noll. Den optimala diametern blir då

$$D_{opt} = \left(\frac{2 \cdot 1.22 \cdot \lambda \cdot f^3}{3 \cdot K(n)} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (27)$$

Vi beräknar den minsta diametern hos en avbildad punktkälla som ligger på den optiska axeln. Fokallängderna är $f_x=250$ mm respektive $f_z=150$ mm och båda linserna är plano-konvexa med brytningsindex $n=1.5$. Våglängden är $\lambda=635$ nm.

$K(n)$ för båda linserna beräknas enligt följande:

$$K(n=1.5) = \frac{1}{32(1.5-1)^2} \cdot \left(1.5^2 - 2 \cdot 1.5 + \frac{2}{1.5} \right) \approx 0.036$$

Den optimala aperturen för x- respektive z-led blir då:

$$D_{opt,x} = 21.7 \text{ mm}$$

$$D_{opt,z} = 15 \text{ mm}$$

Avståndet mellan mynt och sensoryta är $L=1600$ mm. Gauss linsformel ger att bildavstånden är $s_{i,x}=330$ mm respektive $s_{i,z}=1430$ mm.

Bidraget från 1:a ordningens diffraktion ges av ekvation (19) och blir:

$$d_{d,x} = \frac{2 \cdot 1.22 \cdot 635 \cdot 10^{-9}}{21.7 \cdot 10^{-3}} \cdot 330 \cdot 10^{-3} = 23.56 \mu m$$

respektive

$$d_{d,z} = \frac{2 \cdot 1.22 \cdot 635 \cdot 10^{-9}}{15 \cdot 10^{-3}} \cdot 1430 \cdot 10^{-3} = 147.7 \mu m$$

Bidraget från 3:e ordningens diffraktion (sfärisk aberration) ges av ekvation (22) blir:

$$d_{a,x} = 0.036 \cdot \left(\frac{21.7 \cdot 10^{-3}}{250 \cdot 10^{-3}} \right)^3 \cdot 330 \cdot 10^{-3} = 7.77 \mu m$$

och

$$d_{a,z} = 0.036 \cdot \left(\frac{15 \cdot 10^{-3}}{150 \cdot 10^{-3}} \right)^3 \cdot 1430 \cdot 10^{-3} = 51.5 \mu m$$

Vi noterar att 1:a ordningens diffraktionsbidrag blir helt dominerande i z-led.

Totala bidragen från diffraktion i x-led respektive z-led blir då:

$$d_{TOT,x} = 31.33 \mu m$$

$$d_{TOT,z} = 199.2 \mu m.$$

Vi kan beräkna hur stor höjdskillnad $d_{TOT,z}$ detta motsvarar på myntet:

$$\Delta z = \frac{d_{TOT,z}}{M_{T,z}} \cdot \frac{\cos \alpha_i}{\sin(\alpha_i + \alpha_o)} = 27.1 \mu m \quad (28)$$

Vi får alltså korrigera det tidigare uträknade värdet på höjdupplösningen som var $4.36 \mu m$ med det nya värdet som vi i fortsättningen kommer att betrakta som den faktiska höjdupplösningen.

I x-led så kommer diffraktionen att märkas mer eller mindre mycket beroende på vilken upplösning bildsensorn har, eller egentligen mer korrekt vilken pixelpitch sensorelementen har. Oftast har dock sensorer med höga upplösningar mindre pixelpitch eftersom sensorytorna annars skulle bli väldigt stora. I z-led så kommer förstoringen i höjddled att avgöra hur pass mycket diffraktionen påverkar vår bild. Vi kan säga att vi får problem med diffraktion om ett eller båda av följande villkor uppfylls:

$$d_{TOT,x} \approx \text{pixelpitch} \quad (29)$$

$$d_{TOT,z} \geq 0.10 \cdot d_{MAX,Z} \quad (30)$$

där $d_{MAX,Z}$ är maximala höjdsutslaget hos laserlinjen på själva sensorytan. Faktorn 0.10 är bara ett ungefärligt värde som har tagits som en slags tumregel. Inom mätteknik är det

brukligt att ha signal-brusförhållandet 10 som ett slags minimikrav och här kan vi betrakta diffraktionsbidraget som ett slags brus.

Med en bildsensor av typen MAPP2200 med 256x256 pixels upplösning och 32 μm pixelpitch så ser vi att villkor (29) är uppfyllt och därmed ligger vi i gränzonen för att kunna få mätbara fel av diffraktion i x-led.

När det gäller z-leden så kan vi beräkna för vilken förstoring vi kommer att få problem med diffraktionen i höjddled.

Vi vet att den minsta möjliga diametern hos en avbildad punktkälla ges av

$$d_{TOT,Z} = \frac{2 \cdot 1.22 \lambda}{D_{Z,OPT}} \cdot s_{i,z} + K(n) \cdot \left(\frac{D_{Z,OPT}}{f_z} \right)^3 \cdot s_{i,z} \quad (31)$$

där $D_{Z,OPT}$ är den framräknade optimala aperturen.

Vidare kan vi anta att ett maximalt höjdsutslag motsvarar ca 32 pixlars höjdskillnad på sensorytan, vilket ger oss $d_{MAX,Z}=1.024$ mm för en MAPP2200 bildsensor. Gränsvillkoret för diffraktionsproblem blir då

$$d_{TOT,Z} = 0.10 \cdot 1.024 \text{ mm} = 0.102 \text{ mm}$$

Löser vi ut $s_{i,z}$ och sätter in de tidigare framräknade värdena $D_{Z,OPT}=15$ mm , $K(n)=0.036$, $f_z=150$ mm och $\lambda=635$ nm får vi:

$$s_{i,z} = \frac{d_{TOT,Z}}{\frac{2 \cdot 1.22 \lambda}{D_{Z,OPT}} + K(n) \cdot \left(\frac{D_{Z,OPT}}{f_z} \right)^3} = \frac{0.102 \cdot 10^{-3}}{1.38968 \cdot 10^{-4}} = 736 \text{ mm} \quad (32)$$

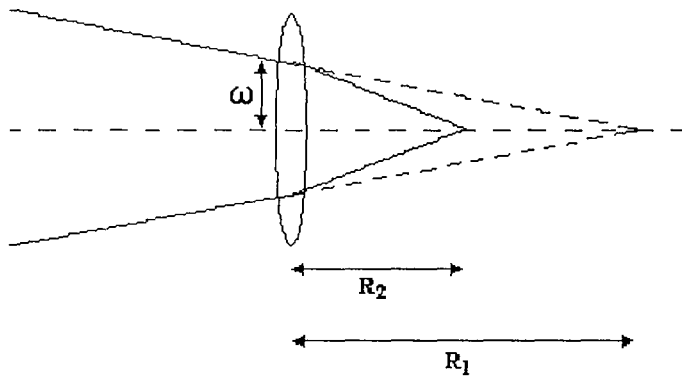
Gauss linsformel ger sedan objektavståndet $s_{o,z}=188$ mm, vilket motsvarar en förstoring i höjddled $M_{T,Z} = 3.9$ ggr. Vi kan alltså dra slutsatsen att diffraktionen kommer att påverka bildkvaliteten för redan ganska måttliga förstoringar.

7.3.8 Extra fokusering av laserlinjen

Under arbetets gång kom vi fram till att laserlinjen från lasermodulen inte var tillräckligt smal trots allt. Därför placerade vi en cylindrisk lens med brännvidden $f=75$ mm mellan lasermodulen och myntet. För att kunna beräkna var den teoretiskt smalaste linjen befinner sig använde vi följande formel:

$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_1} - \frac{1}{f} \quad (33)$$

där R_1 och R_2 är krökningsradierna för inkommande resp. utgående vågfront till linsen enligt bilden nedan.



Figur 18. Fokuseringen av laserlinjen

R_1 är alltså avståndet mellan linsen och punkten där lasermodulen har sitt fokus och R_2 är avståndet till det nya fokuset. R_1 och R_2 är negativa för konvergerande vågfronter. Vi ser att då R_1 minskar så minskar även R_2 . Den smalaste linjen man kan fokusera lasern till ges av följande formel:

$$\omega_0 = \frac{\lambda f}{\pi \cdot \omega} \quad (34)$$

där λ är ljusets våglängd och ω är strålens radie vid linsen. Här använder man sig av den s k paraxiella approximationen, d v s att ljuset rör sig parallellt med den optiska axeln. Så är det dock inte i vårt fall men vi använder den ändå enligt:

$$\omega_0 = \frac{\lambda \cdot |R_2|}{\pi \cdot \omega} \quad (35)$$

Vi noterar att om man ska ha smalt fokus så ska R_2 vara litet (kraftigt konvergent strålnippe). Enligt ekvation (33) så ska då R_1 också vara litet. Strålbreddens 2ω ökar linjärt med R_1 , vilket kan inses om man betraktar figur 18 ovan. Därför minskar ω ännu

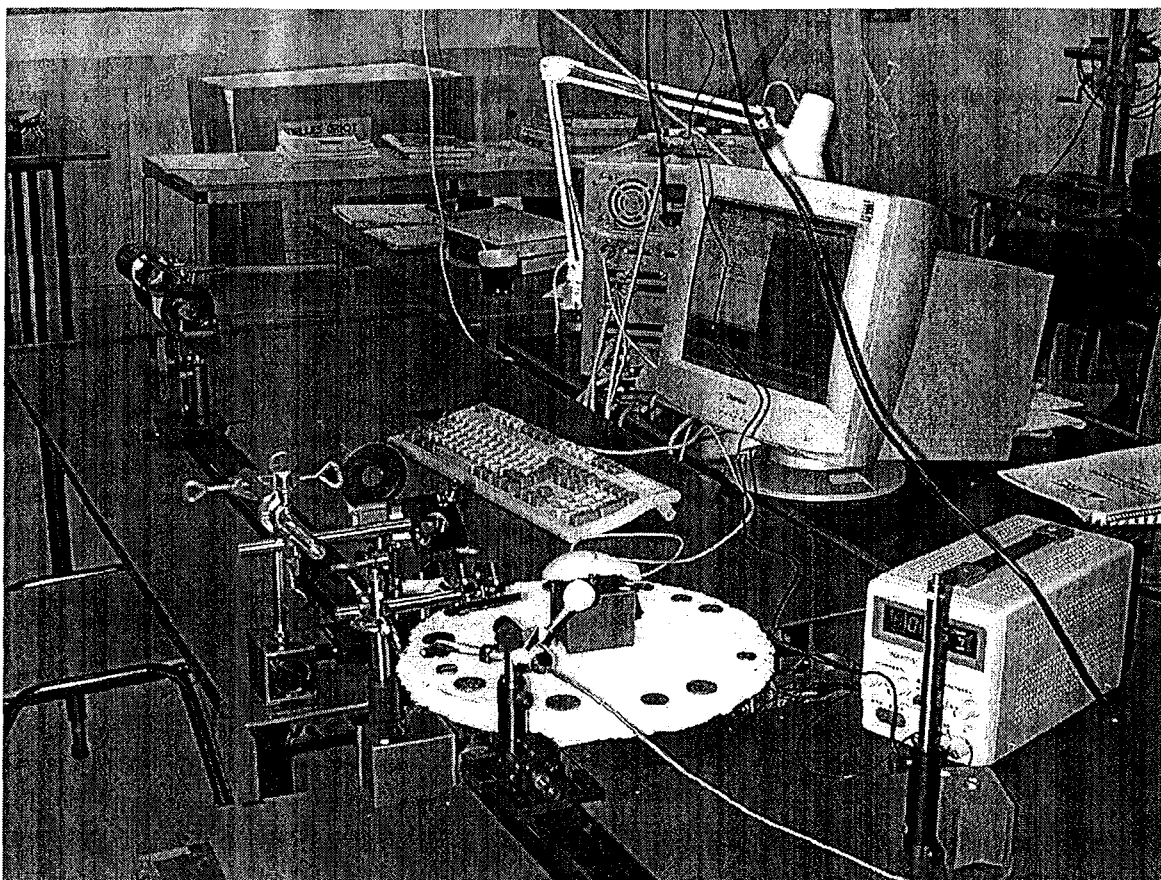
snabbare än R_2 då R_1 minskar. Teoretiskt ska således R_1 vara så stort som möjligt, d v s linsen så nära lasermodulen som möjligt för att få ett smalt fokus.

Problemet vi får är att det totala avståndet mellan lasermodul och mynt endast blir ca 50 mm vilket innebär att laserlinjens längd blir ca 1/3 av vad den var från början och man täcker endast in en liten del av myntet. Vi väljer därför att sätta linsen så långt från lasermodulen att vi precis täcker in myntet med laserlinjen. Avståndet mellan linsen och lasermodulen är då ca 75 mm och $R_1 = -75$ mm. Detta medför att $R_2 = -37.5$ mm.

Laserlinjens bredd vid linsen mättes då till $2\omega = 4$ mm. Insatt i ekvation (35) ger detta att $\omega_0 = 7.58 \mu\text{m}$. Laserstrålens bredd med denna extra lins är alltså ca $15 \mu\text{m}$ i fokus. Detta är det teoretiskt beräknade värdet men i verkligheten är linjen på detektorn inte enbart bestämd av fokusering, eftersom systemet främst begränsas av diffraktionen i detektor delen.

Nu har vi emellertid inte inkluderat tredje ordningens diffraktion enligt ekvation (22) men om vi räknar med denna kommer vi fram till att denna blir helt försumbar i sammanhanget.

8. Resultat



Figur 19. Vår prototyp (dock i ett tidigare stadium än det slutliga)

Resultatet av vårt examensarbete har utmynnat i denna rapport och prototypen vi har utvecklat. Prototypen klarar att läsa in mynt upp till en mynthastighet av ca 3-4 cm/s. Eftersom vi har valt att koncentrera oss på andra delar än själva myntidentifieringen, så är det svårt att säga hur pass bra en myntbild bör vara för att den ska gå att använda som underlag till identifiering av myntet.

Vi har dock gjort försök med att identifiera mynten utifrån deras histogram, där vi valde tyngdpunkten och variansen hos histogrammet som identifikationsparametrar. Rent visuellt kan man se karakteristiska strukturer hos histogrammen för olika sorters mynt, men tyvärr varierade tyngdpunkten och framförallt variansen för mycket för att man enkelt skulle kunna göra en automatiserad identifiering. Att tyngdpunkten varierar upp och ner beror förmodligen på att den roterande skivan inte sitter helt vinkelrätt mot den roterande axeln. Man bör därför sätta tyngdpunkten som en slags nollpunkt då man beräknar sina identifieringsparametrar. Istället för att titta på tyngdpunkten och variansen bör man troligtvis jämföra staplarnas höjd med referenshöjder. En bidragande orsak till att histogrammen vi har tittat på inte är helt rotationsinvarianta kan vara ocklusion. Detta problem kan dock botas genom att antingen använda flera ljuskällor eller flera kameror, vilket tyvärr innebär en ökad komplexitet i sensorsystemet.

Dessutom är det viktigt att tänka på att sensorsystemet kan vara känsligt för vibrationer i t ex bordet som komponenterna står på.

Denna vibrationskänslighet tycks öka med uppställningens geometriska utbredning. Med detta menar vi att ju längre avståndet är mellan mynt och kameran, desto mer påverkas laserlinjen på sensorytan. Tyvärr är det svårt att göra någon bra uppskattning eller kvantisering av vibrationskänsligheten utan att använda komplicerad utrustning eller avancerade mätmetoder som t ex holografisk interferometri. Dessutom skulle man behövt ha någon väldefinierad insignal så att man kan jämföra hur pass mycket laserlinjens utseende förändras

I appendix A finns ett axplock av myntbilder vi har erhållit med vår prototyp. Figur A1-A7 är tagna då linsförstoringen har valts sådan att så stora mynt som möjligt ska synas. Man måste då göra en avvägning mellan detaljnivå och avbildad myntyta.

Den första bilden, figur A1, avbildar ett relativt nytt engelskt 2-pundsmünt med ett motiv av drottning Elisabeth. Detta mynt är mycket detaljrikt, vilket gör det till en riktig utmaning om man vill ha med alla detaljer. De kraftiga utbuktningarna på drottningens haka är inte skägg utan de beror på kraftiga reflexer av laserljuset, vilket har orsakat en extra tjock detekterad laserlinje.

I den andra bilden, figur A2, så ser vi en vanlig svensk 5-krona. Detta mynt har som synes en mycket enklare höjdstruktur och därför syns i stort sett alla detaljer.

Figur A3 till A5 visar bilder av olika årgångars ryska 1-rubel mynt. Konturerna i figur A3 och A6 är relativt tydliga, vilket kan bero på att de har en större höjdskillnad i reliefen än t ex den i figur A5, där motivet av Lenin är lite suddigt.

I figur A7 ser vi att detaljnivån har offrats till förmån för större myntyta. Jämför man med figur A8 där en inzoomning har skett så kan man där upptäcka fler detaljer.

Vidare så kan vi se histogram för några olika mynt i figur A9 och A10.

Slutligen så kan vi i figur A11 se 4 histogram tagna av en svensk 5-krona roterad på 4 olika sätt. Vi kan notera att histogrammen huvudsakligen ser likadana ut (utom möjligtvis det nedre vänstra) vilket ger hopp om att man ska kunna göra en framtida identifiering baserad på histogrammetoden. Det är dock för tidigt att uttala sig om detta innan en mer grundlig undersökning av identifieringsalgoritmer har genomförts.

9. Tekniska data om sensorsystemet

Myntastighet: 2.5-4 cm/s

Maximal myntdiameter: ca 30 mm

Maximal höjdupplösning (z-led): 27 μm

Maximal upplösning i x-led: 123 μm

Maximal upplösning i y-led: 123 μm då $v_{\text{mynt}}=2.5 \text{ cm/s}$

Ingående linser:

Plano-konvex cylindrisk lins $f_x=250 \text{ mm}$

Plano-konvex cylindrisk lins $f_z=150 \text{ mm}$

Ingående bländare:

Rektangulär bländare placerad nära z-linsen med dimensionerna 40x5 mm

Cirkulär bländare placerad nära x-linsen med diametern 15 mm

Förstoring i x-led: $M_{t,x}=0.26$

Förstoring i höjddled (z-led): $M_{t,z}=8.41$

Avstånd mellan mynt och sensoryta: $L=1600 \text{ mm}$

$S_{o,x}=1270 \text{ mm}$, $S_{i,x}=330 \text{ mm}$

$S_{o,z}=170 \text{ mm}$, $S_{i,z}=1430 \text{ mm}$

Laserljusets infallsvinkel: $\alpha_i=22^\circ$

Kamerans observationsvinkel: $\alpha=32^\circ$

Avstånd mellan Lasermodulen och extra fokuseringslins: 75 mm

Avstånd mellan extra fokuseringslins och mynt: 37.5 mm

Lasermodulens effekt: ca 5 mW

Laserljusets spridningsvinkel (Fan Angle): 15°

Lasermodulens fokallängd (utan extra fokuseringslins): ca 150 mm

Laserlinjens bredd i fokus (utan extra fokuseringslins): ca 90 μm (Tillverkarens uppgift)

Laserlinjens bredd i fokus (med extra fokuseringslins): ca 15 μm

10. Systemdesign

Under arbetets gång har vi samlat på oss erfarenheter och lärt oss läxor som det kan vara lämpligt att dela med sig av. Detta kapitel är tänkt att sammanfatta dessa kunskaper.

Det första man bör bestämma är vilken lateralförstoring man önskar att cylinderlinsernas avbildning ska ha i x-led respektive z-led (höjdled).

Vi börjar med avbildningen i x-led.

För att ta reda på den önskade lateralförstoringen måste man i sin tur veta hur stora mynt som ska kunna detekteras. Maximala myntdiametern kallar vi D_{MAX} och sensorytans bredd betecknas b_{sensor} . Hela den belysta linjen på myntet ska få plats på sensorn, vilket ger oss kravet på att vi måste ha en förstoring i x-led som ges av:

$$M_{T,X} = \frac{b_{sensor}}{D_{MAX}} \quad (36)$$

Exempel:

MAPP2200 Smart Image Sensor med en pixelpitch på 32 μm och en upplösning på 256x256 pixlar. Största myntet är en svensk 5-krona med $D_{MAX}=27$ mm.

Vi får $b_{sensor}=256*32 \mu\text{m}=8.192$ mm och en förstoring på

$$M_{T,X} = \frac{8.192}{27} = 0.303 \text{ ggr}$$

Det motsvarar då drygt 3 gångers förminskning i x-led.

Avbildningen i z-led har som syfte att förstora höjdförskjutningen hos laserlinjen så att höjdstrukturen på myntet syns tydligt.

Här behöver vi veta hur stora höjdskillnader reliefmönstret på myntet har. Beroende på i vilken vinkel vi belyser och observerar myntet så kommer förskjutningen av laserlinjen att ändras. Vi inför följande storheter:

h_{MAX} = maximala höjdskillnaden på myntet

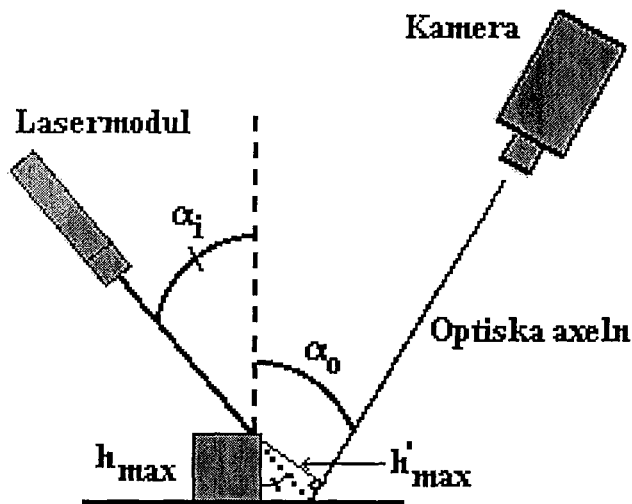
h_{MAX} = maximala observerade förskjutningen hos laserlinjen

α_i = laserljusets infallsvinkel mätt mot myntets normalvektor

α_o = kamerans observationsvinkel mätt mot myntets normalvektor

h_{sensor} = sensorytans höjd

I figur 20 nedan åskådliggörs situationen:



Figur 20. Definition av α_i och α_o .

Då laserlinjen ligger på den optiska axeln kommer ingen höjdskillnad att detekteras. Då höjden ändras kommer läget hos laserlinjen att förskjutas bort från optiska axeln. Storleken på den observerade förskjutningen är då h'_{MAX} .

Med hjälp av lite trigonometri får man ut följande samband:

$$h'_{MAX} = h_{MAX} \cdot \frac{\sin(\alpha_i + \alpha_o)}{\cos(\alpha_i)} \quad (37)$$

Vi kan notera att då $\alpha_i + \alpha_o = 90^\circ$, så kommer den observerade linjeförskjutningen att ligga parallellt med den faktiska linjeförskjutningen. När detta specialfall råder, säger man att det s k Scheimpflugvillkoret är uppfyllt. Om sensorytan på kameran är vinkelrät mot den optiska axeln så kommer avståndet mellan laserlinjen och sensorn alltid att vara konstant, vilket innebär att vi får skarpa bilder av laserlinjen för alla höjdnivåer hos myntet.

Exempel:

Mynten har en maximal höjdskillnad på $h_{MAX} = 0.5 \text{ mm}$. Laserljuset infaller med vinkeln $\alpha_i = 50^\circ$, kameran observerar från en vinkel $\alpha_o = 40^\circ$.

Den maximala observerade höjdskillnaden blir således

$$h'_{MAX} = 0.5 \text{ mm} \times \frac{\sin 90^\circ}{\cos 50^\circ} = 0.78 \text{ mm}$$

Eftersom Scheimpflugvillkoret är uppfyllt sammanfaller detta med den faktiska förskjutningen av laserlinjen.

Vi kan nu utifrån kännedom om myntens maximala höjdskillnad och sensorytans höjd avgöra vilken förstoring vi ska ha i z-led:

$$M_{T,Z} = \frac{h_{sensor}}{h'_{MAX}} \quad (38)$$

Exempel:

MAPP2200 med sensorhöjd $h_{\text{sensor}} = b_{\text{sensor}} = 8.192 \text{ mm}$.

Från föregående exempel tar vi följande observerade maximala höjdskillnad:

$$h'_{\text{MAX}} = 0.78 \text{ mm}$$

Den optimala förstoringen blir då:

$$M_{T,z} = \frac{8.192 \text{ mm}}{0.78 \text{ mm}} = 10.5 \text{ ggr}$$

När vi nu vet vilka förstoringar vi behöver i x-led och z-led är nästa steg att bestämma totala avståndet mellan mynt och sensor. När väl det är bestämt kan man köpa in linser med brännvidder som har valts så att fokallängderna och linsernas respektive objekt- och bildavstånd uppfyller Gauss linsformel. Vi sammanfattar det hela i några punkter:

- Bestäm vilken förstoring som behövs i x- respektive z-led.
- Bestäm vilket avstånd L det ska vara mellan mynt och sensoryta.
- Beräkna vilka objekt- och bildavstånd det ska vara för respektive lins. Observera att summan av de båda ska vara lika med L för båda linserna annars kommer man att få en oskarp eller oanvändbar bild.
- Beräkna vilka fokallängder linserna ska ha utifrån de framräknade objekt- och bildavstånden. Gör detta med hjälp av Gauss linsformel.
- Köp in linserna och ha gott om tålamod vid injusteringen.

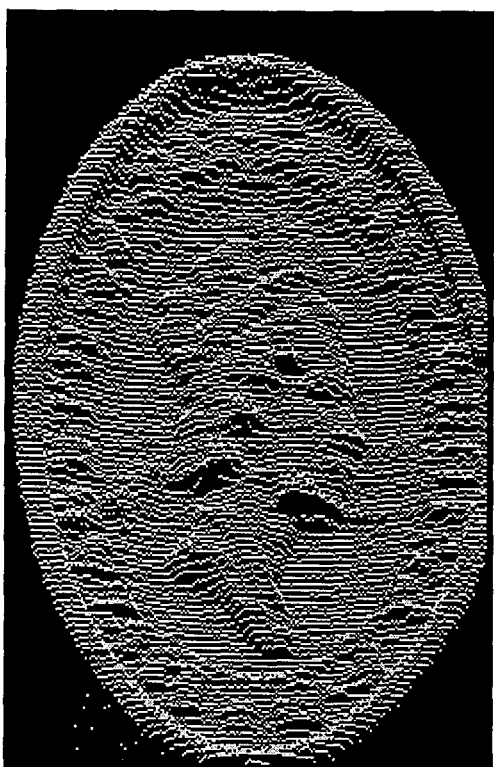
11. Slutsatser och diskussion

Vi har kommit fram till att optisk triangulering med en tvådimensionell bildsensor kan användas för att erhålla tredimensionella bilder av mynt. Om dessa bilder sedan kan användas vid en identifiering av myntet är ännu inte fastställt, men det är troligtvis möjligt. Fördelarna med att använda denna metod är bl a att man får en verklig geometrisk avbildning av myntets höjdstruktur, metoden är oberoende av myntets färg och reflektans samt att man kan bedöma graden av slitage hos mynten.

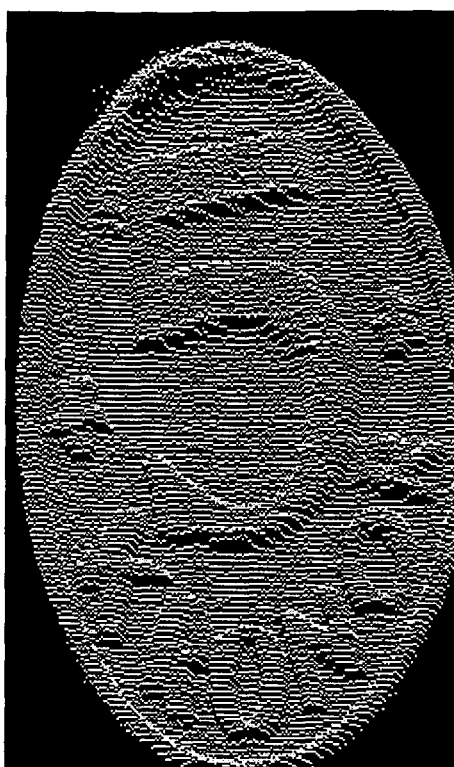
Nackdelarna är att metoden kräver relativt dyrbar och komplicerad utrustning för att fungera på ett tillfredställande sätt. Med det menar vi att mynten ska kunna detekteras i högre hastigheter uppemot ca 1-4 m/s. Vårt nuvarande system klarar en hastighet av ca 0.03 m/s men prestandan skulle förmodligen kunna förbättras avsevärt om vi bytte datorn mot en snabbare dito. Anledningen till att vi inte kommer upp i några högre mynthastigheter beror till stor del på mätproblemets natur. Eftersom det är relativt små strukturer på myntet som ska avbildas så krävs det mycket höga samplingsfrekvenser hos detektorsystemet för att mynthastigheten ska kunna bli acceptabel. Algoritmerna är troligtvis ganska optimerade redan men med snabbare hårdvara, t ex MAPP2200 Smart Vision System PCI, bör hastigheten hos ett optiskt sensorsystem baserat på optisk triangulering komma upp i ca 900 000 höjdvärden/sekund, vilket motsvarar ca 3500 relieflinjer/sekund om vi har 256 höjdvärden/relieflinje. Optisk triangulering baserad på PSD-arrayer ska kunna prestera uppåt 2 000 000 höjdvärden/sekund, men sådana system finns i skrivande stund ej kommersiellt tillgängliga.

En annan nackdel är att mynten måste röra sig med en jämn hastighet och att de inte roterar under själva inläsningen. Mynten måste också ligga plant mot underlaget eftersom höjdvärdena annars blir felaktiga eller uteblir p g a att höjdstrukturen hamnar utanför fokus.

Appendix A – Myntbilder erhållna med vårt system



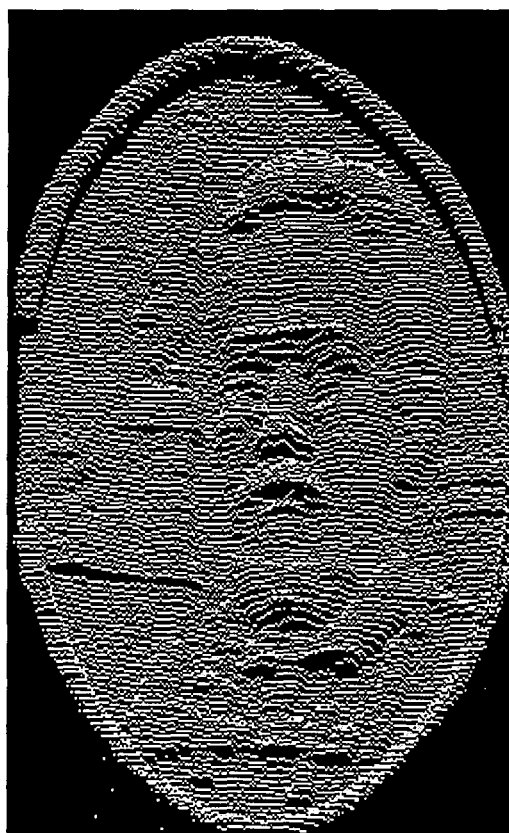
Figur 1. Engelskt 2-pundsmynt



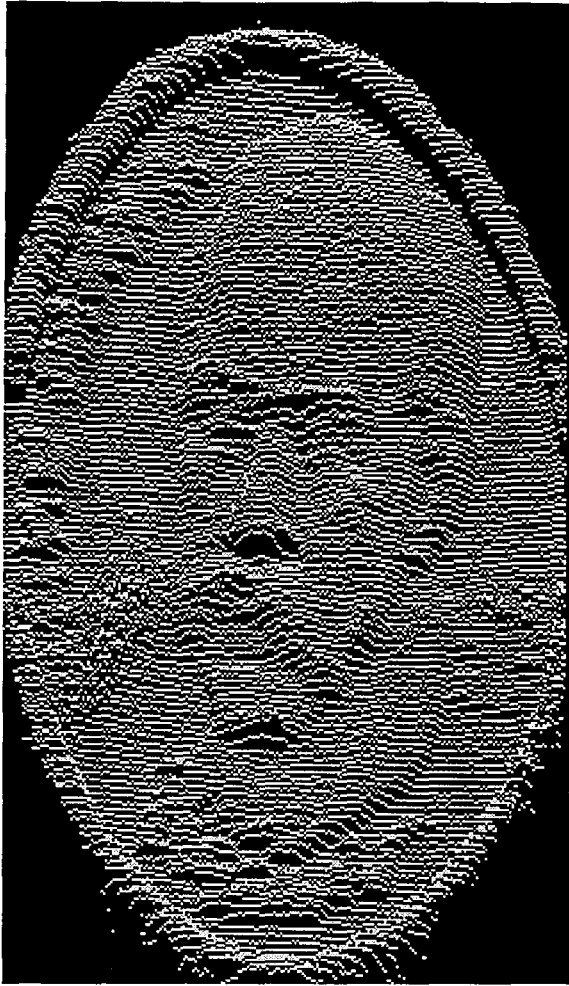
Figur 2. Svensk 5-krona



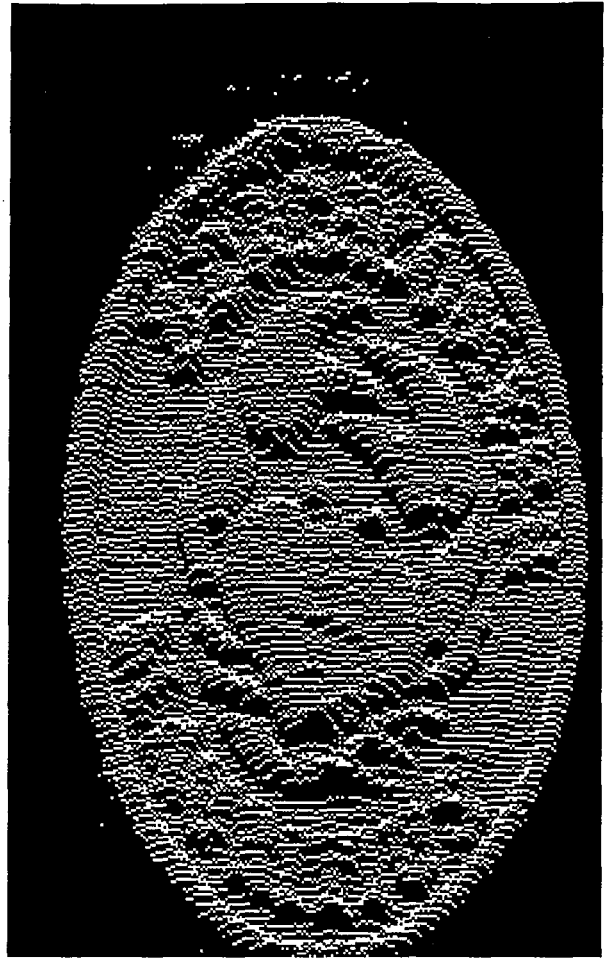
Figur 3. Ryskt 1-rubel



Figur 4. Ryskt 1-rubel



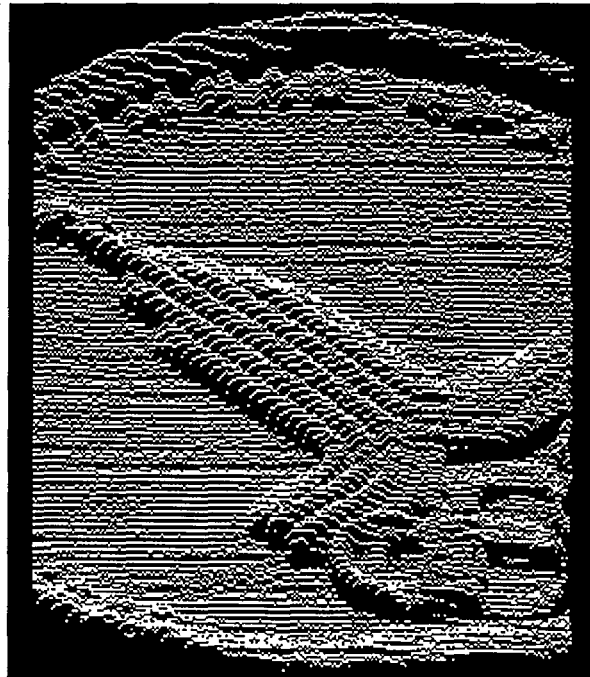
Figur 5. Ryskt 1-rubel



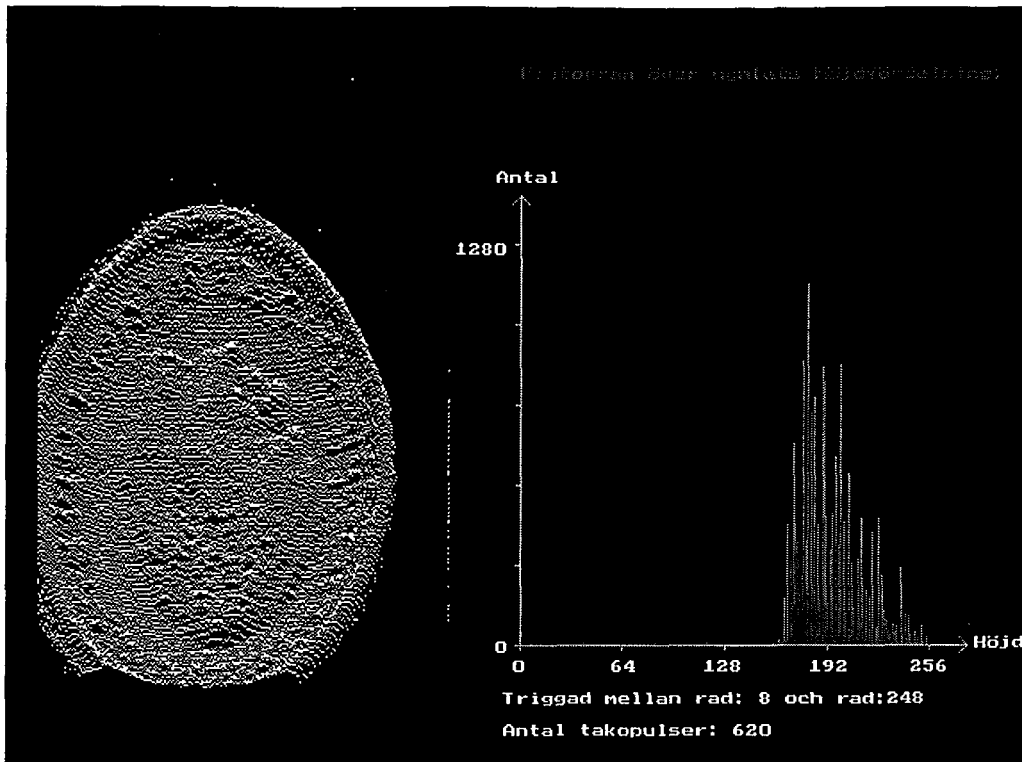
Figur 6. Mynt från Mauritius



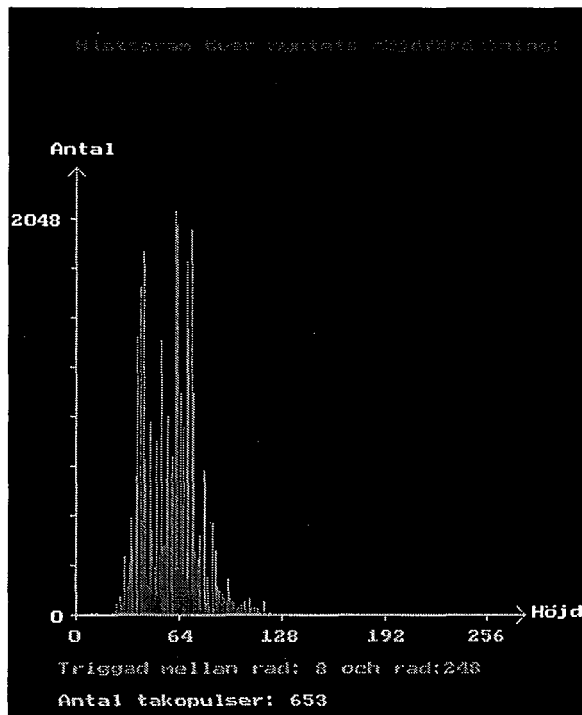
Figur 7. Ryskt 1-rubel från 1977



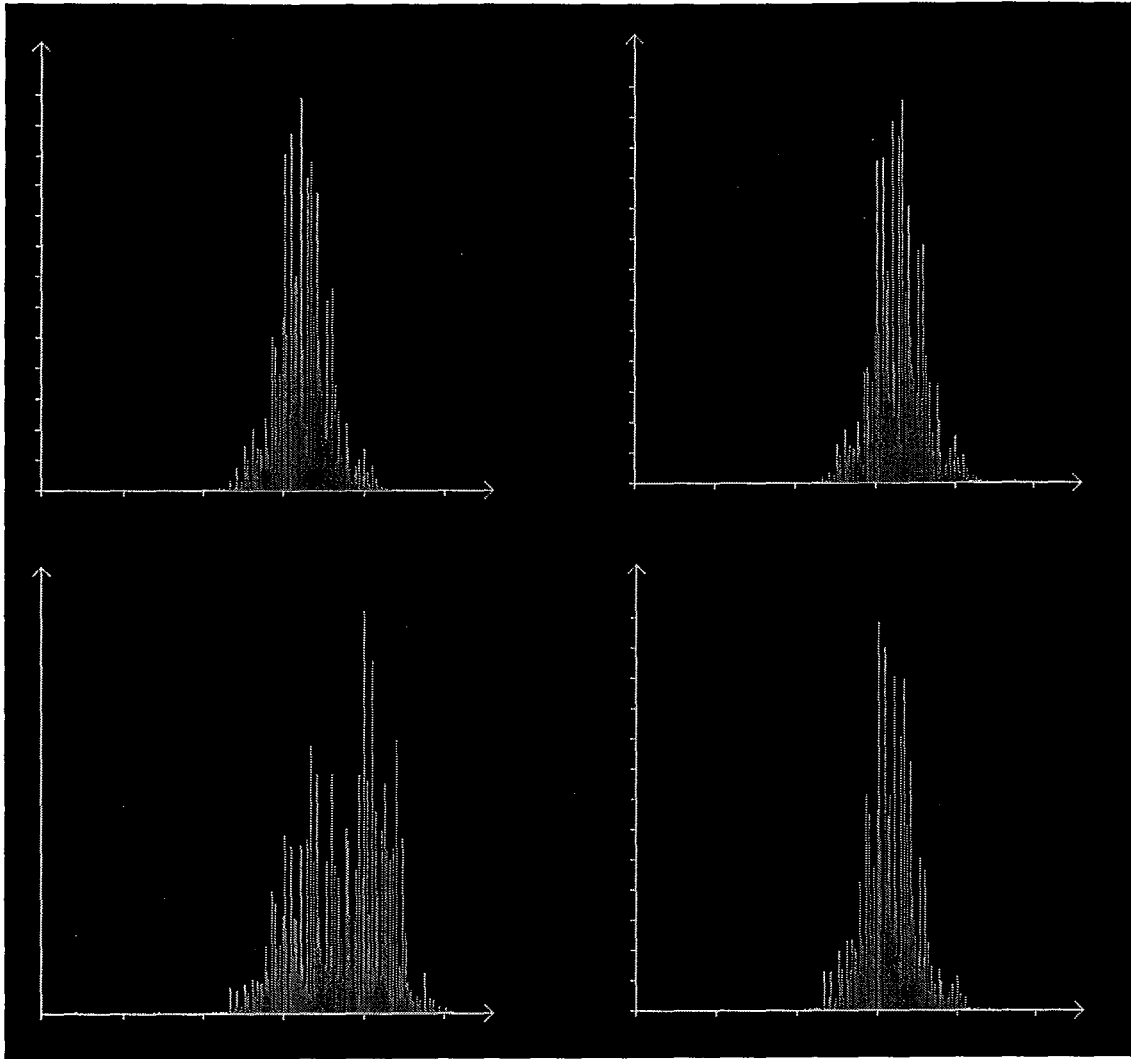
Figur 8. Inzoomad bild på ryskt rubel



Figur 9. Svensk 10-krona och dess histogram



Figur 10. Histogram över myntet i figur 7



Figur 11. Histogram över svensk 5-krona roterad på 4 olika sätt

Appendix B – Programlista för IMAGE.C

```
/*
*****
* Program.....: image.c
* Project.....: Examensarbete - Optiskt sensorsystem för mynt
* Date created.: 981221 by Manfred Jönsson, Magnus Johansson & Daniel Nilsson
* Last revision.:
* This version.: 3.0
* Description...: Program som läser in och presenterar 3D-bilder på mynt m h a
*                MAPP2200 ISA Smart Vision System.
* Tools.....: Borland Turbo C 2.0,
*                PC-14 Datainsamlingskort
*                MAPP2200 ISA Smart Vision system från IVP
*
*****/

#define _inpw inport
#define _outpw outport
#define _cdecl
#define _far far
#define uchar unsigned char

#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <dos.h>
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <graphics.h>
#include <m2isa.h>
#include "image.h"

/* DACQ-definitions */
#include "dacq.h"
#define uint unsigned int
#define ulint unsigned long int
#define BASE 0x330 /* Default DACQ card base adress */
#define pc14b 1
/* End of DACQ-definitions */

#define DEFAULT_DELAY 0 /* Default delay. */

#define delay(value) {volatile WORD t;for(t=0;t<value;t++);}

#define X_START 20 /* Var på skärmen bilden ska börja ritas ut */
#define Y_START 0

ulint histo[256],h[256],histo2[11];
int i;
int gdriver=VGA;
int gmode=VGAHI;

WORD YMAX=479;
WORD XMIN=20;
WORD yoff=0;
WORD oldyoff=0;
WORD linedistance=3;
WORD TOPBORDER=4;
WORD inverse_height_factor=3;
WORD YKONST=439;

#define TRUE 1
#define FALSE 0

/*-----
Initialize the graphics display.
-----*/
void set640x480()
{
    int i,errorcode;
    struct palettetype pal;
    char tmp[80];
    initgraph(&gdriver,&gmode,"");
    errorcode=graphresult();
    if (errorcode!=grOk) {
        printf("Error: %s\n",grapherrormsg(errorcode));
        exit(1);
    }
}
```

```

    }

    cleardevice();

    /* Colour mode */
    getpalette(&pal);
    setrgbpalette(pal.colors[0],0,0,0);
    setrgbpalette(pal.colors[1],255,255,255);
    setrgbpalette(pal.colors[2],255,0,0);
    setrgbpalette(pal.colors[3],0,255,0);
    setrgbpalette(pal.colors[4],0,0,255);

    for (i=5;i<pal.size;i++)
        setrgbpalette(pal.colors[i],i*4,i*4,i*4);
}

/*-----
   Initialize the PC-14 DACQ cards and set the counter to zero
   -----*/

int Init_tako(void)
{
    Init_brd(pc14b,PC14BBRD,BASE);
    CT_clock_source(pc14b,2,3);
    CT_cfg(pc14b,2,3,1,0);
    CT_write(pc14b,2,0);
    printf("\nCounter enabled and reset to zero...\n");
    return 0;
}

/*-----
   Get counter value from tachometer.
   -----*/

uint Get_tako_value(void)
{
    uint temp;
    CT_read(pc14b,2,&temp);
    return temp;
}

/*-----
   Waits until the tachometer has generated a certain number of pulses
   -----*/

uint Wait_for_tako(uint *oldval)
{
    uint temp,diff,step,val;

    step=4;
    val=Get_tako_value();
    diff=*oldval-val;

    if (diff<0)
        diff=*oldval+(65535-val);
    if (diff<step)
        temp=0;
    else {
        temp=1;
        *oldval=val;
    }
    return(temp);
}

/*-----
   Returns from graphics mode to text mode
   -----*/

void Change2Textmode(void)
{
    union REGS regs;
    regs.x.ax=0x0003;
    int86(0x10,&regs,&regs);
    printf("Programmet exekverades normalt. :)");
}

/*-----
   Checks if we have a reliefline from a coin on the sensor.
   -----*/

uint Coin_Found(void)
{
    WORD row;

```

```

uint Check;
uint reference=1000;
WORD StartRow=0;
WORD StopRow=200;

writecmd(SETR | 108);
Check=0;

for (row=StartRow;row<(StopRow+1);row++) {
    writecode(M_main);
    Check=Check+COUNT;
}

if (Check>reference)
    return 1;
else
    return 0;
}

/*-----
Draws color histogram based on the histogram vector histo[height].
Automatically scales the y-axis depending on the largest element
in the histogram vector.
-----*/
uint Draw_Histogram(void)
{
    int x_starth=320;
    int y_starth=400;
    int y_help,x_help;
    char min[2],temp[3],tempshort[10],templong[40],Nmax[4];
    char max[3],hojd[4],antal[5],titel[40];
    uint histomax,histotemp;
    uint SCALE,variars;

    WORD stapeloffset,storstapel,lillstapel;
    uint histosum1,histosum2,histomedel,tempvar;
    double histosum3,histovariars;

    WORD j,height,h;
    uint StapelAntal,Intervall;

    /* Skriv ut rubrik */
    setcolor(4); /* Blå färg */
    sprintf(titel,"Histogram över myntets höjdfördelning:");
    outtextxy(x_starth,y_starth-360,titel);

    /* Automatisk justering av skalan m h a en skalfaktor SCALE */
    histomax=0;

    for (j=0;j<256;j++) {
        if (histo[j]>histomax)
            histomax=histo[j];
    }

    SCALE=div(histomax,256).quot+1;

    /* Rita ut histogramstaplarna */
    setcolor(2); /* Röd färg */

    /*
    for (h=1;h<256;h++) {
        if (histo[h]!=0) {
            line(x_starth+h,y_starth-1,x_starth+h,y_starth-div(histo[h],SCALE).quot);
        }
    }
    */

    /* Text till x-axeln */
    setcolor(1); /* Vit färg */
    sprintf(min,"0");
    outtextxy(x_starth-4,y_starth+10,min);
    sprintf(temp,"64");
    outtextxy(x_starth+58,y_starth+10,temp);
    sprintf(temp,"128");
    outtextxy(x_starth+116,y_starth+10,temp);
    sprintf(temp,"192");
    outtextxy(x_starth+182,y_starth+10,temp);
    sprintf(temp,"256");
    outtextxy(x_starth+245,y_starth+10,temp);

```

```

printf(hojd, "H"jd");
outtextxy(x_starth+285,y_starth-5,hojd);

/* Text till y-axeln */

outtextxy(x_starth-15,y_starth-2,min);
printf(Nmax, "%4d", 256*SCALE);
outtextxy(x_starth-40,y_starth-250,Nmax);
printf(antal, "Antal");
outtextxy(x_starth-15,y_starth-295,antal);

/* Rita ut axlar */

setcolor(3); /* Grön färg */
line(x_starth,y_starth,x_starth+280,y_starth);
line(x_starth,y_starth,x_starth,y_starth-280);

/* Rita ut graderingen på axlarna */

for (j=0;j<5;j++) {
    line(x_starth+j*64,y_starth,x_starth+j*64,y_starth+3); /* x-axeln */
}

if (SCALE<20) {
for (j=0;j<(SCALE+1);j++) {
    y_help=y_starth-j*div(250,SCALE).quot;
    line(x_starth-3,y_help,x_starth,y_help); /* y-axeln */
}
}

/* Rita ut pilar på axlarna */

line(x_starth+280,y_starth,x_starth+275,y_starth+5);
line(x_starth+280,y_starth,x_starth+275,y_starth-5);
line(x_starth,y_starth-280,x_starth-5,y_starth-275);
line(x_starth,y_starth-280,x_starth+5,y_starth-275);

setcolor(1); /* Vit färg */

/* Beräkning av väntevärde och varians hos histogrammet */

histosum1=0;
histosum2=0;
histomedel=0;
histosum3=0;
histovarians=0;

for (j=0;j<256;j++) {
    histosum1=histosum1+j*histo[j]; /*1:a momentet beräknas = väntevärdet */
    histosum2=histosum2+histo[j];
    histosum3=histosum3+j*j*histo[j]; /* 2:a momentet beräknas */
}

tempvar=ldiv(histosum1,histosum2).quot;
histovarians=ldiv(histosum3,histosum2).quot-tempvar*tempvar;

histomedel=histosum1/histosum2;

printf(templong, "Histogrammets tyngdpunkt: %3d", histomedel);
outtextxy(x_starth-10,y_starth+60,templong);
if (histovarians<2000) {
    printf(templong, "Histogrammets varians: %3f", histovarians);
}
else {
    printf(templong, "Histogrammets varians: Too big?");
}
outtextxy(x_starth-10,y_starth+70,templong);

```

```

/* Beräknar ett grövre histogram utifrån det finare histogrammet */

setcolor(2);
stapeloffset=0;
StapelAntal=64;
Intervall=4;

for (storstapel=0;storstapel<StapelAntal;storstapel++) {
    for (lillstapel=0;lillstapel<Intervall;lillstapel++) {
        histo2[storstapel]=histo2[storstapel]+histo[lillstapel+stapeloffset];
    }

    if (histo2[storstapel]!=0) {
        setfillstyle(SOLID_FILL,2);
        y_help= y_starth-div(histo2[storstapel],SCALE*Intervall).quot;
        x_help= x_starth+storstapel*Intervall ;
        bar(x_help,y_help,x_starth+(storstapel+1)*Intervall,y_starth-1);
    }
    stapeloffset=stapeloffset+Intervall;
}
setcolor(1);

}

/*-----
Writes a reliefline to the screen
-----*/
uint Write_reliefline(void)
{
    WORD x;

    for (x=0;x<256;x++) {
        if ((h[x]!=0) && (h[x]!=256)) {
            putpixel(x+XMIN,YKONST+50-yoff-h[x]/inverse_height_factor,255);
        }
    }
}

/*-----
Initializes tachometer, graphics and MAPP2200 Sensor
-----*/
uint Initialize_All(void)
{
    Init_tako();
    set640x480();
    writecode(M_init);
    writecmd(SETV | 128);
    return 0;
}

/*-----
Main program.
-----*/
void main(void)
{
    uint *oldval;
    uint Tako_temp,Tako_temp1,Tako_temp2;

    char takosttring[40];

    WORD adapter=0x320;
    WORD row,x,y,j,lines;

    for (x=0;x<256;x++) { /* Reset h[] */
        h[x]=0;
        histo[x]=0;
    }

    if (init_device(adapter)) {

        Initialize_All();

        while (!kbhit()) { /* MAIN LOOP */

            disable();
            yoff=0;
            oldyoff=0;

```

```

while ((!Coin_Found()) && (!kbhit())) ; /* Waiting for a coin */

for (j=0;j<256;j++) {
    histo[j]=0;
    histo2[j]=0;
}

cleardevice();
writecmd(SETR | 0);
Tako_temp1=Get_tako_value();

for (lines=0;lines<256;lines++) { /* Coin loop begins here */
    for (row=0;row<256;row++) {
        writecode(M_main);
        h[row]=COUNT; /*Get heightvalue for the row */

        if (h[row]!=0)
            histo[h[row]]++; /* Increase counter */
    }

    Write_reliefline();

    yoff=oldyoff+linedistance; /* Increase y offset */
    oldyoff=yoff; /* End of Coin loop */
}

Tako_temp2=Get_tako_value();
if (Tako_temp1<Tako_temp2)
    Tako_temp=Tako_temp1+(65535-Tako_temp2);
else
    Tako_temp=Tako_temp1-Tako_temp2;

enable();
sprintf(takostring,"Antal takopulser: %3d",Tako_temp);
outtextxy(310,450,takostring);

Draw_Histogram(); /* End of main loop */
enable(); /* Allow interrupts again */
Change2Textmode();
}
else
    printf("No PCI adapter board installed\n");
}

```

Appendix C – Programlista för IMAGE.M

```
.MAPP2200          ; Define sensor used

.FILE
; Följande inställningar har gett bra resultat:
; SETAD 3 (6 bitars ADC) och LD A5
; SETAD 1 (8 bitars ADC) och LD A3

.PROC M_init
  SETR 0           ; Load row address 0.
  SRES            ; Reset shift control logic.
  SETAD 3         ; 6-bit A/D-conversion.
.ENDP

.PROC M_CheckCoin
  INITPD
  READPD
  INITAD
  LD A5
  LD REDGE A      ; Load result from LEDGE A to A
  RFILL A
.ENDP

.PROC M_main
  INITPD,+       ; Start exposure
  READPD         ; Read selected row
  INITAD         ; Start A/D conversion
  LD A5          ; Load A5 to accumulator
  LD REDGE A     ; Load result from LEDGE A to A
  RFILL A
.ENDP
.ENDF
```

Referenser

¹ M Johansson "Sheet-of-light Range Imaging", Linköping Studies in Science and Technology, Thesis No. 404, Linköping 1993

² R C Gonzalez, R E Woods "Digital Image Processing", Addison-Wesley Publishing Company 1992

³ MAPP2200 ISA System User Documentation, Integrated Vision Products

⁴ B Noharet, H Sjöberg, R Hey "Fast portable optical correlator for real-world image processing", Advances in optical pattern recognition IOF KTH ,
<http://www.iof.optics.kth.se/rolph%20project/article.html>

⁵ M R Teague "Image Analysis via the general theory of moments", J. Opt. Soc. Am, Vol.70, No. 8, August 1980

⁶ M de Bakker, P W Verbeek, Gijs K Steenvoorden "Design Considerations for a Range Image Sensor containing a PSD-array and an On-chip Multiplexer", Proceedings. International conference on recent advances in 3-D digital imaging and modeling, 1997

⁷ A Åström "Smart Image Sensors", Linköping Studies in Science and Technology, Dissertations No. 319, Linköping 1993

⁸ S-G Petterson, S Borgström, H Hertz "Advanced Optics" Dept. of Physics LTH, 1997