

FFI RAPPORT

KLASSIFISERING AV SKIP VED BRUK AV ISAR

KNAPSKOG Atle Onar

FFI/RAPPORT-2003/00812

FFIE/805/113

Godkjent
Kjeller 28. august 2003

Torleiv Maseng
Forskningsjef

KLASSIFISERING AV SKIP VED BRUK AV ISAR

KNAPSKOG Atle Onar

FFI/RAPPORT-2003/00812

FORSVARETS FORSKNINGSINSTITUTT
Norwegian Defence Research Establishment
Postboks 25, 2027 Kjeller, Norge

FORSVARETS FORSKNINGSPINSTITUTT (FFI)
Norwegian Defence Research Establishment

UNCLASSIFIED

P O BOX 25
 NO-2027 KJELLER, NORWAY
REPORT DOCUMENTATION PAGE

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE
 (when data entered)

1) PUBL/REPORT NUMBER FFI/RAPPORT-2003/00812	2) SECURITY CLASSIFICATION UNCLASSIFIED	3) NUMBER OF PAGES 44
1a) PROJECT REFERENCE FFIE/805/113	2a) DECLASSIFICATION/DOWNGRADING SCHEDULE -	
4) TITLE KLASSIFISERING AV SKIP VED BRUK AV ISAR SHIP CLASSIFICATION USING ISAR		
5) NAMES OF AUTHOR(S) IN FULL (surname first) KNAPSKOG Atle Onar		
6) DISTRIBUTION STATEMENT Approved for public release. Distribution unlimited. (Offentlig tilgjengelig)		
7) INDEXING TERMS IN ENGLISH: IN NORWEGIAN:		
a) <u>ISAR</u>	a) <u>ISAR</u>	
b) <u>radar</u>	b) <u>radar</u>	
c) <u>classification</u>	c) <u>klassifisering</u>	
d) _____	d) _____	
e) _____	e) _____	
THESAURUS REFERENCE:		
8) ABSTRACT ISAR (Inverse Synthetic Aperture Radar) is a radar mode for high-resolution imaging of moving targets. Airborne ISAR has a potential for long-range ship classification. This report presents a method for automatic ship classification. The theoretical basis is examined and an implemented algorithm is described. Our approach to automatic classification is based on 3-dimensional wire-frame models. The models are built from photographs using the commercial software PhotoModeler. The classification algorithm includes the following steps: The ISAR image is analysed, and specific features are extracted. The results are used for transforming the wire-frame models to the ISAR image projection plane. The silhouettes of the ISAR image and the transformed models are compared, and the best match is presented to the user.		
9) DATE 28. August 2003	AUTHORIZED BY This page only Torleiv Maseng	POSITION Director of Research

ISBN-82-464-0764-3

UNCLASSIFIED

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE
 (when data entered)

INNHOLD

	Side	
1	INNLEDNING	7
2	ISAR-AVBILDNING AV SKIP	7
2.1	Introduksjon til ISAR-avbildning av skip	7
2.2	Sammenheng mellom skipets bevegelser og ISAR bildeplan	9
2.2.1	ISAR bildeplan når skipet observeres rett bakfra eller forfra	9
2.2.2	Bildeplan når skipet observeres fra en vilkårlig vinkel	11
2.2.3	Feil i antatt bildeplan når skipet ikke ligger horisontalt	15
2.3	Estimering av målets dimensjoner og orientering	17
2.3.1	Målets lengde, bredde og høyde i ISAR-bildet	17
2.3.2	Estimering av aspektvinkel og fysisk lengde og bredde	19
2.3.3	Estimering av projeksjoner for sammenligning med modell	22
2.3.4	Mulighet for sammenligning med fotografier	23
3	MODELLERING FRA FOTOGRAFIER	23
3.1	Wireframe-modeller	24
3.2	Silhuetter	26
4	KLASSIFISERING AV SKIP BASERT PÅ WIREFRAME-MODELLER	28
4.1	Valg av klassifiseringsmetode	28
4.2	Feature-ekstrahering	30
4.2.1	Aktuelle bildebehandlingsteknikker	31
4.2.1.1	Romlig filtrering	31
4.2.1.2	Morfologiske operasjoner	31
4.2.1.3	Hough-/Radon-transform	32
4.2.2	Segmentering	34
4.2.3	Lengdeakse og sidekanter	35
4.2.4	Andre parametre i ISAR-bildet	37
4.2.5	Absolutte dimensjoner	37
4.3	Transformasjon av modeller	38
4.3.1	Transformasjon av wireframe-modeller	38
4.3.2	Transformasjon av silhuetter	39
4.4	Sammenligning av silhuetter	39
4.4.1	Metoder for sammenligning av former	40
4.4.2	Implementert metode for sammenligning av silhuetter	40
5	KONKLUSJON	42
	Litteratur	44

KLASSIFISERING AV SKIP VED BRUK AV ISAR

1 INNLEDNING

Denne rapporten inngår i FFI sitt prosjekt 805 PROFIL, delprosjekt 3: SAR/ISAR/MTI-kapasitet. I prosjektet er det gjennomført en studie av teknologi og operativ nytteverdi for avbildende radarsensorer. Man har spesielt undersøkt mulighetene ved bruk av ISAR (Invers Syntetisk Aperture Radar).

ISAR er en radarmodus for høyoppløselig avbildning av mål i bevegelse. Den er velegnet for avbildning av skip fra luftbårne systemer. Hvis oppløsningen er tilstrekkelig høy, gir ISAR mulighet for klassifisering og identifikasjon av fartøyer. Klassifiseringen kan skje manuelt ved at en operatør analyserer ISAR-bildene, men automatiske metoder ville bidratt til større effektivitet.

En av målsetningene for PROFIL delprosjekt 3 har vært å demonstrere automatisk klassifisering av skip fra ISAR-bilder. Det er utviklet og testet algoritmer ved hjelp av virkelige ISAR-data. Denne rapporten er en teknisk dokumentasjon av metodene som er benyttet.

Den valgte klassifiseringsmetoden er basert på sammenligning av ISAR-bilder med enkle 3-dimensjonale modeller, såkalte wireframes. Kapittel 2 behandler det teoretiske grunnlaget. Metoden som er benyttet for å lage wireframe-modeller er beskrevet i kapittel 3, mens kapittel 4 gir en detaljert beskrivelse av de implementerte algoritmene.

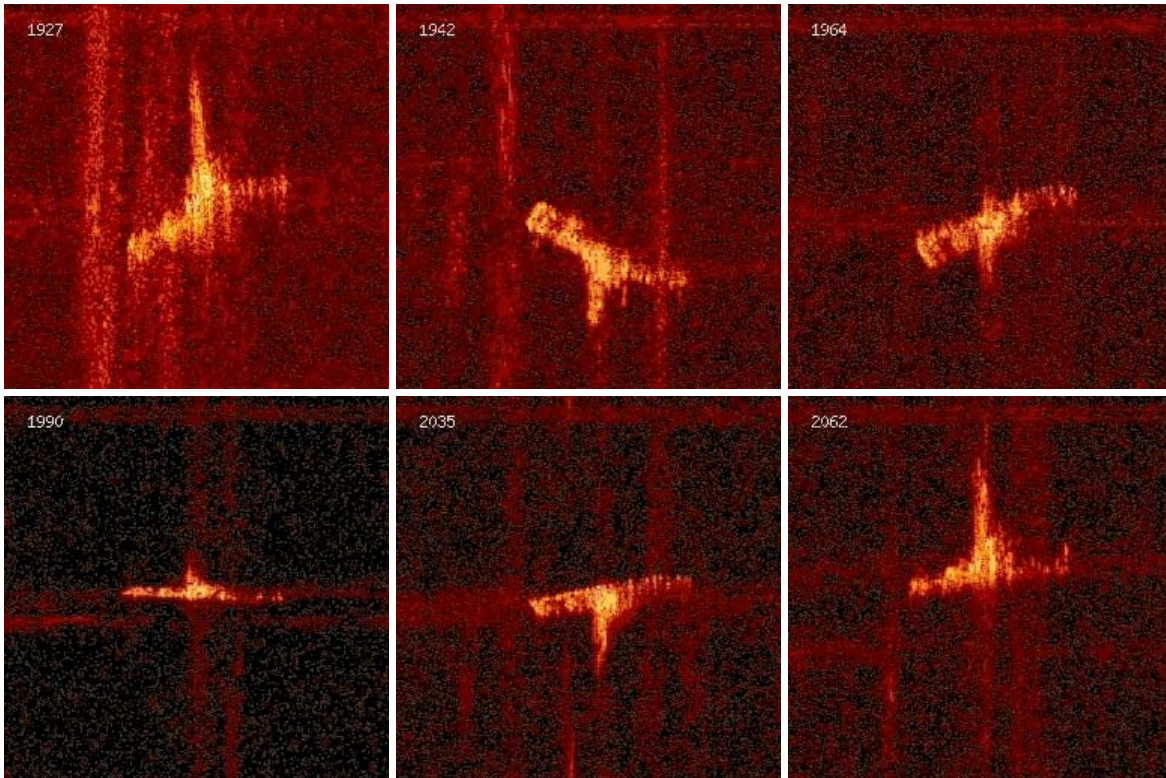
2 ISAR-AVBILDNING AV SKIP

En av forutsetningene for å utvikle metoder for klassifisering basert på ISAR-bilder er en grunnleggende forståelse av hvorfor ISAR-bildene ser ut som de gjør. Dette kapitlet er en teoretisk gjennomgang av viktige aspekter ved ISAR-avbildning av skip. Det gjennomgår spesielt hvordan man kommer frem til de matematiske likningene som er nødvendige for den automatiske klassifiseringsalgoritmen som beskrives i kapittel 4.

2.1 Introduksjon til ISAR-avbildning av skip

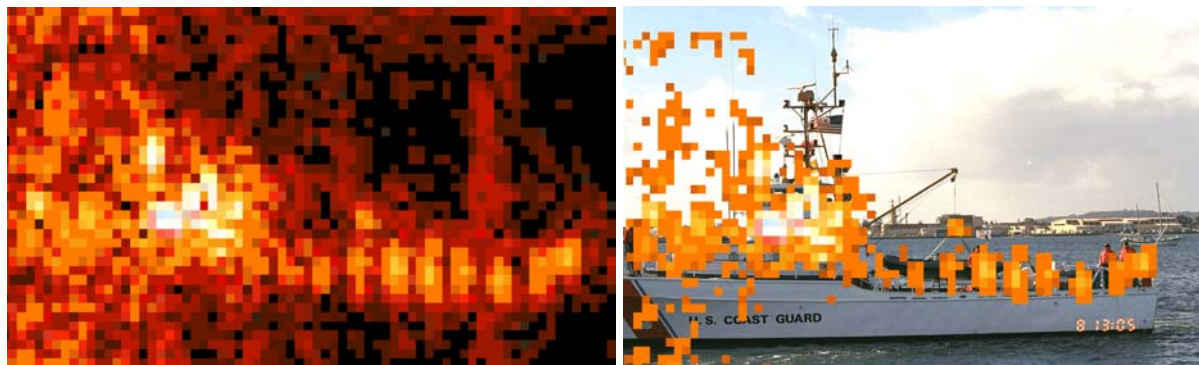
Med ISAR er det mulig å gjøre høyoppløselig avbildning av bevegelige mål fra lang avstand. Det er imidlertid visse egenskaper ved bildene som gjør dem vanskeligere å tolke enn optiske bilder. For det første er ISAR-avbildningen avhengig av målets bevegelse. En ISAR-sensor leverer en sekvens av bilder, og bildene viser stor variasjon hvis målets bevegelse varierer. Bildene av et skip som ruller i bølgene vil typisk være totalt forandret etter få sekunder. Dette er

vist på Figur 2.1. En detaljert beskrivelse av sammenhengen mellom skipets bevegelse og ISAR-avbildningen er gitt i 2.2.



Figur 2.1 Øyeblikksbilder fra en ISAR-film av et fartøy. Bildene er hentet fra (1)

En annen kompliserende faktor er at det ikke er noen klar sammenheng mellom hvilke deler av skipet som er synlige i ISAR-bildene og hva man ser tydelig på optiske bilder. Intensiteten i ISAR-bildene er gitt av tilbakespredt energi fra ulike deler av målet. Det er mye tilbakespredning fra hjørner og sammensatte metallstrukturer og lite tilbakespredning fra glatte flater som reflekterer energien bort, slik som dekk og sidene på skroget. Tilbakespredningen er svært vanskelig å prediktere, ettersom små strukturer kan få stor betydning for bildet. Et eksempel på dette er vist på Figur 2.2. Her ser man at de vertikale stolpene i rekka dominerer store deler av ISAR-bildet.



Figur 2.2 Til venstre: ISAR-bilde av en båt. Til høyre: Spreaderne fra ISAR-bildet overlagt et optisk bilde av båten (1)

Clutter fra bølgene kan i visse tilfeller være et problem ved ISAR-avbildning av skip. Det er særlig mye bølger og sjøsprøyt ved baugen og akterenden til skipet. Disse bølgene sprer radarenergien, men blir ikke fokusert opp på bildene. De har en bred hastighetsfordeling og kommer til syne som bånd i ISAR-bildene.

Deler av målet vil ikke være synlig i ISAR-bildene pga skygge. Dette er særlig et problem når skip observeres fra lang avstand og relativt lav høyde. Da vil bare den siden av skipet som vender mot radaren være synlig. Ulik skygge og ulike spredere gjør det vanskelig å sammenligne ISAR-bilder som er tatt fra forskjellige vinkler.

2.2 Sammenheng mellom skipets bevegelser og ISAR bildeplan

Et ISAR-bilde viser en projeksjon av målet i et bestemt plan. Dette bildeplanet er avhengig av målets orientering og bevegelser i forhold til radaren. I en ISAR-bildesekvens ser man typisk en mengde svært ulike projeksjoner av målet. De følgende avsnittene begrunner matematisk hvordan projeksjonen i prinsippet blir seende ut avhengig av målets orientering og bevegelser.

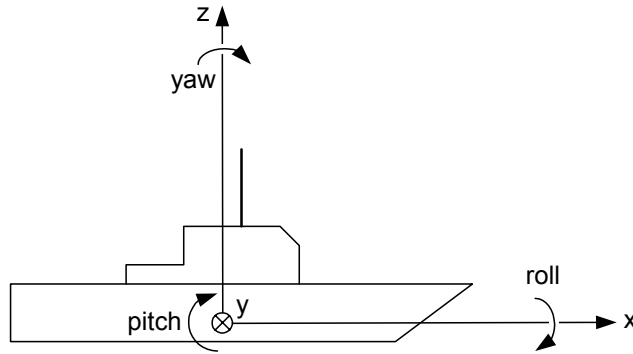
2.2.1 ISAR bildeplan når skipet observeres rett bakfra eller forfra

ISAR-bilder kan betraktes som en avbildning av radarsprederne på målet i et koordinatsystem med avstand (range) og Doppler langs aksene. Range-aksen følger siktelinja fra radaren. Dopplerskift er gitt av instantan hastighet mot sensoren. Forskjellene i dopplerskift mellom ulike deler av målet er bestemt av målets rotasjon. Under prosesseringen kan man kompensere for det dopplerskiftet som skyldes relativ bevegelse mellom målet og sensoren, og man står igjen med (2):

$$f_D = \frac{2f}{c}(\mathbf{v} \cdot \mathbf{R}) \quad (2.1)$$

der \mathbf{v} er hastighetsvektor pga rotasjon og \mathbf{R} er enhetsvektor i retning mot radaren.

Et skip kan beskrives i et koordinatsystem som vist på Figur 2.3.



Figur 2.3 Skip med rotasjon om tre akser

Skipet har en vilkårlig rotasjonsbevegelse som dekomponeres i roll, pitch og yaw. På Figur 2.3 er roll definert som rotasjon om x-aksen. Vinkelhastigheten til roll-bevegelsen kan kalles ω_x . Pitch er rotasjon om y-aksen med vinkelhastighet ω_y . Yaw er rotasjon om z-aksen med vinkelhastighet ω_z .

Det antas først at skipet på Figur 2.3 avbildes med en radar plassert på x-aksen langt bak skipet. Hastighet mot radaren gir positivt dopplerskift. Man ser at roll-komponenten i dette tilfellet ikke gir dopplerskift. Doppler som skyldes pitch-komponenten blir:

$$f_{D,pitch} = \frac{2f}{c} \omega_y (-z) \quad (2.2)$$

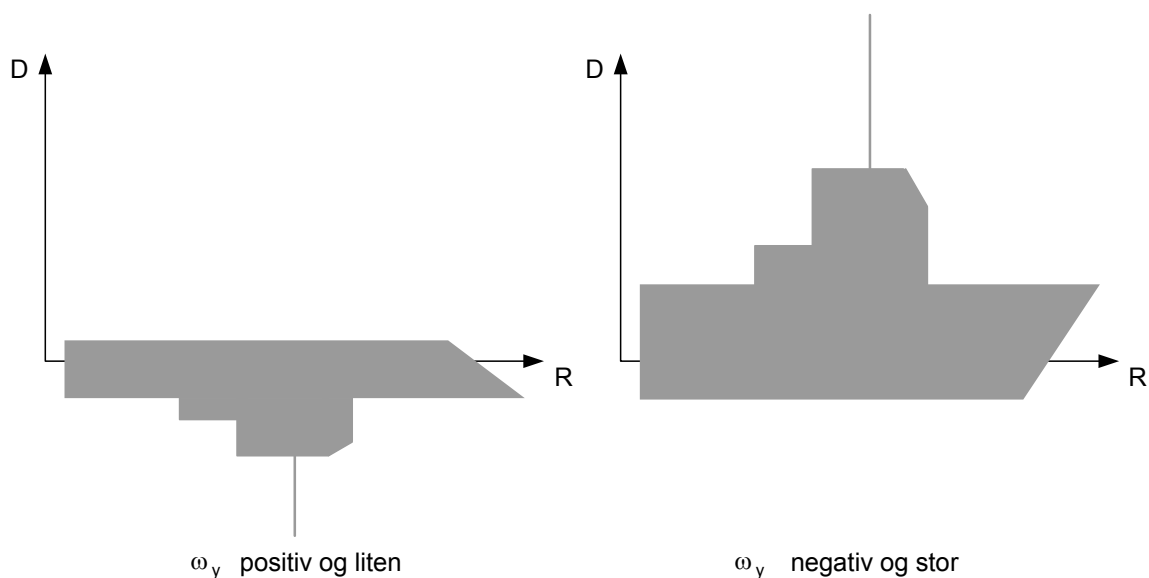
Doppler som skyldes yaw-komponenten blir:

$$f_{D,yaw} = \frac{2f}{c} \omega_z y \quad (2.3)$$

Det totale dopplerskiftet blir summen av disse komponentene. Det betyr at man i dette tilfellet kan skrive transformasjonen fra spredernes xyz-koordinater til range-Doppler-koordinater (RD) på følgende måte:

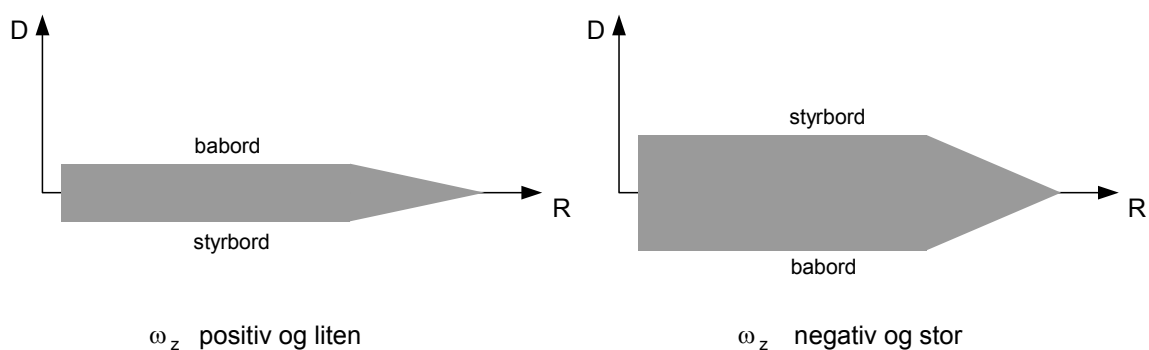
$$\begin{bmatrix} R \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2f}{c} \omega_z & -\frac{2f}{c} \omega_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Hvis skipet kun har pitch-bevegelse, resulterer disse likningene i et bilde av det som kalles profilkomponenten til skipet. Dette er illustrert på Figur 2.4.



Figur 2.4 Range-Doppler-avbildning av skip med pitch-bevegelse

Hvis skipet kun har yaw-bevegelse, får man et bilde av det som kalles plankomponenten til skipet. Dette er illustrert på Figur 2.5.

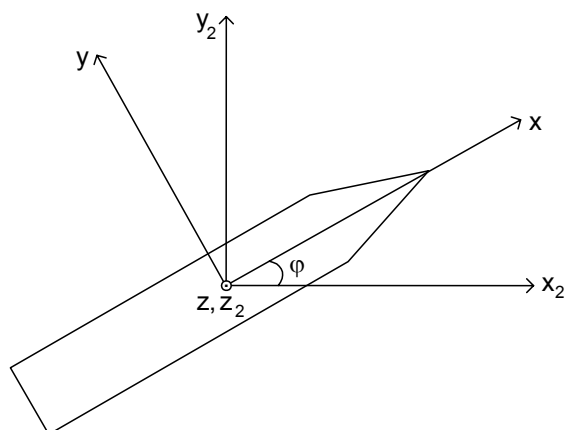


Figur 2.5 Range-Doppler-avbildning av skip med yaw-bevegelse

Med både pitch- og yaw-bevegelse blir avbildningen en kombinasjon av profil- og plankomponent. Generelt er skipets roll-, pitch- og yaw-bevegelser uavhengige av hverandre og varierer med ulik periode. Det medfører at profil- og plankomponenten varierer uavhengig av hverandre gjennom en sekvens av ISAR-bilder.

2.2.2 Bildeplan når skipet observeres fra en vilkårlig vinkel

I avsnitt 2.2.1 ble ISAR-bildeplanet utledet for det tilfellet at radaren var plassert på x-aksen på Figur 2.3. Det er behov for uttrykk som gjelder for en vilkårlig plassering av radaren. Man kan først se på en plassering av radaren i xy-planet. Et nytt koordinatsystem (x_2 y_2 z_2) er definert slik at x_2 -retning faller sammen med radarens range-retning. Vinkelen mellom x-aksen og x_2 -aksen kalles φ . Dette er vist på Figur 2.6.

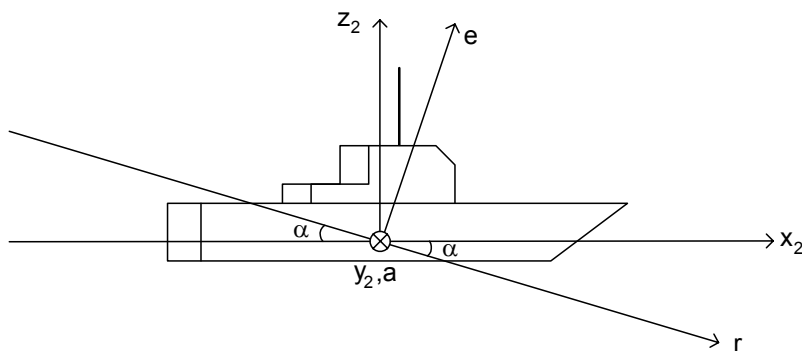


Figur 2.6 Koordinatsystem rotert om z-aksen

Transformasjonen av koordinater fra koordinatsystemet $(x \ y \ z)$ til $(x_2 \ y_2 \ z_2)$ blir:

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Radaren kan også plasseres i en høyde over havet slik at den får en elevasjonsvinkel α sett fra skipet. Et nytt koordinatsystem $(r \ a \ e)$ defineres slik at r-retning er radarens slant-range-retning og a-retning ligger i horisontalplanet som vist på Figur 2.7.



Figur 2.7 Koordinatsystem rotert om y_2 -aksen

Transformasjonen av koordinater fra koordinatsystemet $(x \ y \ z)$ til $(r \ a \ e)$ blir:

$$\begin{bmatrix} r \\ a \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

På tilsvarende måte transformeres skipets roll, pitch og yaw til rotasjonskomponenter om r-, a- og e-aksen:

$$\begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_a \\ \omega_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Bildeplanet for ISAR-avbildningen kan finnes på samme måte som Likning (2.4).

$$\begin{bmatrix} R \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2f}{c} \omega_e & -\frac{2f}{c} \omega_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ a \\ e \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Skrevet på en annen måte:

$$R = \cos \alpha \cos \varphi \cdot x - \cos \alpha \sin \varphi \cdot y - \sin \alpha \cdot z \quad (2.9)$$

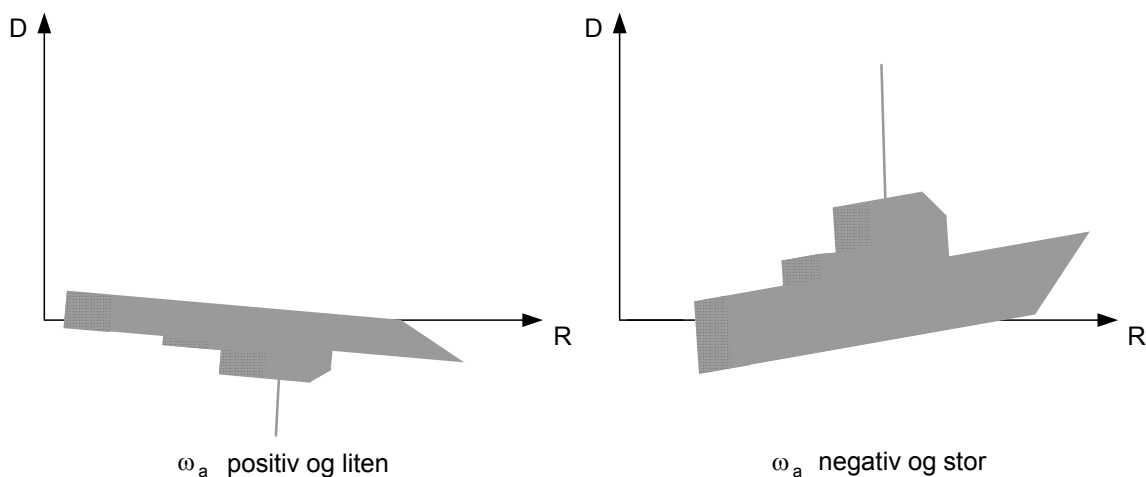
$$D = \frac{2f\omega_e}{c} (\sin \varphi \cdot x + \cos \varphi \cdot y) - \frac{2f\omega_a}{c} (\sin \alpha \cos \varphi \cdot x - \sin \alpha \sin \varphi \cdot y + \cos \alpha \cdot z) \quad (2.10)$$

Hvis skipet observeres fra lang avstand og moderat høyde slik at $\alpha \rightarrow 0$, kan Likning (2.9)-(2.10) tilnærmes med:

$$R \approx \cos \varphi \cdot x - \sin \varphi \cdot y \quad (2.11)$$

$$D \approx \frac{2f\omega_e}{c} (\sin \varphi \cdot x + \cos \varphi \cdot y) - \frac{2f\omega_a}{c} \cdot z \quad (2.12)$$

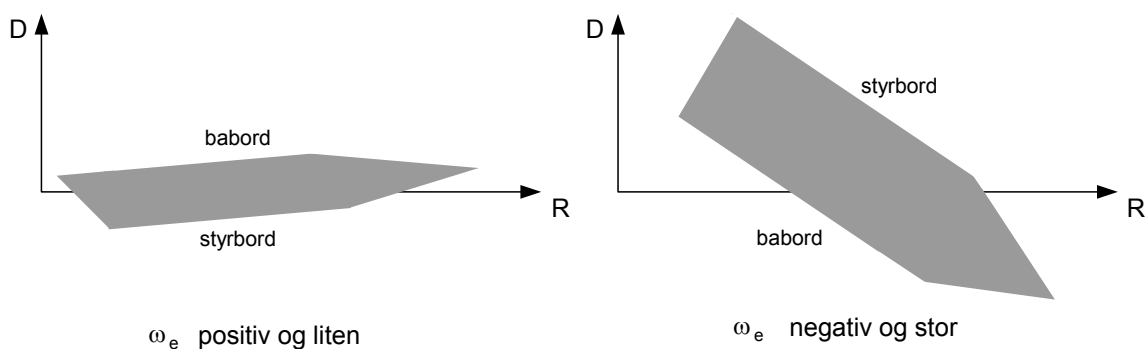
Hvis man studerer likningene for bildeplanet, ser man at det er mulig å få avbildninger i en mengde ulike projeksjoner avhengig av skipets rotasjon og orientering i forhold til radaren. Hvis skipet f.eks ikke har yaw-bevegelse, men en rotasjon om a-aksen (En kombinasjon av roll og pitch), får man avbildninger som illustrert på Figur 2.8.



Figur 2.8 Range-Doppler-avbildninger av skip med rotasjon om a -aksen

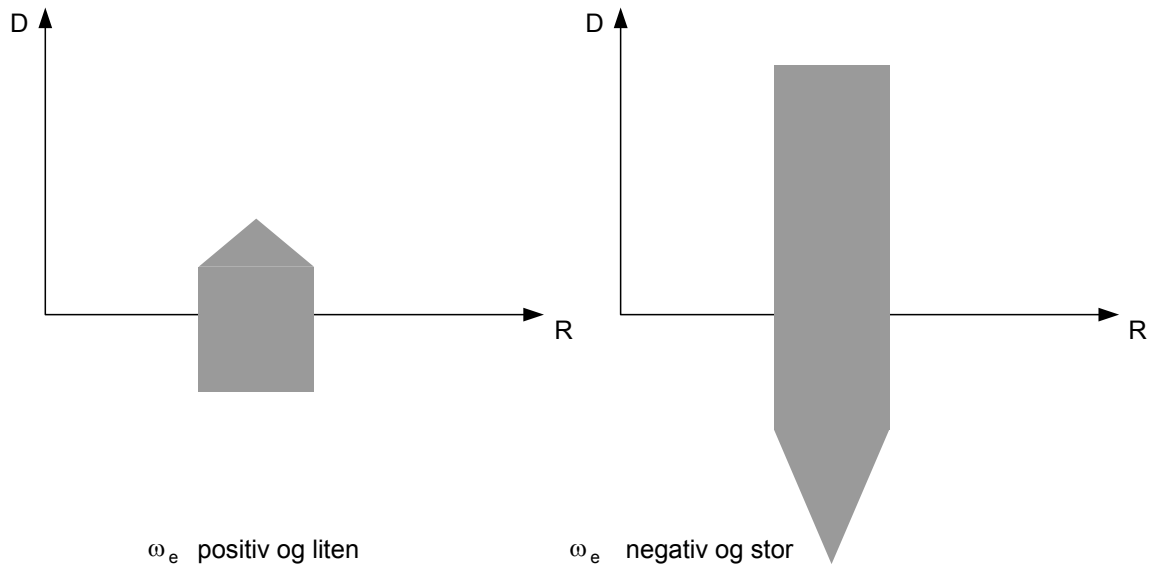
I dette tilfellet har man avbildninger av profilkomponenten, og skipet har en viss tilt på bildene pga sensorens elevasjon. Tiltet forsvinner når α blir lik 0.

Hvis skipet kun har yaw-bevegelse, får man avbildninger av plankomponenten som illustrert på Figur 2.9.



Figur 2.9 Range-Doppler-avbildninger av skip med rotasjon om e -aksen

Bildene har en variasjon i tilt og bredde på plankomponenten som er direkte koplet til hverandre og bestemt av skipets rotasjon. Når aspektvinkelen ϕ går mot 0, forsvinner tiltet på bildene, og man får kun en variasjon i bredden på plankomponenten. Når $|\phi| \rightarrow 90^\circ$, dvs at skipet ligger på tvers av siktelinja fra radaren, blir avbildningene som illustrert på Figur 2.10.



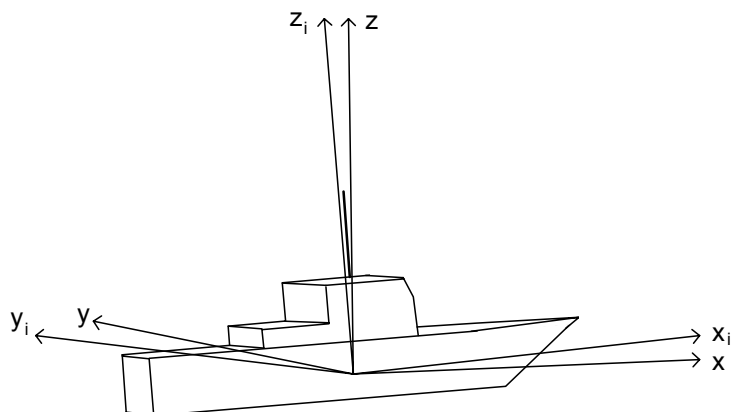
Figur 2.10 Range-Doppler-avbildninger av skip som ligger på tvers av siktelinja fra radaren

Normalt vil skipet ha en kombinasjon av roll-, pitch- og yaw-bevegelse, og ISAR-bildene vil vise en kombinasjon av profil- og plankomponent.

2.2.3 Feil i antatt bildeplan når skipet ikke ligger horisontalt

Ved ISAR-avbildning av skip lages det en sekvens av bilder. Hvert bilde blir dannet på bakgrunn av skipets rotasjon innenfor et intervall som er kortere enn perioden til roll- og pitch-bevegelsene forårsaket av bølgene. Dette innebærer at skipet har et utslag i roll og pitch som er forskjellig fra ett ISAR-bilde til det neste. Det gjøres en feil hvis skipet antas å ligge i horisontalplanet.

Man kan definere et koordinatsystem $(x_i \ y_i \ z_i)$ som beskriver skipets instantane koordinater. Normaltilstanden når skipet ikke har utslag i roll eller pitch er beskrevet ved $(x \ y \ z)$. Dette er illustrert på Figur 2.11.



Figur 2.11 Koordinatsystem for skip med utslag i roll og pitch

Transformasjonen fra $x_i y_i z_i$ -koordinater til xyz -koordinater kan gjøres på flere måter. Hvis man velger å først foreta en rotasjon om x_i -aksen (roll) og deretter en rotasjon om y -aksen (pitch), får man følgende koordinattransformasjoner:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \rho & -\sin \rho \\ 0 & \sin \rho & \cos \rho \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

der β er utslag i pitch og ρ er utslag i roll.

Kjennskap til skip sine bevegelser i sjøen tilsier at de største utslagene man kan regne med å observere blir som gitt i Tabell 2.1.

Fartøysklasse	Max amplitude i roll [°]	Max amplitude i pitch [°]
Tankskip	2.5 – 4	0.5 – 1
Fiskebåt	7.5 – 10	2.5 – 3.5

Tabell 2.1 Maksimale utslag i roll og pitch for ulike skip (3)

Hvis man setter inn maksimalt utslag i både roll og pitch i Likning (2.13), får man følgende tallverdier for tankskip:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1.00 & 0.00 & -0.02 \\ 0 & 1.00 & -0.07 \\ 0.02 & 0.07 & 1.00 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

For fiskefartøy:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1.00 & -0.01 & -0.07 \\ 0 & 0.98 & -0.17 \\ 0.07 & 0.17 & 0.98 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

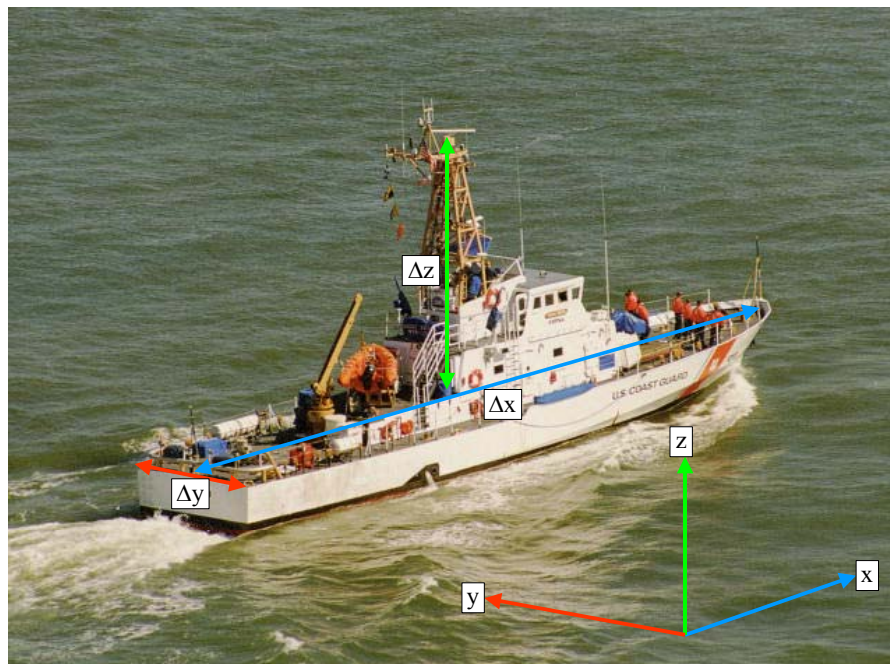
Dette tyder på at man for de fleste praktiske formål kan tilnærme matrisene i Likning (2.13) med enhetsmatriser og se bort fra dem når man observerer store skip, mens man må være klar over at feilen kan bli betydelig når man observerer mindre båter i grov sjø.

2.3 Estimering av målets dimensjoner og orientering

I enkelte tilfeller kan man skaffe informasjon om målets dimensjoner og orientering ved å estimere visse størrelser i ISAR-bildene. Et sett av likninger som forbinder størrelser i ISAR-bildene med de fysiske dimensjonene til målet blir presentert i 2.3.1. I 2.3.2 utledes de konkrete likningene som kan brukes for å estimere skipets orientering, lengde og bredde under forutsetning av at ISAR-bildet oppfyller spesielle krav. Et likningssett for å rotere og strekke en 3D-modell til samme projeksjon som ISAR-bildet er utledet i 2.3.3.

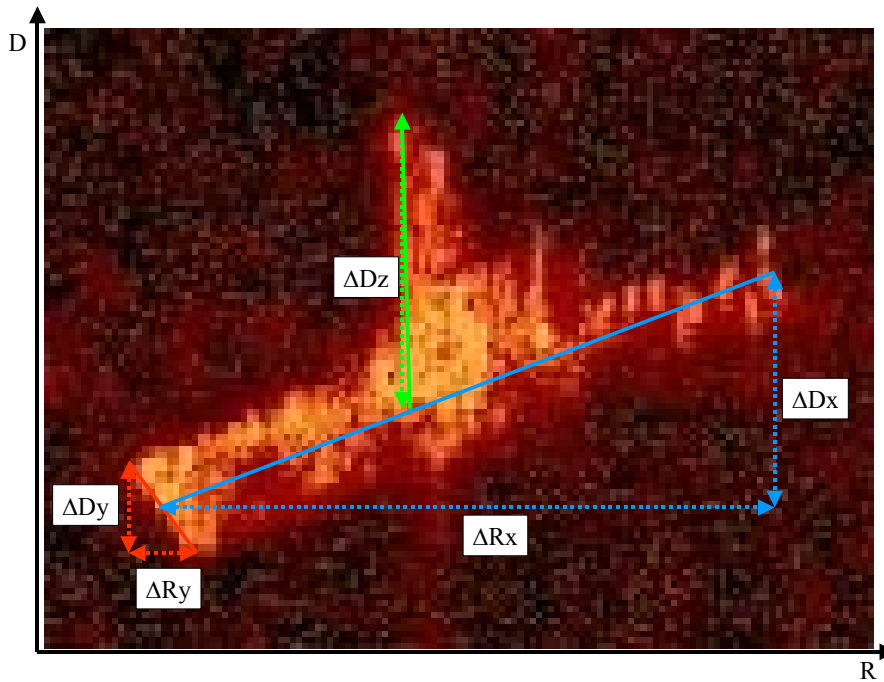
2.3.1 Målets lengde, bredde og høyde i ISAR-bildet

Et skip kan beskrives i xyz-koordinater som vist på Figur 2.12.



Figur 2.12 Skip beskrevet i xyz-koordinater

Man ønsker å finne ut hvordan skipet er projisert inn i ISAR-planet. Skipet har typisk både roll/pitch- og yaw-bevegelse, slik at ISAR-bildet viser både profil- og plankomponent som vist på Figur 2.13.



Figur 2.13 ISAR-avbildning av et skip av samme type som skipet på Figur 2.12

Hvis man kunne ha satt inn tilstrekkelig mange kjente størrelser i Likning (2.9) og (2.10) til at man hadde et løsbart likningssett, ville man funnet et uttrykk for hvordan xyz-koordinater projiseres inn i ISAR-planet. I praksis har man for mange ukjente til at likningssettet kan løses helt, men man kan komme et stykke på veg.

Det antas at skipets lengdeakse er horisontal og parallell med x-aksen som vist på Figur 2.12. Δx er et uttrykk for skipets lengde. Det antas videre at en linje på tvers av skipet er horisontal og parallell med y-aksen. Δy er et uttrykk for skipets bredde. Skipets vertikaleakse er parallell med z-aksen. Δz uttrykker høyden fra dekket til mastetoppen.

Hvis disse linjene eller noen som er parallelle med dem finnes igjen i ISAR-bildet, kan man sette dem inn i Likning (2.9) og (2.10). En linje i RD-planet beskrives ved en ΔR og en ΔD , og disse størrelsene settes inn i likningene. For skipets lengdeakse får man følgende:

$$\Delta R_x = \cos \alpha \cos \varphi \cdot \Delta x \quad (2.16)$$

$$\Delta D_x = \left(\frac{2f\omega_e}{c} \sin \varphi - \frac{2f\omega_a}{c} \sin \alpha \cos \varphi \right) \Delta x \quad (2.17)$$

For linja på tvers av skipet:

$$\Delta R_y = -\cos \alpha \sin \varphi \cdot \Delta y \quad (2.18)$$

$$\Delta D_y = \left(\frac{2f\omega_e}{c} \cos \varphi + \frac{2f\omega_a}{c} \sin \alpha \sin \varphi \right) \Delta y \quad (2.19)$$

For linja mellom dekket og mastetoppen:

$$\Delta R_z = -\sin \alpha \cdot \Delta z \quad (2.20)$$

$$\Delta D_z = -\frac{2f\omega_a}{c} \cos \alpha \cdot \Delta z \quad (2.21)$$

Disse likningene beskriver sammenhengen mellom skipets fysiske dimensjoner og størrelser som kan estimeres fra ISAR-bildet. Hvis α er kjent og alle ΔR og ΔD estimert, har vi i prinsippet 6 likninger med 6 ukjente. Det vil imidlertid ikke være løsbart i praksis. I reelle tilfeller vil ΔR_z være svært liten og ha betydelig usikkerhet pga utslag i roll/pitch som diskutert i 2.2.3. Likning (2.20) kan derfor i praksis ikke brukes.

2.3.2 Estimering av aspektvinkel og fysisk lengde og bredde

Hvis man antar at ΔR_x , ΔD_x , ΔR_y , ΔD_y og ΔD_z er estimert med relativt stor nøyaktighet, kan man sette inn i likningene (2.16) - (2.21). Likning (2.16) gir:

$$\cos \varphi = \frac{\Delta R_x}{\cos \alpha \cdot \Delta x} \quad (2.22)$$

Likning (2.18) gir:

$$\sin \varphi = -\frac{\Delta R_y}{\cos \alpha \cdot \Delta y} \quad (2.23)$$

Likning (2.21) gir:

$$\frac{2f\omega_a}{c} = -\frac{\Delta D_z}{\cos \alpha \cdot \Delta z} \quad (2.24)$$

Likning (2.24) innsatt i Likning (2.17) gir:

$$\sin \varphi = \frac{\Delta D_x}{\frac{2f\omega_e}{c} \Delta x} - \frac{\Delta D_z \tan \alpha \cos \varphi}{\frac{2f\omega_e}{c} \Delta z} \quad (2.25)$$

Likning (2.24) innsatt i Likning (2.19) gir:

$$\cos \varphi = \frac{\Delta D_y}{\frac{2f\omega_e}{c} \Delta y} + \frac{\Delta D_z \tan \alpha \sin \varphi}{\frac{2f\omega_e}{c} \Delta z} \quad (2.26)$$

Likning (2.22) og (2.25) gir:

$$\tan \varphi = \frac{\Delta D_x \cos \alpha - \Delta D_z \sin \alpha \cos \varphi \frac{\Delta x}{\Delta z}}{\frac{2f\omega_e}{c} \Delta R_x} \quad (2.27)$$

Likning (2.23) og (2.26) gir:

$$\tan \varphi = - \frac{\Delta R_y \frac{2f\omega_e}{c}}{\Delta D_y \cos \alpha + \Delta D_z \sin \alpha \sin \varphi \frac{\Delta y}{\Delta z}} \quad (2.28)$$

Likning (2.27) og (2.28) gir:

$$\tan^2 \varphi = - \frac{\Delta R_y \left(\Delta D_x \cos \alpha - \Delta D_z \sin \alpha \cos \varphi \frac{\Delta x}{\Delta z} \right)}{\Delta R_x \left(\Delta D_y \cos \alpha + \Delta D_z \sin \alpha \sin \varphi \frac{\Delta y}{\Delta z} \right)} \quad (2.29)$$

Under visse forutsetninger kan man tilnærme Likning (2.29) med følgende uttrykk:

$$\tan^2 \varphi \approx - \frac{\Delta R_y \Delta D_x}{\Delta R_x \Delta D_y} \quad (2.30)$$

Dette gir:

$$\varphi \approx \tan^{-1} \left(\pm \sqrt{- \frac{\Delta R_y \Delta D_x}{\Delta R_x \Delta D_y}} \right) \quad (2.31)$$

Estimatet for φ kan settes inn i Likning (2.22) og (2.23), og man får estimater for skipets lengde og bredde:

$$L = \Delta x = \frac{\Delta R_x}{\cos \alpha \cos \varphi} \approx \frac{\Delta R_x}{\cos \varphi} \quad (2.32)$$

$$B = \Delta y = -\frac{\Delta R_y}{\cos \alpha \sin \varphi} \approx -\frac{\Delta R_y}{\sin \varphi} \quad (2.33)$$

Det antas at α er liten slik at $\cos \alpha \approx 1$. Med $\alpha < 10^\circ$ har vi $0.98 < \cos \alpha < 1$.

Tilnærmingen i Likning (2.30) er gyldig når

$$\left| \Delta D_z \sin \alpha \cos \varphi \frac{\Delta x}{\Delta z} \right| \ll \left| \Delta D_x \cos \alpha \right| \quad (2.34)$$

og

$$\left| \Delta D_z \sin \alpha \sin \varphi \frac{\Delta y}{\Delta z} \right| \ll \left| \Delta D_y \cos \alpha \right| \quad (2.35)$$

Dette kan skrives:

$$\left| \frac{\Delta D_x}{\Delta D_z} \right| \gg |\cos \varphi| \tan \alpha \frac{\Delta x}{\Delta z} \quad (2.36)$$

og

$$\left| \frac{\Delta D_y}{\Delta D_z} \right| \gg |\sin \varphi| \tan \alpha \frac{\Delta y}{\Delta z} \quad (2.37)$$

Vi vet at:

$$|\cos \varphi| \leq 1 \quad (2.38)$$

$$|\sin \varphi| \leq 1 \quad (2.39)$$

Man kan videre anta følgende basert på kjennskap til bruken av sensoren og typiske skipsdimensjoner:

$$0.03 < \tan \alpha < 0.2 \quad (2.40)$$

$$\frac{\Delta x}{\Delta z} \approx \frac{\text{lengde}}{\text{høyde}} \ll 5 \quad (2.41)$$

$$\frac{\Delta y}{\Delta z} \approx \frac{\text{bredde}}{\text{høyde}} \ll 1 \quad (2.42)$$

Innsatt i Likning (2.36) og (2.37) gir dette at tilnærmingen i Likning (2.30) er svært god når

$$\left| \frac{\Delta D_x}{\Delta D_z} \right| \gg 1 \quad (2.43)$$

og

$$\left| \frac{\Delta D_y}{\Delta D_z} \right| \gg 0.2 \quad (2.44)$$

Dette betyr at man kan benytte Likning (2.31) - (2.33) til å estimere φ , lengde og bredde fra ISAR-bilder med stor plankomponent og liten profilkomponent. I praksis er det trolig ikke nødvendig å stille så strenge krav som Likning (2.43) og (2.44).

2.3.3 Estimering av projeksjoner for sammenligning med modell

Sammenligning av ISAR-bilder med modeller i en database kan gjøres ved at man for hver modell tester en hypotese om at modellen er den riktige. Modellen roteres og strekkes til samme projeksjon som ISAR-bildet, og silhuettene sammenlignes.

Modell i har lengde, bredde og høyde lik hhv L_i , B_i og H_i . Likningene for rotasjon/strekking blir ulike avhengig av hvilke parametre som er estimert fra ISAR-bildet. Det antas at ΔR_x , ΔD_x og ΔD_z er estimert med tilstrekkelig nøyaktighet. Da kan man sette inn de estimerte og antatte størrelsene i Likning (2.16) - (2.21).

Likning (2.16) gir:

$$\varphi = \cos^{-1} \left(\frac{\Delta R_x}{L_i \cos \alpha} \right) \quad (2.45)$$

Likning (2.21) gir:

$$\frac{2f\omega_a}{c} = - \frac{\Delta D_z}{H_i \cos \alpha} \quad (2.46)$$

Likning (2.46) innsatt i Likning (2.17) gir:

$$\frac{2f\omega_e}{c} = \frac{\Delta D_x}{L_i \sin \varphi} - \frac{\Delta D_z \tan \alpha}{H_i \tan \varphi} \quad (2.47)$$

Når disse uttrykkene settes inn i Likning (2.6) og (2.8), får man følgende transformasjon av modellen sine xyz-koordinater til projeksjonen i ISAR-planet:

$$\begin{bmatrix} R \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \varphi & -\cos \alpha \sin \varphi & -\sin \alpha \\ \frac{\Delta D_x}{L_i} & \frac{\Delta D_x}{L_i \tan \varphi} - \frac{\Delta D_z \tan \alpha}{H_i \sin \varphi} & \frac{\Delta D_z}{H_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

der φ er gitt i Likning (2.45).

Når $\alpha \rightarrow 0$, kan man bruke følgende tilnærming:

$$\begin{bmatrix} R \\ D \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \frac{\Delta D_x}{L_i} & \frac{\Delta D_x}{L_i \tan \varphi} & \frac{\Delta D_z}{H_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

der $\varphi \approx \cos^{-1}(\Delta R_x/L_i)$.

Sammenligning med modeller gir sannsynligvis sikrest resultat når det benyttes ISAR-bilder med stor profilkomponent og liten plankomponent, dvs når ΔD_z er stor og ΔD_x er relativt liten.

2.3.4 Mulighet for sammenligning med fotografier

I det spesialtilfellet at skipet ikke har noen yaw-bevegelse reduseres Likning (2.49) til:

$$\begin{bmatrix} R \\ D \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\Delta D_z}{H_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

der $\varphi \approx \cos^{-1}(\Delta R_x/L_i)$.

Fra Likning (2.5) ser man at projeksjonen uttrykt ved Likning (2.50) har samme form som en projeksjon i x_2 - z -planet definert på Figur 2.6. Den eneste forskjellen er skaleringsfaktoren $\Delta D_z/H_i$ i z -retning. Dette innebærer at et ISAR-bilde kan sammenlignes direkte med et fotografi dersom fotografiet er tatt fra en aspektvinkel gitt av φ og er strukket i høyderetning slik at høyden av skipet er den samme på fotografiet og ISAR-bildet. Det er en forutsetning at ISAR-bildet har neglisjerbar plankomponent.

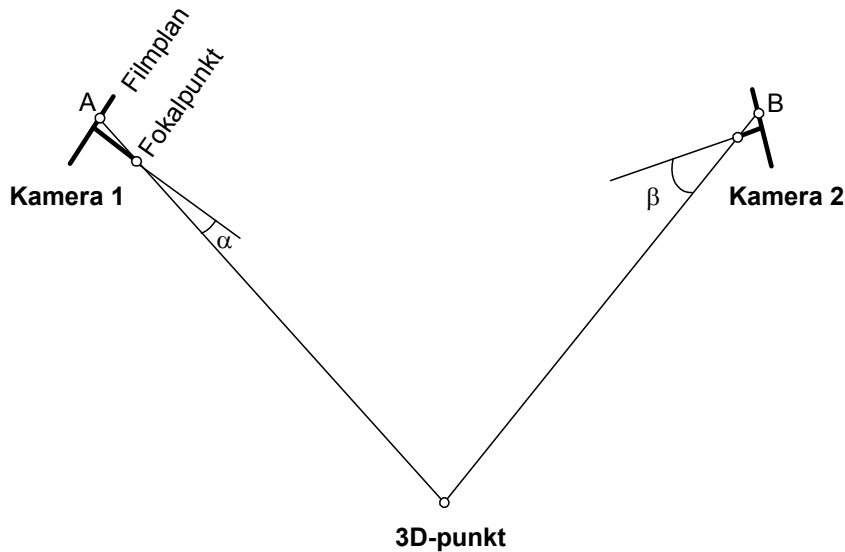
3 MODELLERING FRA FOTOGRAFIER

Klassifiseringsmetoden som er studert i dette prosjektet forutsetter bruk av en database med skipsmodeller. Disse dannes på bakgrunn av fotografier.

3.1 Wireframe-modeller

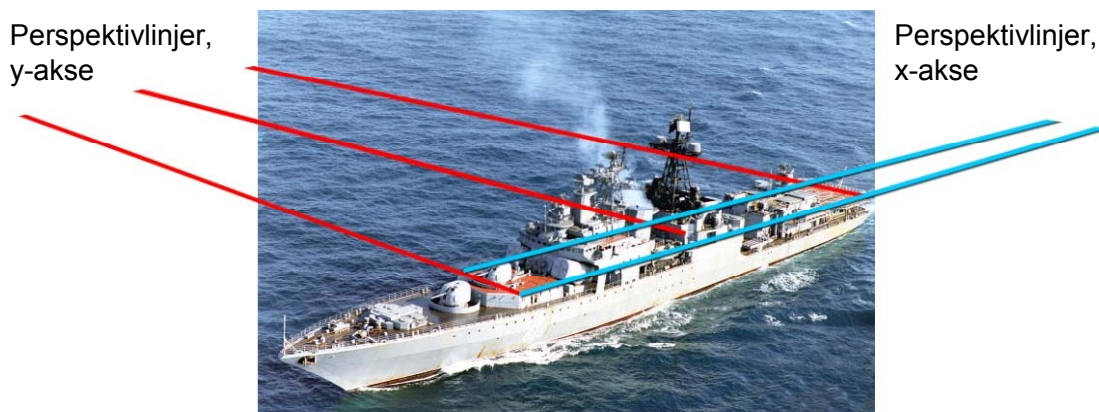
Det er mulig å lage en 3-dimensjonal modell av et objekt basert på fotografier fra ulike vinkler. Når et punkt på objektet er synlig på flere bilder, kan punktet sin posisjon i rommet beregnes. Man kan beregne posisjonene til et stort antall punkter og trekke linjer og ev flater mellom disse. Resultatet er en wireframe-modell. Det finnes kommersiell programvare for modellering fra fotografier etter dette prinsippet. PROFIL delprosjekt 3 har benyttet PhotoModeler Pro 4.0.

Figur 3.1 viser prinsippet for posisjonsbestemmelse av et punkt basert på to fotografier.



Figur 3.1 Prinsipp for posisjonsbestemmelse av et punkt

3D-punktet sin posisjon kan beregnes hvis man kjenner posisjonen og orienteringen til de to kameraene, samt vinklene α og β som er gitt av kameraenes fokallengder og punkt A og B sin plassering på filmen. Skip kan sjelden fotograferes under kontrollerte forhold fra kjente kameraposisjoner. Man må isteden estimere kameraenes posisjoner og orientering fra bildene. Dette gjøres ved å sette betingelser for geometrien ut fra kjent informasjon om skipet, f eks linjer som man vet er parallelle eller står normalt på hverandre. Det trengs lite informasjon fra bildet hvis man benytter et kamera som er kjent i detalj og kalibrert for dette formålet. Det er bl a viktig at fokallengden er kjent med stor nøyaktighet, noe som utelukker bruk av zoom. Hvis det benyttes bilder som er tatt med zoom eller et ukjent kamera, må fokallengden estimeres fra bildene. Dette medfører visse begrensninger for hvilke fotografier som kan brukes. Skipet må være fotografert fra en vinkel hvor perspektivet er tydelig, se Figur 3.2. I praksis betyr dette som regel flyfoto fra relativt kort avstand.



Figur 3.2 Fotografi hvor man kan se perspektivlinjer mot 2 forsvinningspunkter

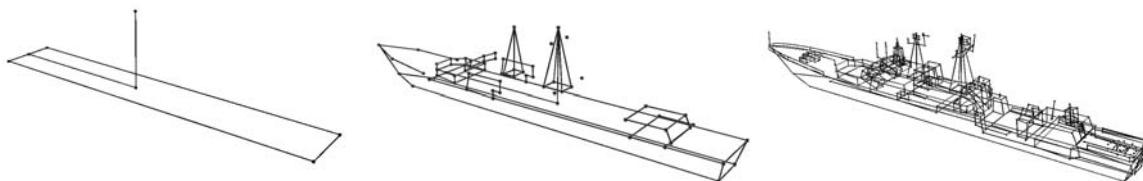
De delene av skipet som skal modelleres må være synlige på minst 2 bilder. Firkantede objekter må fotograferes fra 4 retninger, på skrå mot hjørnene, for at alle sidene skal være synlige. De fleste skip har imidlertid en symmetrisk form som gjør at man kan speile et bilde av styrbord side og bruke det som et bilde av babord side. Dermed trenger man kun 2 fotografier, ett på skrå bakfra og ett på skrå forfra. Et eksempel på bilder som er brukt for å lage en modell er vist på Figur 3.3.



Figur 3.3 Skjerm bilde fra PhotoModeler som viser de bildene som er brukt for å lage wireframe-modell av en Udaloy-klasse jager

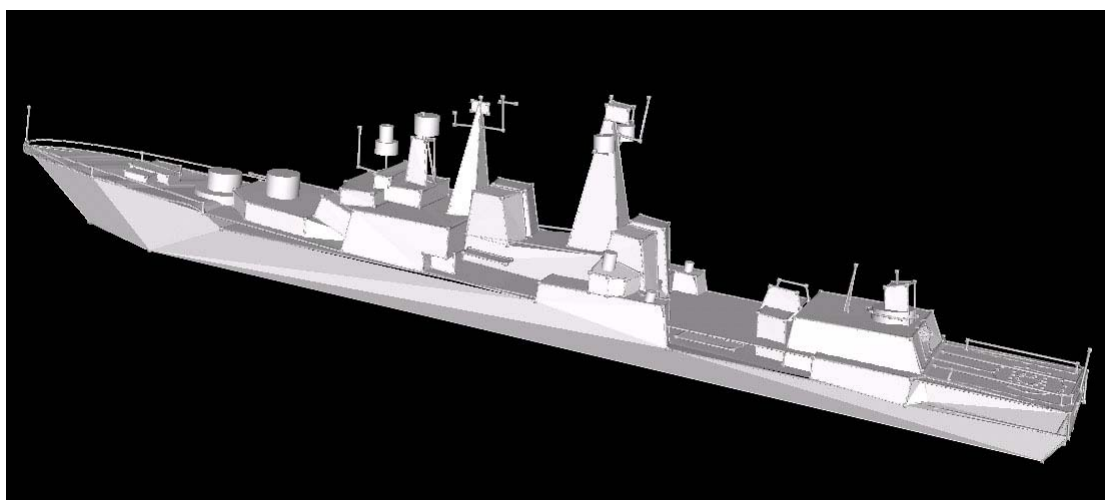
Når man bygger en wireframe-modell, er det hensiktsmessig å starte med noen få linjer som er parallelle med aksene. Man kontrollerer at forholdet mellom lengde, bredde og høyde blir som

forventet. Deretter legger man til nye linjer og flater til modellen er tilstrekkelig detaljert, se Figur 3.4.



Figur 3.4 Bygging av wireframe-modell. Fra venstre: 7 punkter, ca 70 punkter og ca 400 punkter

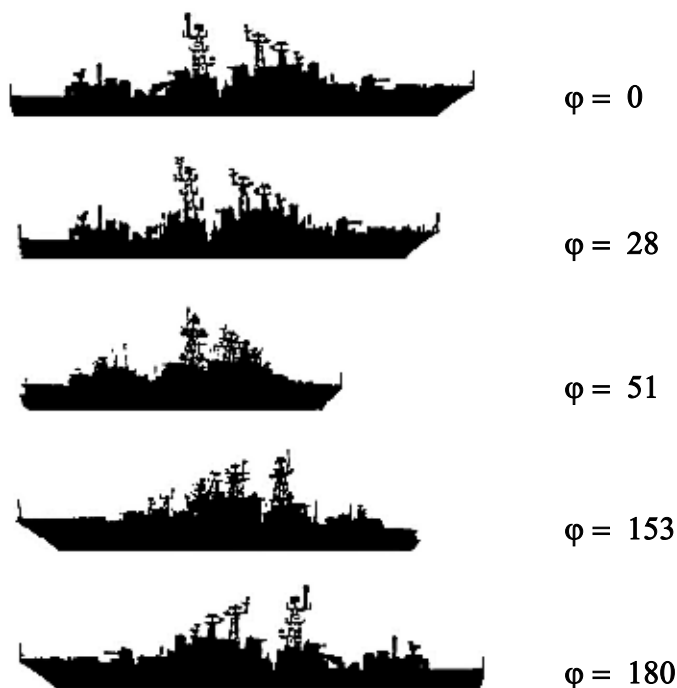
Den ferdige modellen er vist på Figur 3.5. Modellen kan lagres som en tabell med xyz-koordinater og importeres til f eks MATLAB.



Figur 3.5 Modell laget på bakgrunn av fotografiene på Figur 3.3

3.2 Silhuetter

Hvis man ikke har mulighet til å lage en 3-dimensjonal modell av skipet, kan man i visse tilfeller benytte en serie av silhuetter fra ulike aspektvinkler. Et eksempel er vist på Figur 3.6. Det er ønskelig med et betydelig antall silhuetter for hvert skip.



Figur 3.6 Silhuetter av et skip som observeres fra ulike aspektvinkeler. (φ er vinkelen mellom skipets baugretning og siktelinja fra radaren når silhuettene skal sammenlignes med avstandsprofiler fra en radar)

Silhuettene dannes fra fotografier. Bildene bør være tatt fra havnivå, og gjerne fra relativt lang avstand for å unngå feil pga perspektiv. Man skiller først bildet av skipet fra bakgrunnen. Dette er enklest hvis bakgrunnen består av ensfarget himmel. Man kan f.eks. benytte standard bildebehandlingsfunksjoner i programmer som Corel Photo-paint eller Adobe Photoshop. Figur 3.7 viser et bilde og resultatet etter at omgivelsene er klippet bort, kontrasten er økt og det er foretatt terskling og en liten rotasjon.



Figur 3.7 Bilde av et skip og den ekstraherte silhuetten

Aspektvinkelen estimeres med utgangspunkt i forholdet mellom skipets lengde og høyde. Hvis dette forholdet ikke er kjent, kan det finnes fra et bilde som er tatt rett fra siden. Aspektvinkelen estimeres ved likningen:

$$\varphi = \cos^{-1} \left(\frac{L_2 / H_2}{L_1 / H_1} \right) \quad (3.1)$$

der L_1 og H_1 er skipets lengde og høyde på et bilde som et tatt rett fra siden og L_2 og H_2 er skipets lengde og høyde observert fra en annen aspektvinkel.

4 KLASSIFISERING AV SKIP BASERT PÅ WIREFRAME-MODELLER

Automatisk klassifisering av skip fra ISAR-bilder er et felt som det foregår forskning på i flere land, men hvor få resultater publiseres. Det er sparsomt med informasjon om de konkrete metodene som er i bruk og ytelsen som er oppnådd. I PROFIL delprosjekt 3 er det benyttet en metode basert på wireframe-modeller som det er kjent at Naval Research Laboratory i USA har forsøkt tidligere (4). Algoritmen er implementert i Matlab og testet på virkelige ISAR-dataopptak. Dette kapitlet beskriver metodene som er undersøkt og de konkrete funksjonene som er implementert.

4.1 Valg av klassifiseringsmetode

Det finnes flere strategier for å oppnå automatisk klassifisering av skip fra ISAR-bilder. I alle tilfeller må man ha en viss kjennskap til de ulike skipsklassene på forhånd. Man kan benytte målte radarsignaturer eller ulike former for modeller.

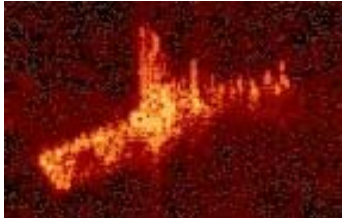



En database med ISAR-bilder av kjente skip kan benyttes for å lage referansebilder, såkalte "templates" som ukjente ISAR-bilder sammenlignes med. ISAR-bildene kan også brukes til å trene et nevralt nett, som deretter er i stand til å kjenne igjen skip på nye bilder. Disse metodene forutsetter at man har samlet inn tilstrekkelig mange ISAR-bilder av de aktuelle skipene. Dette er en stor utfordring, da det er svært stor variasjon i ISAR-bildene av ett og samme skip.

I visse tilfeller vil det være mulig å klassifisere skip basert på 2-dimensjonale silhuetter fra fotografier som beskrevet i 2.3.4. Metoden kan trolig være effektiv når det er tydelige forskjeller i fremtredende deler av skipenes silhuetter, bl a mastenes plassering. Den kan være nyttig for en grovsortering av skipsklasser, men antas å være for unøyaktig for detaljert klassifisering.

En mer nøyaktig metode baserer seg på 3-dimensjonale wireframe-modeller. Modellene i databasen roteres og strekkes til samme projeksjon som ISAR-bildet før silhuetten sammenlignes. Det er en forutsetning at formen til skipet trer tydelig frem på ISAR-bildene.

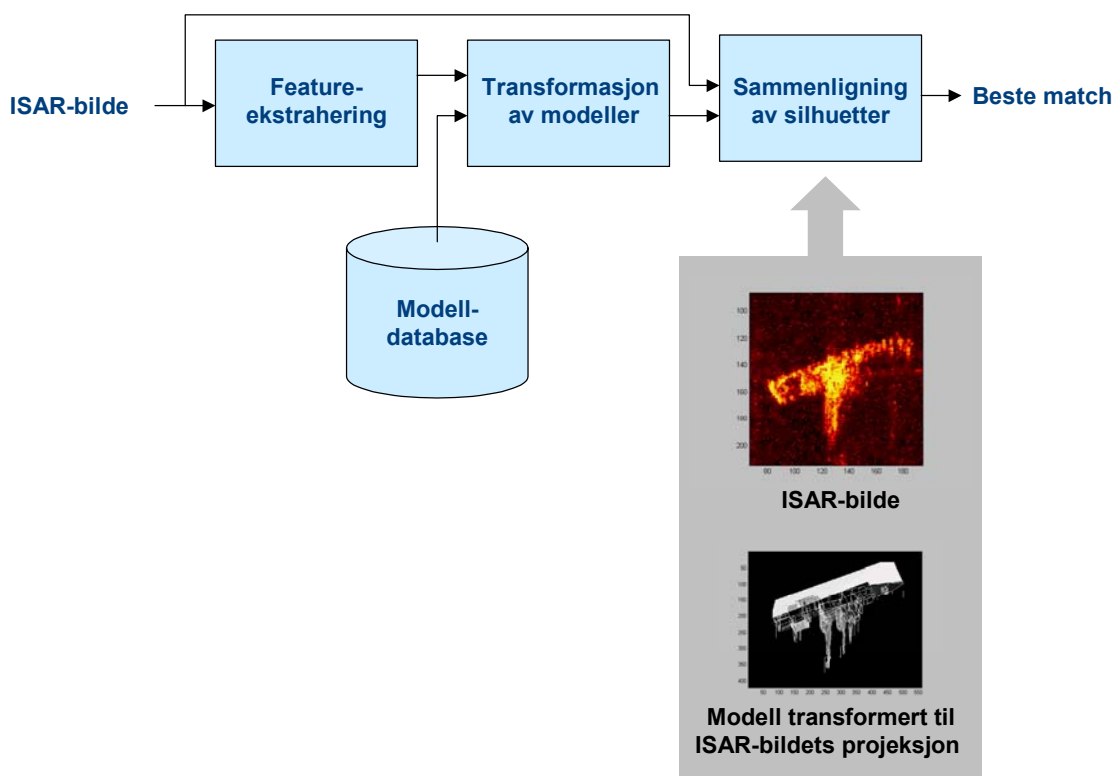
Svært detaljerte og nøyaktige modeller kan benyttes for å prediktere tilbakespredningen fra aktuelle skip. ISAR-bilder av ukjente mål kan da sammenlignes med simulerte ISAR-bilder av modellene i databasen. Det strenge kravet til detaljerte modeller gjør at denne metoden trolig er lite aktuell i praksis.

En oppsummering av fordeler og ulemper ved de ulike klassifiseringsmetodene er gitt i Tabell 4.1.

Signatur- eller modelltype i databasen	Fordeler	Ulemper
 <p>Målte ISAR-signaturer</p>	<p>Ingen modelldatabase.</p> <p>Potensiale for sikker klassifisering.</p>	<p>Behov for et stort antall målte signaturer for hvert skip.</p>
 <p>Silhuetter</p>	<p>Enkelt å bygge opp databasen.</p>	<p>Usikker klassifisering.</p>
 <p>Enkel wireframe-modell</p>	<p>Relativt enkel modellering.</p> <p>Ingen database med målte signaturer.</p>	<p>Behov for modell av alle skip.</p> <p>En viss usikkerhet i klassifisering.</p>
 <p>Detaljert CAD-modell</p>	<p>Ingen database med målte signaturer.</p> <p>Potensiale for sikker klassifisering.</p>	<p>Svært omfattende modellering.</p> <p>Behov for stor regnekraft.</p>

Tabell 4.1 Fordeler og ulemper ved ulike klassifiseringsmetoder

PROFIL delprosjekt 3 har hovedsakelig undersøkt en metode basert på wireframe-modeller. Dette antas å være et fornuftig kompromiss mellom muligheten for å bygge opp en database med enkle midler og ønsket om relativt sikker klassifisering. Hovedblokkene i den implementerte algoritmen er vist på Figur 4.1. En nærmere beskrivelse av hver av blokkene er gitt i de neste delkapitlene.



Figur 4.1 Hovedblokker i den implementerte algoritmen for klassifisering basert på wireframe-modeller. En illustrasjon av et ISAR-bilde sammenlignet med en modell er innfelt

Det er i tillegg forsøkt en metode basert på 2-dimensjonale silhuetter. Den benytter første og siste blokk på Figur 4.1, men en annen database. I stedet for én wireframe-modell er det for hvert skip en samling med silhuetter fra ulike aspektvinkler. Denne metoden gir mindre fleksibilitet og nøyaktighet enn bruk av wireframe-modeller som kan transformeres vilkårlig. Til gjengjeld slipper man den tidkrevende jobben med å lage modeller.

I et system for praktisk bruk kan man tenke seg en kombinasjon av de to metodene. Det kan lages wireframe-modeller av viktige mål. For skip som det ikke er nødvendig å klassifisere like detaljert, f.eks. sivile lasteskip og fiskefartøy, kan silhuetter dannet fra fotografier være tilstrekkelig.

4.2 Feature-ekstrahering

Feature-ekstrahering innebærer å analysere ISAR-bildet og estimere et sett av parametre som beskriver målet. Med den klassifiseringsalgoritmen som er valgt er det særlig viktig å bestemme målets plassering og orientering i bildet, slik at modellene kan transformeres til samme projeksjon for sammenligning. Feature-ekstraheringen består i dette tilfellet av:

1. Segmentering.
2. Estimering av skipets lengdeakse og sidekanter.
3. Estimering av bl a baugretning og mastetopp.
4. Forsøk på estimering av skipets absolutte dimensjoner.

4.2.1 Aktuelle bildebehandlingsteknikker

ISAR-data har både amplitude- og faseinformasjon, men i de fleste systemer blir bare amplitudebildene presentert og benyttet i eventuell videre analyse. Typisk får en operatør presentert ISAR-dataene i form av en bildesekvens i en fargeskala med 256 gråtoner. Analysen vil i stor grad bestå av digital bildebehandling. Mange standard bildebehandlingsfunksjoner kan benyttes, men det må også gjøres visse tilpasninger til ISAR-bildenes spesielle egenskaper. Dette avsnittet gir en kort introduksjon til noen av de aktuelle bildebehandlingsteknikkene. For en mer grundig behandling av dette temaet henvises det til den omfattende litteraturen om digital bildebehandling, f eks (5).

4.2.1.1 Romlig filtrering

Det finnes mange former for filtre som kan benyttes på digitale bilder for å redusere effekter av støy og fremheve karakteristiske trekk ved de avbildede objektene. Filtringen består som regel i at man for hvert punkt i bildet forandrer pikselverdien ut fra verdiene i et lokalt område omkring punktet. Det benyttes en maske som glir over alle punkter i bildet. I de fleste tilfeller settes punktet i sentrum av masken lik en vektet sum av alle pikselverdiene innenfor masken. Eksempler på masker med ulike vektfunksjoner er gitt på Figur 4.2.

$$\begin{array}{ccc}
 1/9 \times \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array} &
 1/9 \times \begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & -1 & -1 \\ \hline -1 & 8 & -1 \\ \hline -1 & -1 & -1 \\ \hline \end{array} &
 1/9 \times \begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & 2 & -1 \\ \hline -1 & 2 & -1 \\ \hline -1 & 2 & -1 \\ \hline \end{array}
 \end{array}$$

Figur 4.2 Eksempler på masker med dimensjon 3x3 for romlig filtrering. Fra venstre lavpass, høypass og fremheving av vertikale linjer

Blant de viktigste filtrene kan man nevne:

- Lavpassfilter gjør bildet mer uskarpt slik at støypunkter smøres utover og blir svakere. En ulempe er at også detaljer og skarpe kanter på målet blir diffuse.
- Høypassfilter fremhever skarpe kanter, men kan også fremheve støypunkter.
- Medianfilter setter midterste punkt lik medianverdien til punktene innenfor masken. Det har den fordel at enkeltstående støypunkter fjernes, mens skarpe kanter bevares.
- Filtre for å fremheve vertikale, horisontale eller skrå linjer.

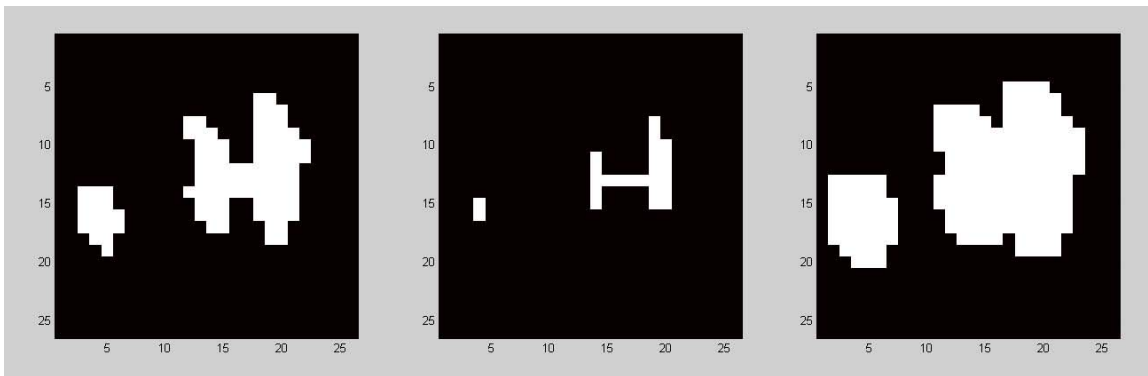
4.2.1.2 Morfologiske operasjoner

Et ISAR-bilde av et mål vil etter filtrering og terskling ofte inneholde en del forstyrrelser, bl a små felter som skyldes clutter. Morfologiske bildebehandlingsoperasjoner kan ofte være effektive for å fjerne slike forstyrrelser. En ulempe er at det medfører mye prosessering å

behandle store bilder med en serie av morfologiske operasjoner. De mest grunnleggende morfologiske operasjonene er erosjon og dilasjon (utvidelse) av binære bilder. Operasjonene benytter en maske kalt et strukturelement som glir over bildet.

- Erosjon: Hvis alle pikselverdiene innenfor strukturelementet er lik 1, settes pikselen i sentrum av masken lik 1. Hvis ikke, settes den lik 0.
- Dilasjon: Hvis minst én av pikselverdiene innenfor strukturelementet er lik 1, settes pikselen i sentrum av masken lik 1. Hvis ikke, settes den lik 0.

Eksempler på erosjon og dilasjon med et strukturelement på 3 x 3 piksler er vist på Figur 4.3.



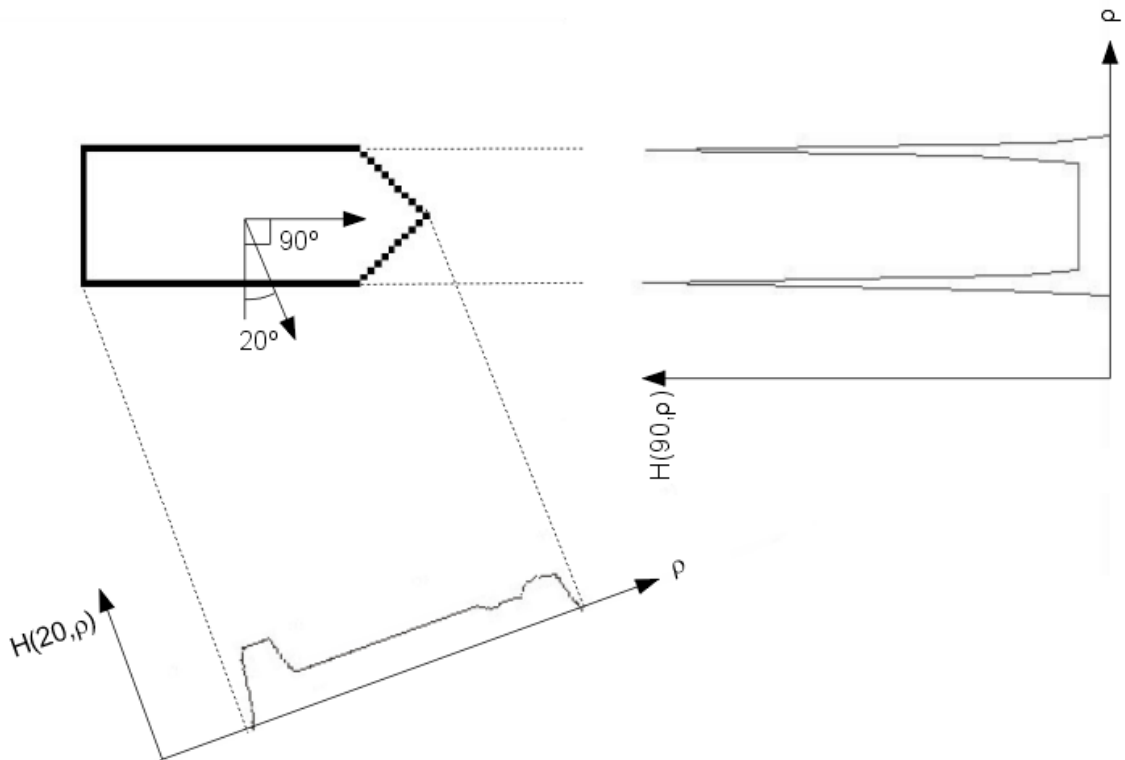
Figur 4.3 Eksempel på erosjon og dilasjon. Til venstre opprinnelig bildeutsnitt, i midten bildeutsnittet etter erosjon, til høyre det samme bildeutsnittet etter dilasjon

Det finnes en mengde andre og mer sammensatte morfologiske operasjoner, bl a:

- Åpning: Erosjon etterfulgt av dilasjon. Denne operasjonen fjerner små støypunkter, mens større objekter i bildet i stor grad bevares.
- Lukking: Dilasjon etterfulgt av erosjon. Benyttes for å fylle igjen små hull og sprekker i objekter i bildet.

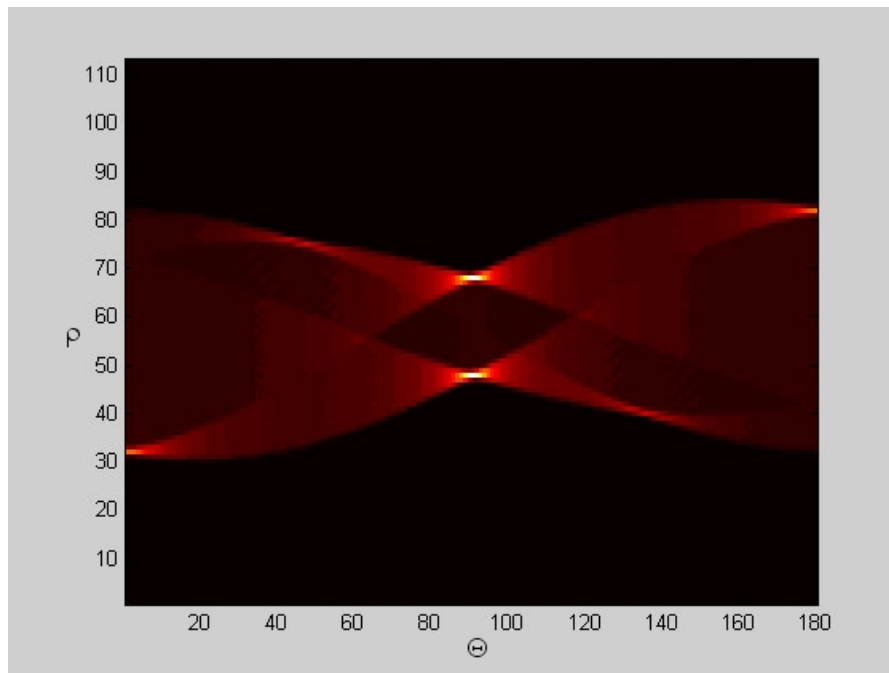
4.2.1.3 Hough-/Radon-transform

Hough-transformen eller den nært beslektede Radon-transformen kan benyttes for å finne rette linjer i et bilde. Metoden er skissert vha et eksempel på Figur 4.4. Man observerer bildet fra ulike vinkler fra 0 til 180° og summerer punktene i bildet langs disse vinklene slik at man får projeksjoner av objektet fra alle vinkler. Disse projeksjonene utgjør den Hough-transformerte av bildet.



Figur 4.4 Hough-transformasjon av omrisset av et skip. Den Hough-transformerte er vist for 20° og 90°

Den Hough-transformerte får høyest verdi der flest punkter i bildet ligger på rett linje. Figur 4.5 viser den Hough-transformerte av skissen på Figur 4.4, og man ser de to toppunktene ved $\Theta = 90^\circ$ som tilsvarer sidekantene til skipet på Figur 4.4.



Figur 4.5 Den Hough-transformerte til det skisserte omrisset av et skip på Figur 4.4

4.2.2 Segmentering

Segmentering av et ISAR-bilde består i å skille målet fra omkringliggende clutter. Det er av stor betydning for den videre analysen at denne operasjonen er vellykket. Hvis deler av målet faller bort eller clutter blir feiltolket som en del av målet, kan det være nytteløst å finne silhuetten til skipet og sammenligne med modeller.

Det er visse utfordringer knyttet til segmentering av ISAR-bilder. Ofte har bildet forstyrrelser i form av striper i cross-range som kan være kraftigere enn viktige deler av målet, se Figur 2.1 og Figur 4.6A. Stripene skyldes bølger eller bevegelige deler på skipet, bl a roterende antenner. Dette gjør at man ikke kan benytte enkel terskling for å skille målet fra bakgrunnen. Det er sjelden vellykket å analysere histogrammet over pikselverdiene for å finne hvor terskelen skal settes. Det er heller ikke gunstig å benytte den samme terskelen over hele bildet.

Valg av segmenteringsalgoritme vil være et kompromiss mellom ytelse og tidsforbruk. I PROFIL delprosjekt 3 er ulike segmenteringsalgoritmer forsøkt, og det er valgt en algoritme som kan oppsummeres i følgende punkter:

1. Filtrering for å redusere effekten av striper i cross-range.
2. Terskling.
3. Morfologiske operasjoner for å finne store felter som er potensielle mål og fjerne små felter som antas å være clutter.
4. Gruppering av områder som antas å tilhøre målet.

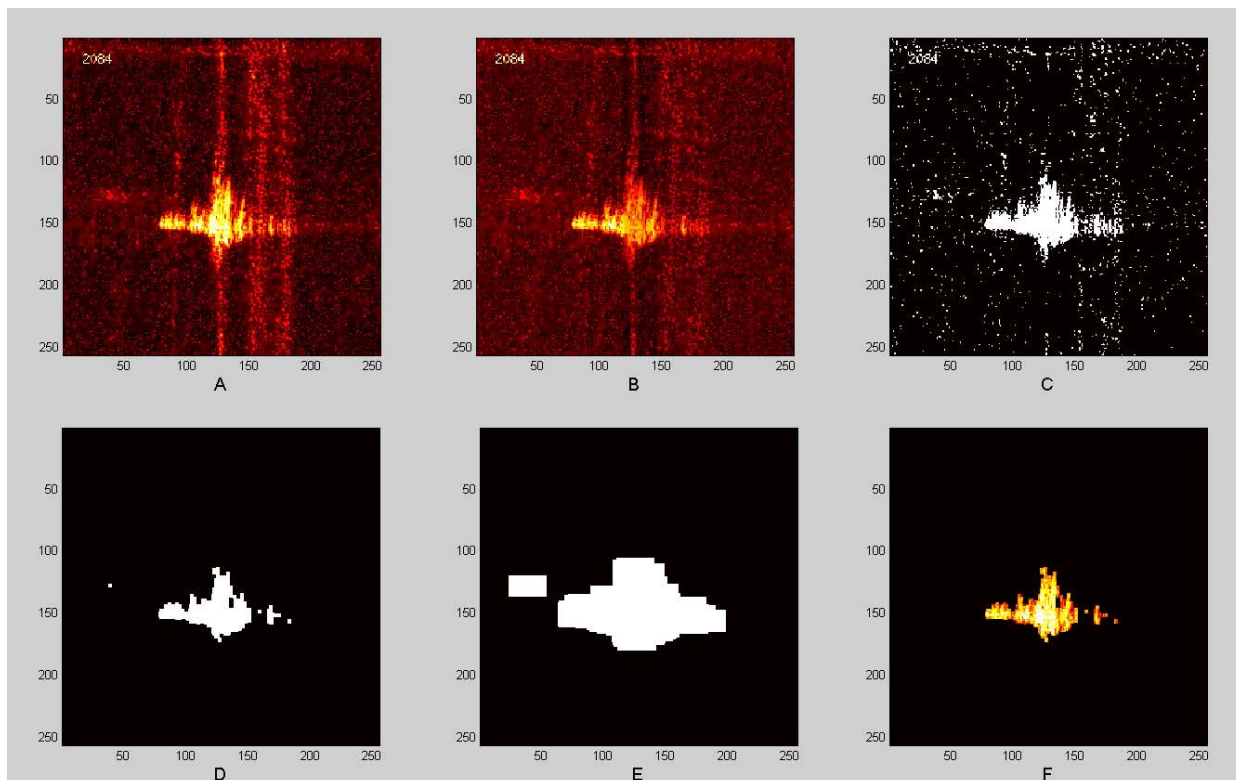
I første punkt detekteres kolonner som har høyere intensitet enn gjennomsnittet i bildet, og disse dempes med f eks inntil 30 %. En ulempe er at også master og lignende blir dempet. Det kan benyttes mer komplekse metoder som skiller bedre mellom clutterstriper og strukturer på målet, men dette vil kreve mye mer prosessering.

Det er en svært krevende oppgave å finne en fornuftig terskel hvis man ikke har noe kjennskap til hvor stor del av bildet som dekkes av målet. Hvis man derimot antar en størrelsesorden for målet, f eks at det utgjør mellom 1 og 5 % av bildeflaten, kan terskelen settes slik at de 5 % kraftigste pikslene i bildet tas med. Man står da igjen med det aller meste av målet, samt noe clutter som man forutsetter kan fjernes i de neste trinnene.

Punkt 3 er basert på en antakelse om at målet består av tette ansamlinger av kraftige piksler, mens clutterpunkter ligger mer spredt. Ulike morfologiske operasjoner kan benyttes. En enkel metode er å foreta morfologisk åpning etterfulgt av lukking.

Før siste trinn i segmenteringsalgoritmen kan det forventes at bildet består av ett eller flere felter som tilhører målet og i tillegg noen få clutterområder. Hvis målet består av flere felter, vil disse danne en tett klynge. En metode for å gruppere objektene i et bilde i klynger er å foreta morfologisk dilasjon med et stort strukturelement og benytte de resulterende objektene som masker. De objektene i det opprinnelige bildet som faller innenfor en og samme maske utgjør en

klynge. Målet antas å være det objektet eller den klyngen som har størst areal. Segmenteringsalgoritmen er vist trinn for trinn på Figur 4.6.



Figur 4.6 Eksempel på segmentering av et ISAR-bilde. A: Det opprinnelige bildet. B: Etter reduksjon av striper i cross-range. C: Etter terskling. D: Etter morfologisk åpning og lukking. E: Masker dannet ved dilasjon med strukturelement på 15×30 piksler. F: Felter i bildet som omfattes av den største masken

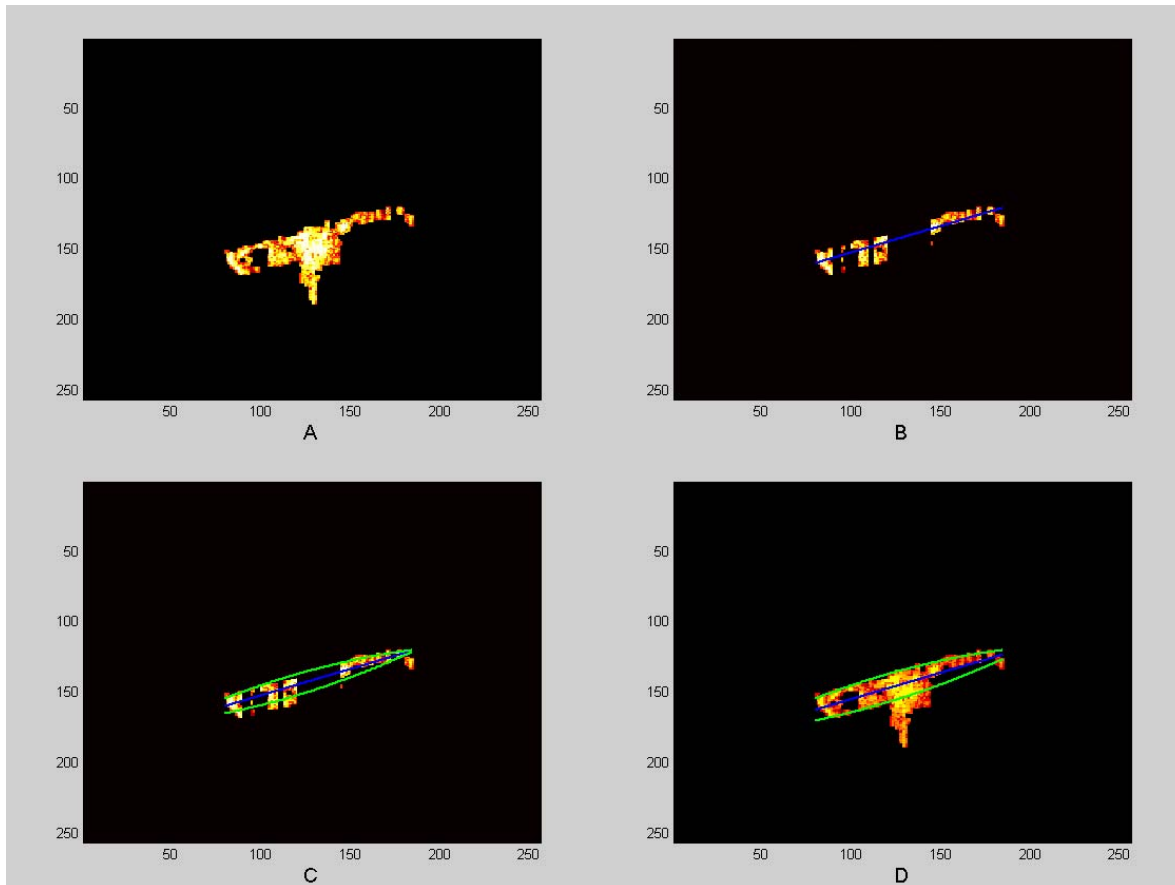
4.2.3 Lengdeakse og sidekanter

Det er svært viktig for den videre analysen at man finner et godt estimat for lengdeaksen til skipet. Dette kan i mange tilfeller være vanskelig. Et viktig problem er at det ofte er mye skygge, slik at bare den ene siden av skipet kommer tydelig frem på ISAR-bildet. Dermed kan man få en forskyvning av lengdeaksen mot den ene siden.

Det kan benyttes flere ulike strategier for å finne lengdeaksen. To av de viktigste er kurvetilpasning med minste kvadraters metode og Hough-transform. Med kurvetilpasning legges en rett linje gjennom målet. Linja følger som regel skroget og kan være et bra estimat for lengdeaksen hvis skipet er avbildet med liten profilkomponent. En stor profilkomponent med høye strukturer vil imidlertid trekke linja opp fra skroget. Med Hough-transform finner man i de fleste tilfeller et brukbart estimat for retningen til lengdeaksen, men linja vil ofte være forskyvet mot den ene sidekanten av skroget. Disse grunnleggende metodene gir ikke tilfredsstillende resultat for de dataene som er undersøkt i PROFIL delprosjekt 3, og det er derfor implementert en mer kompleks algoritme som kan oppsummeres i følgende punkter:

1. Deteksjon av de delene av målet som antas å være skroget.
2. Foreløpig estimering av lengdeaksen ved tilpasning av en linje gjennom skroget.
3. Estimering av den sidekanten til skroget som er nærmest radaren.
4. Estimering den andre sidekanten.
5. Forskyving av lengdeaksen så den ligger midt mellom sidekantene.

Algoritmen er illustrert på Figur 4.7.



Figur 4.7 Eksempel på estimering av lengdeakse og sidekanter. A: Segmentert ISAR-bilde. B: Den delen som antas å være skrog og foreløpig estimat for lengdeakse. C: Første estimat for sidekantene. D: Resultat etter at sidekant og lengdeakse er justert

I første punkt benyttes utstrekningen i cross-range for å avgjøre hvilke deler av målet som er overbygning, master osv og hva som er skrog. Noe over halvparten av range-cellene tas med som skrog. Første estimat for lengdeaksen finnes ved å legge en rett linje gjennom skroget vha minste kvadraters metode. På de dataene som er undersøkt anses dette for å være et akseptabelt estimat for retningen til skipets lengdeakse, men linja har en offset i cross-range som må fjernes i de neste punktene.

Den sidekanten til skipet som er nærmest radaren er den som har minst range-verdi på ISAR-bildet. Det legges en kurve gjennom denne sidekanten, og kurven tilnærmes med en annengradsfunksjon vha minste kvadraters metode. Den andre sidekanten er ofte lite synlig på

bildet pga skygge. For å estimere hvor den befinner seg, lager man først en kurve ved speiling av den nærmeste sidekanten om lengdeaksen. Deretter forskyves kurven i cross-range til det aller meste av skroget faller innenfor. Til slutt forskyves lengdeaksen i cross-range så den ligger midt mellom sidekantene.

4.2.4 Andre parametre i ISAR-bildet

Det er mulig å gi en karakteristikk av skipets form basert på analyse av ISAR-bilder. F eks kan master og overbygning detekteres, og posisjonene og de relative høydeforskjellene mellom disse strukturene kan benyttes i forbindelse med klassifisering. I PROFIL delprosjekt 3 er dette i liten grad undersøkt. Det estimeres kun et minimum av parametre som benyttes i den videre analysen:

- Målets utstrekning i range-retning.
- Plankomponenten, dvs den delen av målet som ligger mellom sidekantene til skroget. Denne inngår i estimeringen av absolutt bredde som blir beskrevet i 4.2.5.
- Baugretningen finnes som den smaleste enden av plankomponenten.
- Profilkomponenten er den delen av målet som ligger utenfor sidekanten.
- Mastetoppen finnes som det høyeste punktet på plankomponenten.

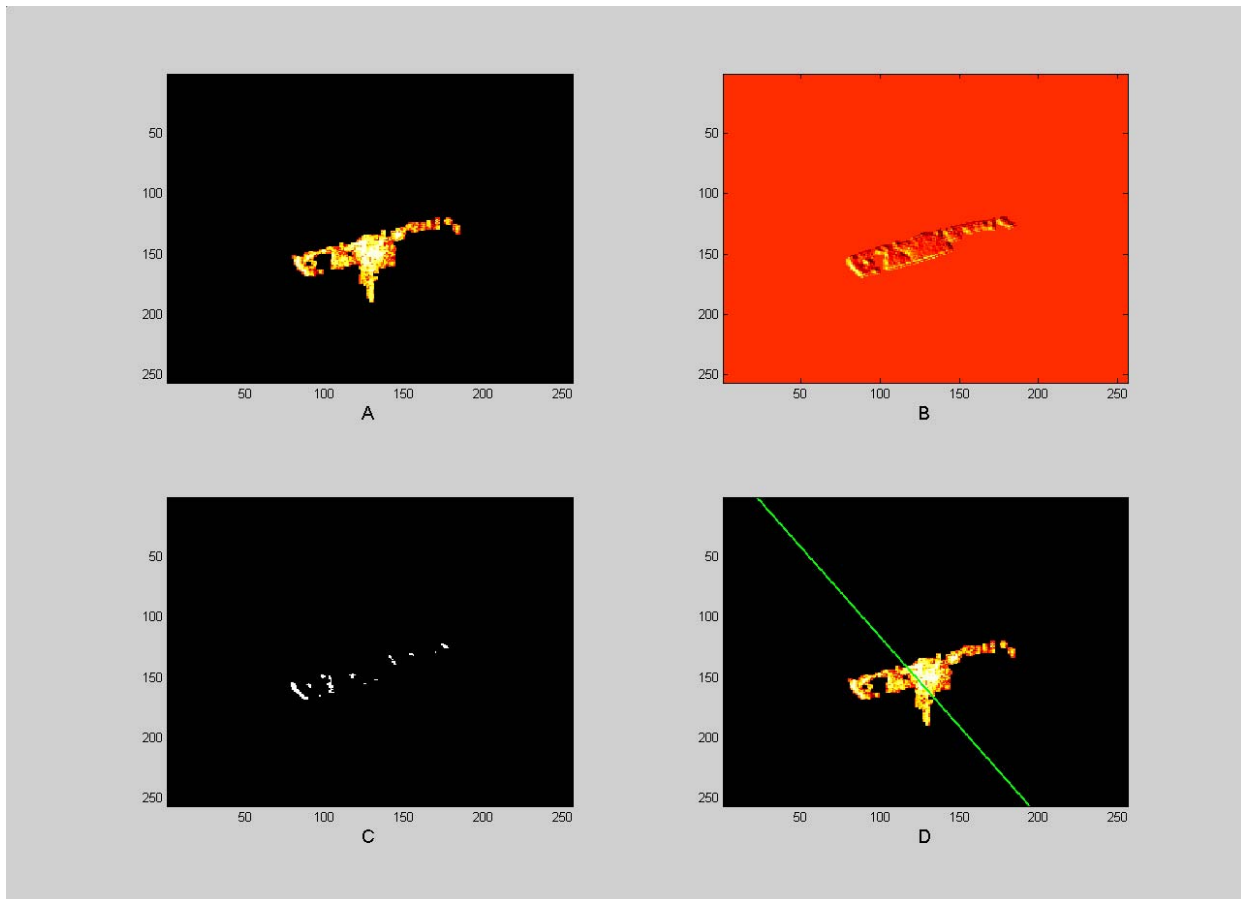
4.2.5 Absolutte dimensjoner

Metoden beskrevet i 2.3.2 kan brukes for å estimere skipets absolutte lengde og bredde hvis man kjenner størrelsene som er kalt ΔR_x , ΔD_x , ΔR_y og ΔD_y på Figur 2.13. Utfordringen i dette ligger i å finne et brukbart estimat for tverraksen. I mange tilfeller er dette ikke mulig, men noen ganger vil målet være avbildet slik at tversgående strukturer trer tydelig frem i ISAR-bildene. Spesielt gjelder dette når et skip med tverr akterende belyses bakfra. Følgende algoritme er benyttet:

1. Filtrering for å fremheve tversgående strukturer.
2. Deteksjon av tversgående strukturer.
3. Hough-transformasjon for å finne retningen til de tversgående strukturene.
4. Estimering av aspektvinkel og absolutte dimensjoner ved innsetting i likninger.

I første punkt benyttes filtre som forsterker positive sprang i intensiteten når man beveger seg på skrå i bildet i tilnærmet samme retning som lengdeaksen. Resultatet er at strukturer som ligger på tvers av denne retningen blir fremhevet. De tversgående strukturene blir detektert ved terskling etterfulgt av en morfologisk operasjon som fjerner de minste feltene. Til slutt Hough-transformeres bildet av de tversgående strukturene slik at den dominerende retningen finnes.

Stigningstallene til tverraksen og lengdeaksen settes inn i Likning (2.31), og man får et estimat for aspektvinkel. Deretter estimeres skipets lengde og bredde ved innsetting i likningene (2.32) og (2.33). Algoritmen er illustrert på Figur 4.8.



Figur 4.8 Estimering av tverrakse. A: Segmentert ISAR-bilde. B: Plankomponenten filtrert for å fremheve tversgående strukturer. C: Detekterte tversgående strukturer. D: Den estimerte tverraksen

4.3 Transformasjon av modeller

Hvis feature-ekstraheringen har vært vellykket, har man nok informasjon om ISAR-bildeplanet til at wireframe-modeller eller ev silhuetter dannet fra fotografier kan transformeres til samme projeksjon som ISAR-bildet.

4.3.1 Transformasjon av wireframe-modeller

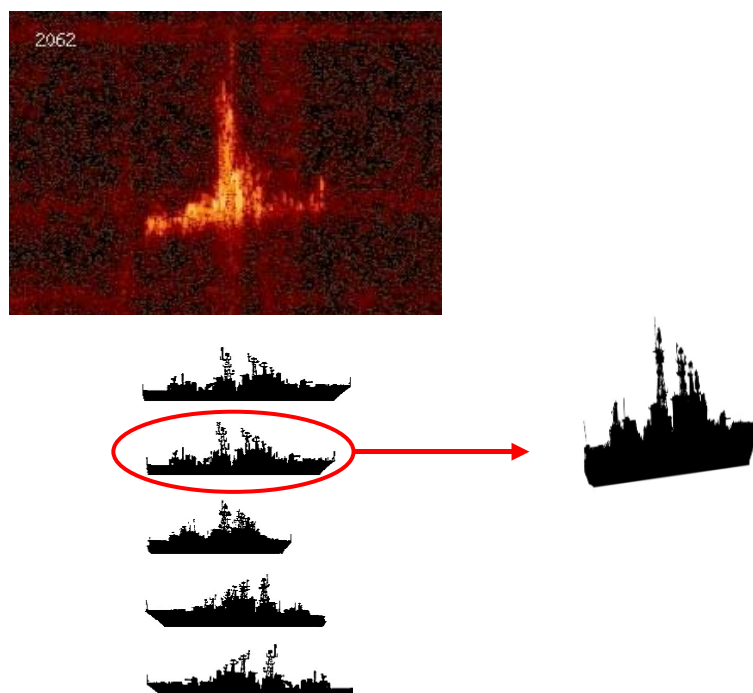
Prinsippet for transformering av wireframe-modeller ble beskrevet i 2.3.3. Forutsetningen for at denne metoden kan benyttes er at størrelsene som er kalt ΔR_x , ΔD_x og ΔD_z i kapittel 2 er estimert med tilstrekkelig nøyaktighet. Det betyr lengdeaksen, baugretningen og mastetoppen til skipet på ISAR-bildet.

I det implementerte programmet benyttes Likning (2.49) for å finne wireframe-modellen sin projeksjon i ISAR-bildeplanet. Alle punkt i modellen blir transformert fra xyz-koordinater til et range-Doppler-koordinatsystem, og linjene og flatene mellom punktene tegnes opp i det nye koordinatsystemet. Figuren gjøres om til et bitmap for den videre analysen som beskrives i 4.4.2.

4.3.2 Transformasjon av silhuetter

Bakgrunnen for bruk av silhuetter fra fotografier ble beskrevet i 2.3.4. Flere betingelser må være oppfylt for at denne metoden kan benyttes. For det første må skipet på ISAR-bildet ha betydelig profilkomponent og neglisjerbar plankomponent. Videre må lengdeaksen, baugretningen og mastetoppen til skipet på ISAR-bildet være estimert med tilstrekkelig nøyaktighet.

For hvert skip i databasen må det være lagret en serie av silhuetter. Prinsippet for transformasjon av silhuetter for sammenligning med ISAR-bildet er illustrert på Figur 4.9.



Figur 4.9 Valg av silhuett og transformasjon for sammenligning med et ISAR-bilde

Den implementerte algoritmen plukker først ut den silhuetten som avviker minst fra ISAR-bildets range-utstrekning. Denne silhuetten strekkes i lengde, høyde og på skrå til samme dimensjoner og vinkel som ISAR-bildet.

4.4 Sammenligning av silhuetter

Sammenligning av former er et aktuelt problem i mange forskjellige sammenhenger. Det foregår mye forskning på robuste og effektive metoder. Et eksempel er metoder for deteksjon av bestemte objekter i fotografier (6). Ofte dreier det seg om stive objekter som kan roteres og skaleres i bildene, men ikke fysisk deformeres. Et annet eksempel er gjenkjenning av håndskrevne tall, kinesiske tegn etc (7)(8). Her er det gjerne stor deformasjon av de opprinnelige formene. En viktig problemstilling i litteraturen om sammenlikning av former er effektivt søk gjennom et stort antall transformasjoner av formene. Problemstillingen i vårt prosjekt er annerledes og mindre omfattende. Det antas at modellene er transformert til samme projeksjon som målet, men at betydelige deler av målets silhuett kan være falt bort pga skygge, samt at det

kan forekomme mye støy. Det er sett på ulike metoder og gjort en foreløpig implementasjon av en relativt enkel algoritme.

4.4.1 Metoder for sammenligning av former

Metodene for sammenligning av former kan grupperes i en rekke kategorier. Blant de viktigste kan man nevne (9):

- Metoder som utnytter globale egenskaper ved objektet, som areal, sirkularitet, eksentrisitet osv. Det benyttes gjerne forhold som er invariante med hensyn på rotasjon, skalering og translasjon. Egenskapene samles i en feature-vektor, og feature-vektorene til målet og modellene sammenlignes.
- Metoder basert på globale beskrivelser av silhuetten, bl a den Fourier-transformerte.
- Metoder som tar utgangspunkt i "landemerker" på silhuetten (10).
- Metoder der objektene er representert ved punktsett, gjerne sampling av silhuettene, og det beregnes et mål på avstanden mellom punktsettene (11). Et mye brukt mål på avstand mellom punktsett er Hausdorff-avstanden. Hausdorff-avstanden mellom punktsettene A og B kan skrives (9):

$$d(A, B) = \max\{\bar{d}(A, B), \bar{d}(B, A)\}, \quad \bar{d}(A, B) = \max_{a \in A} \min_{b \in B} d(a, b) \quad (4.1)$$

der $d(a, b)$ er avstanden mellom punktene a og b. Hausdorff-avstanden kan beregnes ved følgende algoritme:

1. For hvert punkt a i A, finn avstanden til det nærmeste punktet i B.
2. For hvert punkt b i B, finn avstanden til det nærmeste punktet i A.
3. Velg den største verdien blant alle avstandene funnet i punkt 1 og 2.

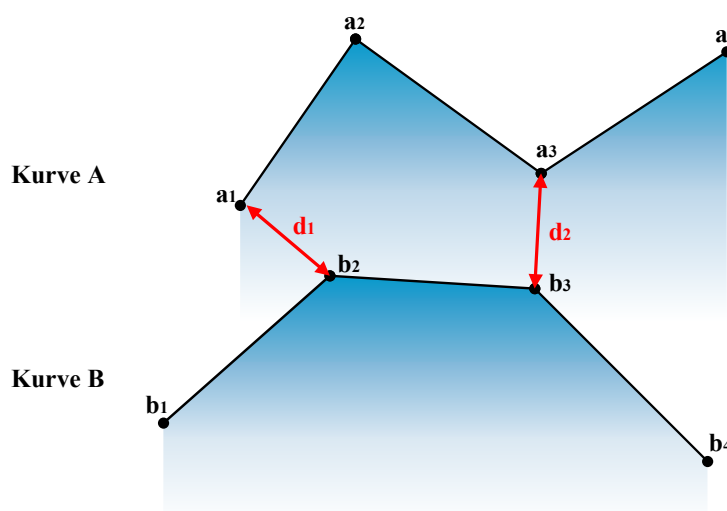
I sin opprinnelige form er Hausdorff-avstanden svært sårbar for støypunkter som ligger langt fra resten av punktene i settet. I praksis setter man derfor visse betingelser som hindrer støy i å få dramatiske konsekvenser for resultatet.

4.4.2 Implementert metode for sammenligning av silhuetter

ISAR-bildet og de transformerte modellene sammenlignes på følgende måte:

1. Silhuettene til ISAR-bildet og de transformerte modellene finnes ved kantdeteksjon.
2. Silhuettene samples med N punkter.
3. Hvis ISAR-bildet og bildet av de transformerte modellene har ulik oppløsning, skaleres silhuettene tilsvarende.
4. For hver modell finner man et mål på avvik mellom modellens og ISAR-bildets silhuett-sampler.
5. Modellen med minst avvik fra ISAR-bildet velges. Hvis flere modeller resulterer i tilnærmet likt avvik, presenteres de for en operatør som foretar det endelige valget.

I den algoritmen som er valgt for punkt 4 antas det at transformasjonen har vært feilfri, slik at silhuettene kan sammenlignes direkte uten noe mer rotasjon, strekking eller forskyving. Hvis denne antakelsen ikke hadde vært gyldig, måtte man benytte iterative metoder som krever svært mye mer prosessering. Hausdorff-baserte metoder viser seg å være lite egnet til å fange opp små forskjeller i silhuettene. Det er implementert en algoritme som kan oppsummeres med utgangspunkt i Figur 4.10.



Figur 4.10 Eksempel på utsnitt fra to silhuetter

1. For hvert punkt a_i i kurve A, finn det nærmeste punktet b_j i kurve B som oppfyller følgende krav:
 - a. Avstanden mellom a_i og $b_j < \text{en maksimalverdi}$.
 - b. Avviket mellom orienteringen til kurve A i punktet a_i og orienteringen til kurve B i $b_j < \text{en maksimalverdi}$. Som et forenklet mål på silhuettens orientering i et punkt har vi benyttet om punktet er en del av en høyre, venstre, over- eller underkant til målet.
2. For hvert punkt b_j i B, finn det nærmeste punktet a_k i A som oppfyller de samme kravene.
3. Plukk ut alle par av punkter fra A og B som gjensidig er nærmeste punkt for hverandre. Dette gjøres for å hindre at et punkt i A blir nærmeste punkt for flere punkter i B og omvendt. Man står da igjen med M punktpar der avstanden mellom punktene i par p kalles d_p , se Figur 4.10.
4. Beregn avviket mellom kurve A og B. Hvis det er lite avvik mellom kurvene, vil det finnes mange punktpar (M vil være stor) og avstandene d_p vil være små.

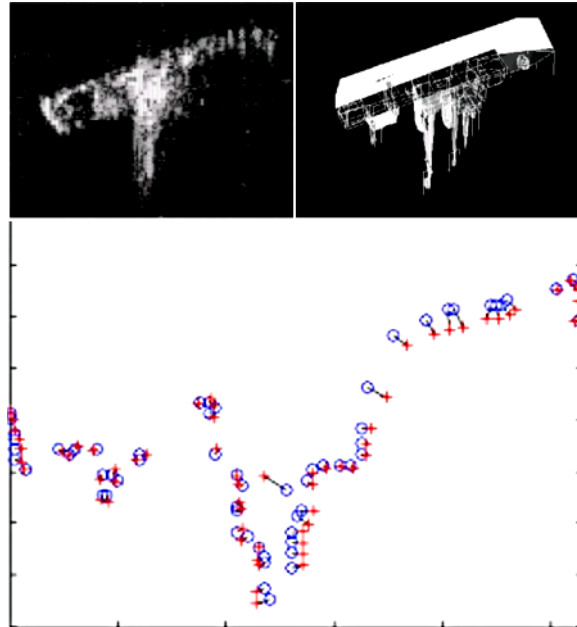
$\frac{M}{N}$ uttrykker hvor stor andel av kurvene som ligger tilstrekkelig nær hverandre.

$\frac{1}{M} \sum_{p=1}^M d_p^2$ uttrykker hvor stort avvik det er mellom disse delene av kurvene.

Som et uttrykk for totalt avvik mellom kurve A og B kan man benytte:

$$E = \frac{N}{M} \frac{1}{M} \sum_{p=1}^M d_p^2 \quad (4.2)$$

Et eksempel på resultatet fra sammenligning av silhuetter er vist på Figur 4.11.



Figur 4.11 Eksempel på silhuettmatching. Øverst ISAR-bilde og en modell (Ikke en modell av det riktige skipet), nederst punktpar som uttrykker avviket mellom silhuetene

5 KONKLUSJON

Denne rapporten presenterer en metode for automatisk klassifisering av skip ved bruk av ISAR. Den gjennomgår teoretisk grunnlag og beskriver en algoritme som er implementert og testet på virkelige ISAR-data.

ISAR-avbildning resulterer i en sekvens av bilder som viser mange ulike projeksjoner av målet. I den teoretiske analysen er sammenhengen mellom skipets rotasjonsbevegelser og ISAR-bildeplan studert. Et uttrykk for transformasjon av en modell til den samme projeksjonen som et ISAR-bilde er gitt i Likning (2.49). Et annet interessant resultat er at skipets absolutte dimensjoner kan estimeres fra ISAR-bilder som oppfyller visse krav. Dette er uttrykt ved likningene (2.31) til (2.33).

Metoden som er valgt for automatisk klassifisering er basert på sammenligning av ISAR-bilder med 3-dimensjonale wireframe-modeller. Det er laget modeller av et utvalg aktuelle skip på bakgrunn av fotografier ved hjelp av den kommersielle programvaren PhotoModeler Pro 4.0. Fotografier av skipene er funnet på Internett. Dette er i prinsippet en svært enkel metode for å

lage wireframe-modeller, men det ville likevel vært en omfattende oppgave å bygge opp en stor modelldatabase på denne måten.

Det er implementert et program i MATLAB som demonstrerer automatisk klassifisering. Hovedtrekkene i algoritmen er som følger: ISAR-bildet blir analysert vha digitale bildebehandlingsfunksjoner, og resultatene benyttes for å transformere wireframe-modellene til samme projeksjon som ISAR-bildet. Deretter blir silhuetten til skipet på ISAR-bildet sammenlignet med silhuettene til de transformerte modellene, og de modellene som viser størst likhet med målet blir presentert for brukeren.

Denne metoden har potensiale for automatisk klassifisering, men det er ukjent hvilken ytelse som kan oppnås i et reelt scenario med en stor skipsdatabase. En av utfordringene vil være tidsforbruket ved testing av mange modeller. Det antas at metoden ikke egner seg alene, men som siste trinn i et større system for automatisk klassifisering av skip. På et foregående trinn må det foretas en rask grovklassifisering av målet for å begrense søket gjennom databasen. Det anbefales derfor å utvikle metoder for grovklassifisering av skip, samt å videreutvikle klassifiseringsmetoden som er beskrevet i denne rapporten med tanke på en mer robust og effektiv algoritme.

Litteratur

- (1) Miceli W J (1998): Small Craft ATR (SCATR), Presentasjon på FFI.
- (2) Wehner D R (1995): High-Resolution Radar, Artech House, 359-364.
- (3) Høye G K et al (2001): NSAT-1: Nye momenter vedrørende kooperative overvåkningssystemer, flerfrekvent sensor samt havbølgers innvirkning på deteksjon og dekning, 2001/05878, UGRADERT
- (4) Musman S, Kerr D, Bachmann C (1996): Automatic Recognition of ISAR Ship Images, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* **32**, 4, 1392-1404.
- (5) Gonzalez R C, Woods R E (1993): Digital Image Processing, Addison-Wesley Publishing Company.
- (6) Olson C F, Huttenlocher D P (1997): Automatic Target Recognition by Matching Oriented Edge Pixels, *IEEE Transactions on Image Processing* **6**, 1, 103-113.
- (7) Belongie S, Malik J, Puzicha J (2002): Shape Matching and Object Recognition Using Shape Context, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **24**, 24, 509-522.
- (8) Cheung K-W, Yeung D-T, Chin R T (1998): A Bayesian Framework for Deformable Pattern Recognition With Application to Handwritten Character Recognition, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **20**, 12, 1382-1388.
- (9) Veltkamp R C, Hagedoorn M (1999): State-of-the-Art in Shape Matching, Technical Report UU-CS-1999-27, Utrecht University, Nederland, <http://archive.cs.uu.nl/pub/RUU/CS/techreps/CS-1999/1999-27.pdf>.
- (10) Hill A, Taylor C J, Brett A D (2000): A Framework for Automatic Landmark Identification Using a New Method of Nonrigid Correspondence, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **22**, 3, 241-251.
- (11) Zhang Z (1994): Iterative Point Matching for Registration of Free-Form Curves and Surfaces, *International Journal of Computer Vision* **13**, 2, 119-152.