

FFI RAPPORT

TERRENGREFERERT POSISJONERING FOR UNDERVANNSFARKOSTER

MANDT, Magne

FFI/RAPPORT-2001/05900

FFIE/0771-U/132.1

Godkjent
Kjeller 18 Desember 2001

Jon Mikael Størdal
Forskningsjef

**TERRENGREFERERT POSISJONERING FOR
UNDERVANNSFARKOSTER**

MANDT, Magne

FFI/RAPPORT-2001/05900

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

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-2001/05900	2) SECURITY CLASSIFICATION UNCLASSIFIED	3) NUMBER OF PAGES 42
1a) PROJECT REFERENCE FFIE/771-U/132.1	2a) DECLASSIFICATION/DOWNGRADING SCHEDULE -	
4) TITLE TERRENGREFERERT POSISJONERING FOR UNDERVANNSFARKOSTER TERRAIN REFERENCED POSITIONING FOR UNDERWATER VEHICLES		
5) NAMES OF AUTHOR(S) IN FULL (surname first) MANDT, Magne		
6) DISTRIBUTION STATEMENT Approved for public release. Distribution unlimited. (Offentlig tilgjengelig)		
7) INDEXING TERMS IN ENGLISH:		
a) <u>Terrain Correlation</u>		IN NORWEGIAN:
b) <u>Bathymetric Navigation</u>		a) <u>Terrenkkorrelasjon</u>
c) <u>Point Mass Filter</u>		b) <u>Batymetrisk navigasjon</u>
d) <u>TERCOM</u>		c) <u>Punktmassefilter</u>
e) <u>Terrain Characterisation</u>		d) <u>TERCOM</u>
		e) <u>Terrenkarakterisering</u>
THESAURUS REFERENCE:		
8) ABSTRACT This report deals with terrain referenced positioning of underwater vehicles, also known as terrain correlation. There is no fundamental difference from airborne platforms. The report treats search methods and gradient methods. The search methods Point Mass Filter and TERCOM are treated in detail and results are given. The principle behind gradient methods is described, and results from FFIBM are presented. A short description of possible terrain characterisation functions is given. The report concludes that the Point Mass Filter is the best method of those treated.		
9) DATE 18 December 2001	AUTHORIZED BY This page only Jon Mikael Størdal	POSITION Director of Research

ISBN-82-464-566-7

UNCLASSIFIED

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE
 (when data entered)

INNHOLD

	Side	
1	BAKGRUNN	7
2	METODETYPER	8
2.1	Søkemetoder	8
2.2	Gradientbaserte metoder	8
2.3	Andre	9
2.3.1	VATAN	9
3	KART	10
3.1	Feil i kart og kartoppslag	10
3.1.1	Global feil	10
3.1.2	Lokal feil	10
3.1.3	Feilmodell	11
4	SENSORER	11
4.1	Sonarer	11
4.2	Laser	11
4.3	Feil i dybdemålinger	11
4.3.1	Feilmodell	12
5	PUNKTMASSEFILTERET (PMF)	13
5.1	Prinsippskisse	14
5.2	Den analytiske algoritmen	14
5.2.1	Bayes formel	14
5.2.2	Posisjonsfeil og dybdedifferanser	14
5.2.3	Måleoppdatering i Bayesestimatorene	15
5.2.4	Tidsoppdatering	15
5.3	Implementasjon av algoritmen	15
5.3.1	Måleoppdatering	16
5.3.2	Tidsoppdatering	16
5.3.3	Initiering	17
5.3.4	Kjent posisjonsendring	17
5.3.5	Vedlikehold	17
5.3.6	Konvergenzkriterium	17
5.3.7	Korrelerte differanser	18
6	TERCOM	18
6.1	Prinsipp	18
6.1.1	Konvergens- og integritetssjekk	20
6.1.2	Standardavvik	21
6.1.3	Global dybdefeil	21

7	ERFARINGER MED SØKEMETODENE	21
7.1	Standardavvik og fordeling	22
7.2	PMF, konvergens og standardavvik	24
7.3	TERCOM og global posisjonsfeil	27
7.4	Global dybdefeil og terreng som gjentar seg	27
7.4.1	PMF	29
7.4.2	TERCOM	30
7.5	Oppsummering	31
8	GRADIENTMETODER	31
8.1	Måleligning	32
8.2	Multiple filtre	32
8.3	TERPROM	32
8.4	Resultater	33
8.5	Hvorfor bruke SITAN evt TRIN	33
9	SIMULTAN KARTLEGGING OG LOKALISERING	34
9.1	Områdekartlegging	34
9.2	Forbedring av posisjonsestimat	34
9.2.1	Manøveroppdatering	34
10	TERRENGKARAKTERISERING	35
10.1	Informasjonsinnhold og gradient	35
10.2	Standardavvik	35
10.3	Frekvensinnhold	35
10.4	Repetivitet/Unikhet	36
10.5	Simuleringsresultat	36
11	KONKLUSJON	37
	LITTERATUR	39
APPENDIKS		
A	AKRONYMER OG FORKORTELSER	40
	Fordelingsliste	42

TERRENGREFERERT POSISJONERING FOR UNDERVANNSFARKOSTER

1 BAKGRUNN

Denne rapporten er en av tre rapporter som drøfter forhold omkring navigasjonssystem for nye norske undervannsbåter. I (1) drøftes krav og scenarier for navigasjonssystemet, i (2) sensorer og sensorintegrasjon og i herværende rapport gis en detaljert gjennomgang av en del metoder for terrengreferert posisjonering.

Både ubåter og andre undervannsfarkoster har behov for å kunne finne sin posisjon med god nøyaktighet uten å måtte være avhengig av GPS eller andre eksterne kilder. Dette er både fordi GPS og lignende ikke nødvendigvis er tilgjengelig, og også ut fra operasjonelle krav. For ubåter er det å bryte overflaten røpende, for andre farkoster som opererer på dypt vann kan posisjonsfeilen utvikle seg så mye på turen fra overflaten og ned til arbeidsdybden at GPS-nøyaktigheten går tapt, i tillegg koster det tid og energi å gå fra arbeidsdybde til overflaten. Terrengreferert posisjonering gjør det mulig å oppnå posisjonering med god nøyaktighet uten å måtte gå til overflaten.

Terrengreferert posisjonering vil si å finne sin posisjon i terrenget ved å måle egenskaper ved det og sammenligne målingen(e) med en terrengdatabase for å finne posisjonen. Posisjonen vil da være direkte referert bare til terrengdatabasens koordinatsystem, dersom denne i sin tur har et globalt referansesystem vil man også få global posisjon. Terrengreferert posisjonering kalles gjerne terrengkorrelasjon, dette er imidlertid ikke et dekkende uttrykk for en del av metodene som kan brukes. Vi har derfor i denne rapporten valgt det mer omfattende uttrykket 'terrengreferert posisjonering'.

I denne rapporten vil egenskapen som måles hele tiden være terrengets dybde, og terrengdatabasen vil være et digitalt dybdekart. Det er prinsipielt ikke noe i veien for å bruke ekvivalente metoder med f eks tyngdekraftsmålinger eller magnetfeltsmålinger.

De samme metoder som brukes under vann kan også brukes av overflate- og luftfartøyer. For luftfartøyer vil det gjerne være snakk om å bruke kart med større gridstørrelse, andre feilkilder som f eks vegetasjon osv, men prinsippene og metodene er de samme. I noen sammenhenger er det blitt skilt mellom bunnkorrelasjon (under/i vann) og terrengkorrelasjon (fra luft). Ettersom prinsippene er de samme, ser vi ingen grunn til å følge dette skillet.

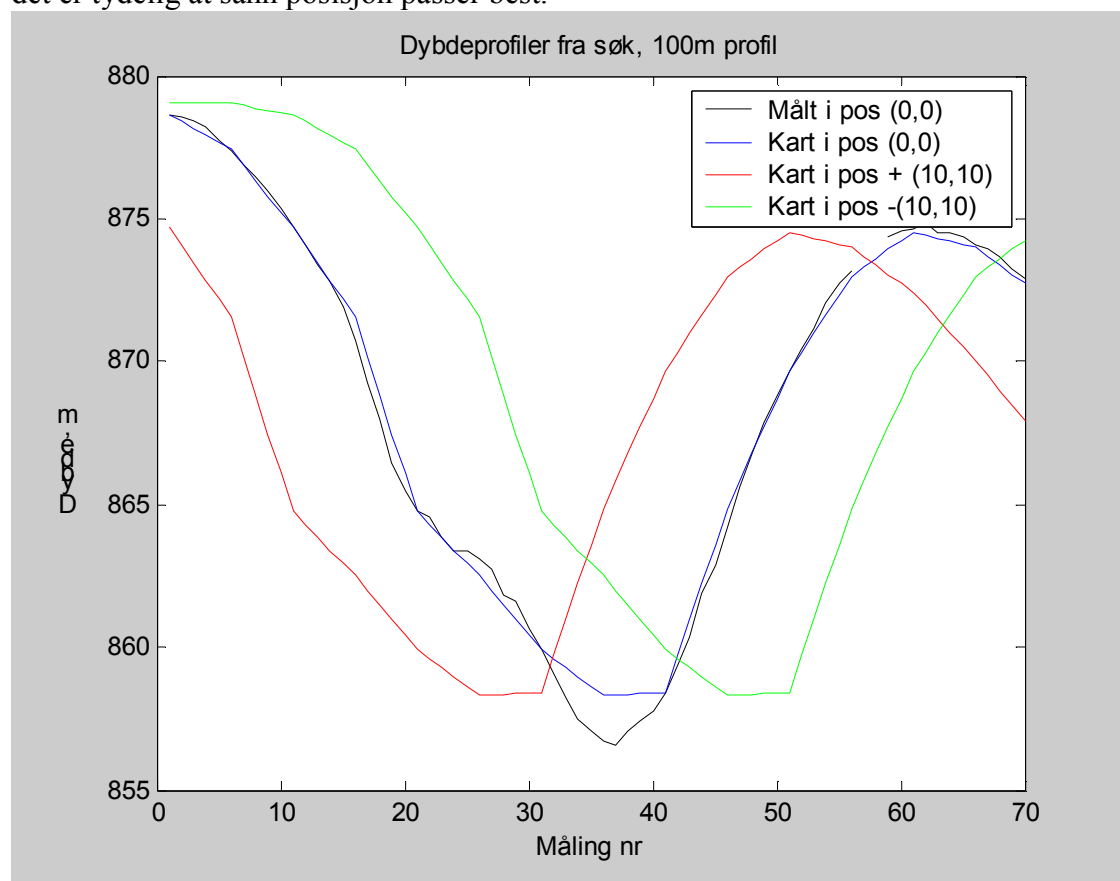
Det er også mulig å posisjonere seg ved hjelp av objekter i terrenget (stein, vrak, kabler osv). Metoder for dette vil ikke bli drøftet her.

2 METODETYPER

Metodene som brukes til terrengreferert navigasjon kan deles i forskjellige typer alt etter hvordan de finner posisjonen. Felles for alle metoder er at man må ha en antatt posisjon som utgangspunkt, hvor stor feil denne kan ha varierer med metode, terreng osv. I tillegg må terrenget ha variasjon, det er ikke mulig å posisjonere seg i forhold til flat bunn.

2.1 Søkemetoder

I søkemetoder sammenligner man en målt dybdeprofil med kartet i et område rundt antatt (nominell) posisjon, og velger den posisjonen som passer best. 'Passer best' vil ofte si at den minimaliserer eller maksimaliserer en eller annen kriteriefunksjon. I denne rapporten er PMF og TERCOM søkemetoder. I forbindelse med søkemetoder er konvergens og konvergenskriterier sentrale begrep: et søk har konverget når det gir et entydig posisjonsestimat som ikke endrer seg med nye målinger, konvergenskriteriet er vår definisjon av entydighet. Merk at søket ikke nødvendigvis har konverget til sann posisjon. Det et konverget søk gir er et posisjonsestimat, med større eller mindre feil. Figur 2.1 viser målt profil og forskjellige profiler fra et søk, hvor det er tydelig at sann posisjon passer best.

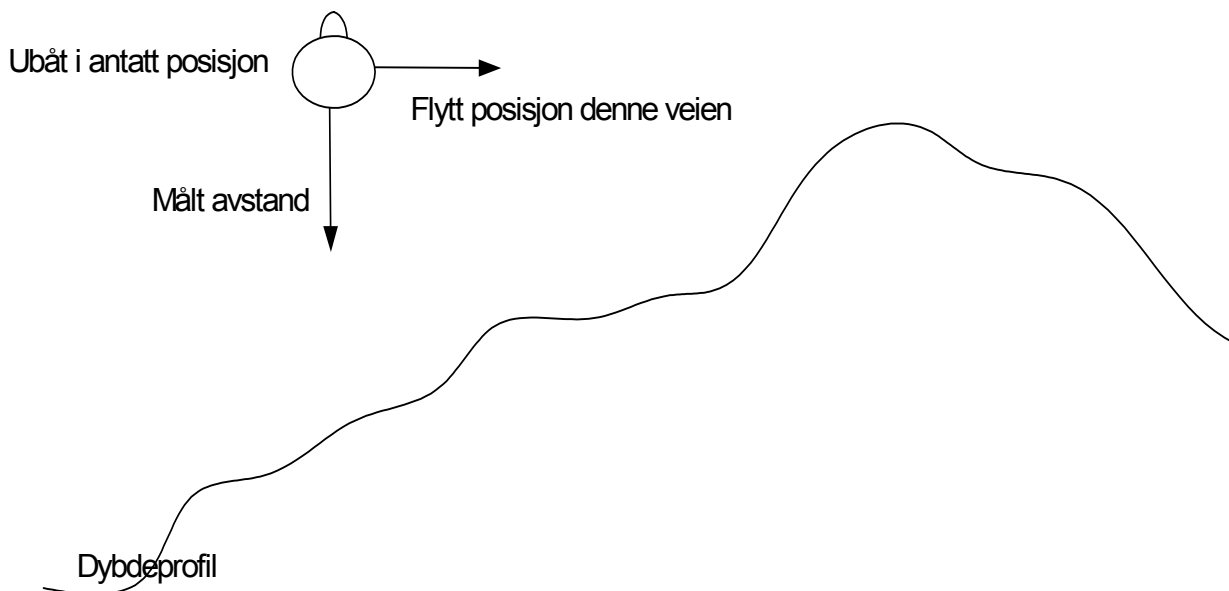


Figur 2.1: Målt profil og kandidatprofiler

2.2 Gradientbaserte metoder

Gradientbaserte metoder baserer seg på å modellere terrengets dybdeendring rundt antatt

posisjon på en eller annen måte, gjerne lineært. Når man så får en måling av terrengdybden følger man gradienten i den retningen den målte dybden indikerer, dvs man går mot større dyp hvis målt dybde er større enn kartdybde osv, se Figur 2.2. Gradientbaserte metoder implementeres gjerne i et Kalmanfilter. I denne rapporten er metodene representert av SITAN og TRIN. Ved FFI har det vært gjort en god del arbeid med gradientfølgende metoder ved BM, og mye stoff i denne rapporten stammer derfra.



Figur 2.2: Prinsipp for gradientfølging

2.3 Andre

Det er presentert en del andre metoder for terrengreferert navigasjon som vi av forskjellige grunner ikke har undersøkt i detalj.

2.3.1 VATAN

VATAN står for Viterbi Algorithm Terrain Aided Navigation. Metoden kan ses på som en blanding av søkemetoder og filtermetoder. Den finner den mest sannsynlige posisjonen blant et sett kandidater ved hjelp av optimaliseringsteknikken ”dynamisk programmering”. Metoden er meget regneintensiv, men hevdes å ha gode konvergenssegenskaper¹. Metoden er vanskelig å implementere, og dokumentasjonen av metoden i (3) viser at den kan gi stor feil uten å indikere det. Denne metoden er derfor ikke fulgt opp nærmere.

Det finnes også hva man kan kalle tilstøtende metoder, som billedbasert navigasjon og objektgjenkjenning. Disse metodene vil ikke bli drøftet her.

¹ Simuleringene i den refererte artikkelen viser at metoden er kraftig forventningsskjev i det aktuelle terrenget, uten at det er kommentert nærmere.

3 KART

Kart, eller mer generelt terrengdatabaser, kan være på mange forskjellige format: faste grid, varierende med terrengvariasjon osv. De vil selvsagt også kunne ha forskjellig kvalitet og oppløsning. I denne rapporten er det i hovedsak brukt kart med fast grid på 10m horisontal oppløsning. Det er ikke noe i metodene som krever fast oppløsning, det avgjørende for disse er kvaliteten på dataene man får ved oppslag i databasen. Oppslaget vil typisk inneholde en metode for å interpolere mellom punkter i kartet. For posisjonsbestemmelse i globale koordinater må kartene knyttes til en jordmodell (ellipsoide) som gir sammenhengen mellom globale og lokale koordinater. Aktuelle ellipsoider er ED50 (European datum 1950) og WGS84 (World Geodetic System 1984). ED50 brukes mye av oljeindustrien i Nordsjøen. Det er mulig å regne seg fram og tilbake mellom ellipsoidene. Bunnkart med en horisontal punktoppløsning på 50m eller bedre er graderte, det er også begrensinger på dybdekurver uavhengig av oppløsning på rådata. I denne rapporten vil det derfor ikke bli gitt globale koordinater i kartene.

3.1 Feil i kart og kartoppslag

Feilene i kart og kartoppslag kan deles inn i to typer: global feil og lokal feil.

3.1.1 Global feil

Med en global feil menes at hele kartet er plassert feil i forhold til et globalt referansesystem. Dette kan være feil i både nord, øst og dybde. Kartet vil fortsatt ha de riktige formene, men de vil være plassert feil. En global feil i horisontal posisjon kan ha ulike virkninger. Når vi starter algoritmene med en eller flere posisjoner fra treghetsnavigasjon eller annen ekstern kilde gjør vi oppslag i kartdatabasen i og rundt denne posisjonen, gjerne basert på beregnet posisjonsusikkerhet. Dersom terrenget vi faktisk måler ikke finnes i det området i databasen vil søkemethodene konvergere feil eller ikke konvergere i det hele tatt, mens gradientmetoder vil bruke feil gradient. Dersom terrenget er dekket av den delen av kartdatabasen vi slår opp i, påvirkes posisjoneringen for søkemethoder ved at feilen blir med i resultatet, terrenget har fortsatt riktig form og søkemethodene vil ha (noenlunde) samme konvergenssegenskaper, mens gradientmetoder fortsatt vil kunne få feil gradient. Feilene i horisontal posisjon fra moderne kartlegging med postprossesert dGPS-støtte vil typisk være små, standardavvik 1-2m og vil sjelden være globale. Det er et potensiale for store feil (> 100 m) hvis man opererer i feil datum, f.eks bruker et kart i ED50 datum til å finne posisjon i WGS84. En global feil i dybde kan gi feil posisjonsbestemmelse i det lokale terrenget for terreng som har like former ved forskjellige dybder. Globale feil i dybde bør kunne holdes svært små.

3.1.2 Lokal feil

Lokale feil er både høydefeil i datapunktene og de interpolasjonsfeil som kommer til når vi skal finne dybden mellom gridpunktene. Lokal feil kan føre til at kartet framstiller terrenget med feil form, og slik vanskeliggjøre posisjonsbestemmelse for både søke- og gradientmetoder. Hvor store lokale feil er vil avhenge av kvaliteten på rådataene, måten disse er brukt til å danne kartet på, og hvor god interpolasjonen er i det aktuelle terrenget. Lokale feil kan føre til manglende konvergens og feil konvergens for søkemethodene, feil gradient for gradientfølgende metoder.

3.1.3 Feilmodell

Lar vi y være sann terrengdybde i et punkt, \underline{x} posisjonen og $d(\underline{x})$ være dybden vi finner fra kartdatabasen ved samme posisjon er sammenhengen:

$$d(\underline{x}) = y + \delta y_d \quad (3.1)$$

der δy_d er feilen. Denne kan deles opp i (minst) to komponenter:

$$\delta y_d = y_{0_d} + w_d \quad (3.2)$$

der y_{0_d} er bias (korrelert mellom målinger), og w_d er målestøy (ukorrelert mellom målinger).

Biasen vil inneholde globale feil og andre korrelerte feil, mens målestøyen vil beskrive feil som ikke er korrelert mellom oppslagene. Interpolasjonsfeil kan være en blanding av begge typene, avhengig av hvordan vi interpolerer og hvor tett vi gjør oppslag i forhold til gridstørrelsen.

4 SENSORER

Et undervannsfartøy trenger å kjenne både sin egen dybde og farkostens høyde over terrenget for å finne terrengets dybde. Egen dybde vil typisk tas fra trykksensor, men oppover-rettet ekkolodd kan også brukes. Treghetsnavigasjon eller bestikkregning uten støtte av trykksensor/ekkolodd kan ikke brukes over noen tid, fordi feilen vokser mot uendelig etter hvert som tiden går.

4.1 Sonarer

Sonarer er aktive akustiske sensorer som finner avstanden mellom sender og bunn (eller andre objekter) ved å måle tiden en lydimpuls bruker fram og tilbake. Rekkevidden avhenger av frekvens og effekt. Frekvens og innfallsvinkel avgjør også om de slår igjennom bløte bunntyper (gjørme, leire osv). Forskjellige sonarer har ulik dimensjon på målingene. Det klassiske ekkoloddet (SBE, Single Beam Echosounder) gir avstand til et punkt, et multistråle ekkolodd (MBE) gir avstand til en linje med punkter, mens en 3D-sonar gir avstand til punkter på en flate. I tillegg kan akustiske sensorer for bunnreferert hastighet også gi avstandsmålinger. Disse sensorene er dopplerlogg (DVL) og korrelasjonslogg (CVL). Dopplerloggen gir tre eller fire målinger avhengig av konstruksjon, mens korrelasjonsloggen gir en enkeltmåling som et ekkolodd. Korrelasjonsloggen har svært bred stråle (60 grader for en enhet), så det er mulig kvaliteten på avstandsmålingen er dårlig pga. usikkerhet mhp hvor ekkoet kommer fra.

4.2 Laser

Laser avstandsmåler kan også brukes under vann. Rekkevidden er imidlertid kort, 30-50m avhengig av vannets klarhet. En laser bør gi meget nøyaktige målinger.

4.3 Feil i dybdemålinger

Når terrengets dybde måles av en farkost vil dybden være en sum av farkostens dybde og farkostens målte høyde over terrenget (bunnens dybde under farkosten). Både feil i egen dybde og feil i målt høyde vil dermed gi feil i terrengdybden. Feil i egen dybde fra en trykksensor vil

ofte være tilnærmet konstante fordi de skyldes feil eller mangelfulle korreksjon for tidevann, vanntetthet og lignende langsomt varierende parametre. For MBE og 3D-sonar vil feilen i egen dybde måtte være konstant innenfor et skudd. For målt høyde vil noen feil, som feil lydshastighetsprofil eller feil i attityde kunne gi en langsomt varierende feil, mens man også vil ha en del ren målestøy som endrer seg fra måling til måling. For et multistråleekolodd kan signalbehandlingen gi sterk korrelasjon mellom målingene. Samlet feil bør allikevel kunne holdes under $1m\ 1\sigma$ for de fleste sensorer.

4.3.1 Feilmodell

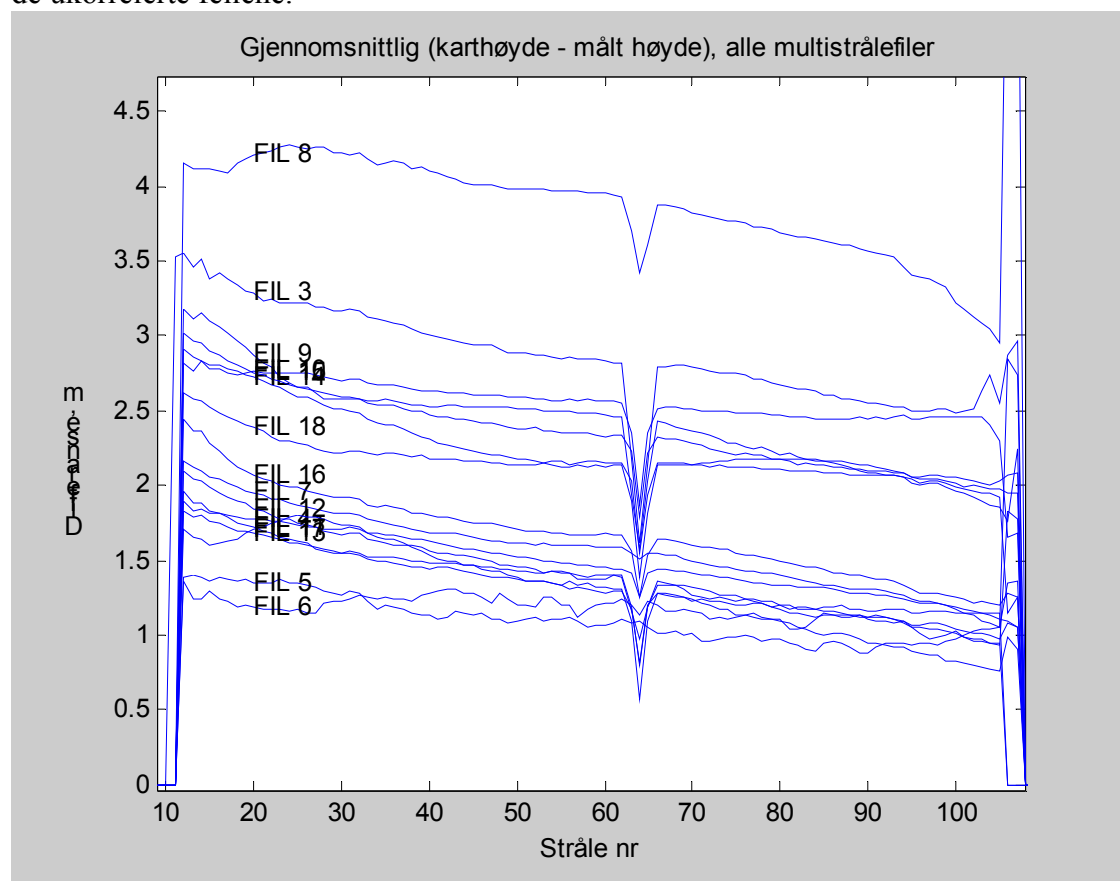
Lar vi y være sann terrengdybde i et punkt og \tilde{y} målt terrengdybde i samme punkt er sammenhengen:

$$\tilde{y} = y + \delta y_m \quad (4.1)$$

der δy_m er feilen. Denne kan deles opp på samme måte som kartfeilen:

$$\delta y_m = y_{0_m} + w_m \quad (4.2)$$

Biasen vil inneholde langsomtvarierende feil i både farkostens dybde og målt høyde, målestøyen de ukorrelerte feilene.



Figur 4.1: Eksempel på kartfeil og målefeil

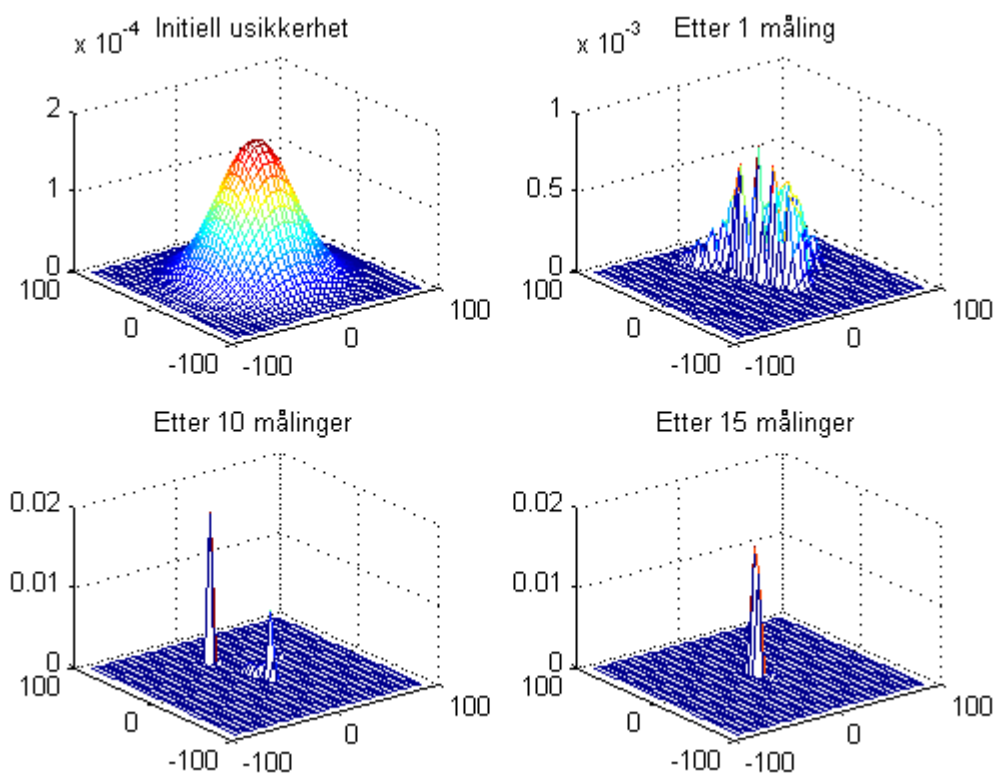
Figur 4.1 viser gjennomsnittlig forskjell mellom kart og måling med MBE i et område i Oslofjorden. Siden det er tatt et gjennomsnitt av 300-500 målinger fra hver fil er det bare korrelert feil som vises. Kartet som er brukt her er dårlig, med grove posisjonsfeil i rådataene og antagelig mangelfulle korreksjon for tidevann. En god del av forskjellen er derfor kartfeil. Hakk

rundt stråle 63 er antagelig gjennomslag, sonaren har gått gjennom et bløtt overflatelag og ned på hardere berggrunn før den returnerer ekko. De ytterste strålene er klart dårlige. Skråningen på forskjellen kan skyldes en rullfeil på multistråle-ekkoloddet eller fartøyet som bar sonaren. Dette eksempelet er temmelig grovt, forskjellen bør være adskillig mindre med et ordentlig kart og en godt kalibrert multistrålesonar og dybdemåler.

5 PUNKTMASSEFILTERET (PMF)

Punktmassefilteret (PMF) er en relativt ny søkemetode utviklet ved Universitet i Linkøping, se (4). Der er den utviklet og testet for fly, bl a i samarbeid med SAAB. Punktmassefilteret er en statistisk metode som bruker a priori posisjonsusikkerhet og usikkerheten i dybdemålingene og kartgrunnlaget til å beregne en sannsynlighetsfordeling for posisjonen i en Bayesestimator. Usikkerheten oppgis i form av varians for enkeltmålinger og en kovariansmatrise når man prosesserer i batch (flere målinger prosesseres samlet). Når sannsynlighetsfordelingen er kjent kan man trekke et estimat ut fra den i form av forventning, median, maksimum likelihood (toppen i fordelingen) eller lignende.

PMF kan kjøres både i batch (målinger samles opp og prosesseres samlet) eller rekursivt på enkeltmålinger. For MBE og 3D sonar er det naturlig å kjøre batch, dvs prosessere et skudd a flere målinger samlet. Det kan være fordeler ved å kjøre batchprosessering også for enkeltmålinger da det gir oss mulighet til å spesifisere korrelasjoner i kovariansmatrisa og dermed uttrykke sannsynligheten for f eks global dybdefeil.



Figur 5.1: Utvikling av sannsynlighetstetthet i PMF. Sann posisjon er $(0,0)$.

5.1 Prinsippskisse

Veldig grovt beskrevet søker filteret etter den posisjonen som gjør at forskjellen mellom kart og målinger passer best med de statistiske beskrivelsene av posisjonsfeilen og feilene i kart og dybdemålinger. Dette gjør den ved å bygge opp en sannsynlighetstetthetsfunksjon for posisjonsfeilen, dvs en funksjon hvis form beskriver hvor sannsynlig det er at posisjonsfeilen ligger i forskjellige områder. Fra denne fordelingen kan man finne middelerverdi, varians og annet som måtte være av interesse. Figur 5.1 viser hvordan sannsynlighetstetthetsfunksjonen endrer seg med målingene, jo flere målinger vi får jo mindre blir området det er sannsynlig at posisjonen ligger innenfor. De følgende avsnittene gir detaljene i algoritmen.

5.2 Den analytiske algoritmen

Både konseptuelt og implementasjonsmessig er det enklest å sette opp algoritmen slik at det er posisjonsfeilen og ikke posisjonen vi søker å finne. Punktmassefilteret kan kjøres som en rekursiv algoritme som kalles hver gang vi har en høydemåling, dersom vi søkte på posisjon måtte vi flytte senteret for søket etter hvert som farkosten beveget seg.

5.2.1 Bayes formel

Bayes formel gir en måte å beregne sannsynligheten for z gitt at w er sann basert på sannsynligheten for w gitt at z er sann. Lar vi $p(z | w)$ være sannsynlighetstetthetsfunksjonen til z gitt w , sier Bayes formel at

$$p(z | w) = \frac{p(w | z) * p(z)}{p(w)} \quad (5.1)$$

Uttrykket under brøkstrek er en normaliseringskonstant lik

$$p(w) = \int p(w, z) dz \quad (5.2)$$

5.2.2 Posisjonsfeil og dybdedifferanser

Selv om det er en posisjon vi til syvende og sist ønsker å finne er det hensiktsmessig å gjøre utledning og implementasjon omkring posisjonsfeilen. Sammenhengen mellom antatt posisjon, sann posisjon og posisjonsfeil er:

$$\bar{x} = \underline{x} + \delta \underline{x} \quad (5.3)$$

Merk at x er en todimensjonal vektor. Videre trenger vi differansen mellom målt dybde og kartdybde for en posisjonskandidat:

$$e(\delta \underline{x}) = \tilde{y} - d(\bar{x} - \delta \underline{x}) \quad (5.4)$$

I punktmassefilteret er det sannsynlighetstettheten til differansen mellom måling og kart gitt posisjonen vi kjenner ($p(e | \delta \underline{x}) = p_e(\delta y_m - \delta y_d)$), og vi ønsker å finne sannsynlighetstettheten til posisjonen/posisjonsfeilen gitt dybdemålinger og kartdata.

5.2.3 Måleoppdatering i Bayesestimatorene

La $Y_t = \{\tilde{y}_i\}_{i=0}^t$ være samlingen av terrengmålinger fram til tidspunkt t . Målingene kan være en- eller flerdimensjonale avhengig av hva slags sensor som er brukt. Anta videre at $p(\delta \underline{x} | Y_{t-1})$ er kjent. Fra Bayes formel er da

$$p(\delta \underline{x}_t | Y_t) = \frac{p(\underline{y}_t | \delta \underline{x}_t, Y_{t-1}) * p(\delta \underline{x}_t | Y_{t-1})}{p(\underline{y}_t | Y_{t-1})} \quad (5.5)$$

Ved å sette inn definisjonen av høydemålingene og manipulere får vi:

$$p(\delta \underline{x}_t | Y_t) = \alpha_t^{-1} p_e(e(\delta \underline{x}_t)) * p(\delta \underline{x}_t | Y_{t-1}) \quad (5.6)$$

$$\alpha_t = \int p_e(e(\delta \underline{x})) * p(\delta \underline{x}_t | Y_{t-1}) d\delta \underline{x}$$

hvor $p_e()$ er sannsynlighetstetthetsfunksjonen til feilen i høydedifferansene. Når sannsynlighetstettheten er kjent, kan vi danne et estimat, f eks forventningen:

$$\delta \hat{\underline{x}}_t = \int \delta \underline{x}_t p(\delta \underline{x}_t | Y_t) d\delta \underline{x}_t \quad (5.7)$$

Vi kan også finne kovariansmatrisen til estimatet:

$$C_t = \int (\delta \underline{x}_t - \delta \hat{\underline{x}}_t)(\delta \underline{x}_t - \delta \hat{\underline{x}}_t)^T p(\delta \underline{x}_t | Y_t) d\delta \underline{x}_t \quad (5.8)$$

Standardavvikene er kvadratrotten av diagonalelementene i kovariansmatrisa.

5.2.4 Tidsoppdatering

Dersom vi kjører filteret rekursivt, kan det være posisjonsfeilen endrer seg mellom måleoppdateringene. Vi bruker denne modellen:

$$\delta \underline{x}_{t+1} = \delta \underline{x}_t + \underline{v}_t \quad (5.9)$$

der \underline{v} er en støysekvens med kjent sannsynlighetstetthet som antas uavhengig mellom tidsoppdateringer (hvit). Det betyr at vi ikke modellerer f eks konstant hastighetsfeil i filteret. Dette er fordi vi da måtte øke antallet tilstander, som ville gjort filteret vanskelig å implementere i praksis. Tidsframskrivningen av posisjonsfeilens sannsynlighetstetthetsfunksjon blir:

$$p(\delta \underline{x}_{t+1} | Y_t) = \int p_{\underline{v}_t}(\delta \underline{x}_{t+1} - \delta \underline{x}_t) * p(\delta \underline{x}_t | Y_t) d\delta \underline{x}_t \quad (5.10)$$

5.3 Implementasjon av algoritmen

Generelt finnes det ikke noen lukket analytisk løsning av integralene i forrige avsnitt. Man må derfor finne en numerisk metode som tilnærmer dem. I PMF gjøres dette ved å diskretisere mulighetsrommet, dvs legge ut kandidater i et grid (kandidatgrid), og gjøre integralene om til summer. Legger man ut et grid med fast oppløsning Δ og til sammen $M * N$ posisjoner kan man beregne sannsynlighetstettheten i hvert enkelt punkt, $p(\delta \underline{x}_t(k, l) | Y_t)$. Herfra stammer

navnet Punktmassefilter: hvert diskret punkt har en sannsynlighetsmasse $p()$. Merk ellers de tre uavhengige indeksene: t angir målingens nummer/tid, mens k og l angir hvilken av de diskrete posisjonsfeilkandidatene det er snakk om.

Den analytiske Bayesestimatorene er korrekt for alle dimensjoner. Praktisk implementasjon for u-lineære systemer har jevnt over vært begrenset til 2 dimensjoner fordi regnebehovet øker radikalt med dimensjonene, samtidig som tilnæringsfeil blir større. Imidlertid blir prosessorer stadig raskere og minne stadig billigere, så på sikt kan det være interessant å se på å utvide dimensjonen på estimatet. En første utvidelse kan være å ta med konstant dybdefeil eller kursfeil, dvs utvide antall tilstander til tre.

Implementasjonen her følger (4) i at sannsynlighetfordelingen betraktes som en stykkevis konstant kontinuerlig fordeling. Man kan med små endringer gå over til en diskret fordeling.

5.3.1 Måleoppdatering

Måleoppdateringen for et diskretisert mulighetsrom blir:

$$p(\delta \underline{x}_t(k, l) | Y_t) = \alpha_t^{-1} p_e(e(\delta \underline{x}_t(k, l))) * p(\delta \underline{x}_t(k, l) | Y_{t-1})$$

$$\alpha_t = \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^N p_e(e(\delta \underline{x}_t(k, l))) * p(\delta \underline{x}_t(k, l) | Y_{t-1}) \Delta^2 \quad (5.11)$$

$$\delta \hat{\underline{x}}_t = \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^N \delta \underline{x}_t(k, l) p(\delta \underline{x}_t(k, l) | Y_t) \Delta^2 \quad (5.12)$$

Vi bruker her middelveien som estimat, man kunne valgt andre, f eks maksimum likelihood. Valget av middelvei gjør at metoden kan gi et estimat som ligger mellom gridpunktene. Kovariansmatrisen beregnes med en tilsvarende overgang fra integral til sum:

$$C_t = \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^N (\delta \underline{x}_t(k, l) - \delta \hat{\underline{x}}_t)(\delta \underline{x}_t(k, l) - \delta \hat{\underline{x}}_t)^T p(\delta \underline{x}_t(k, l) | Y_t) \Delta^2 \quad (5.13)$$

Legg merke til at vi her ser en effekt av diskret mulighetsrom: dersom det bare er en kandidat med p større enn null, blir variansen null. For slike tilfelle må man legge til en varians som tilsvarer at vi kan ha en uniformfordelt feil innenfor den gjenværende ruten i kandidatgriddet vårt. Legg også merke til at α_t kan bli null dersom sannsynligheten numerisk er lik null i alle punkter. Dette kan skje dersom sann posisjon ikke finnes i søkeområdet eller det er noe alvorlig feil med en sensor. En test på dette vil gi et varsel om at noe er alvorlig galt i systemet.

5.3.2 Tidsoppdatering

For tidsoppdateringen gjøres overgang fra integral til sum på samme måte som over, og vi får

$$p(\delta \underline{x}_{t+1}(k, l) | Y_t) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N p_{v_t}(\delta \underline{x}_{t+1}(k, l) - \delta \underline{x}_t(m, n)) * p(\delta \underline{x}_t(m, n) | Y_t) \Delta^2 \quad (5.14)$$

5.3.3 Initierring

Metoden må ha en initiell usikkerhet (varians/kovarians) for antatt posisjon. Denne kan komme fra et Kalmanfilter eller lignende. Den initielle usikkerheten brukes både til å legge ut søkeområdet (f eks +/- 3 standardavvik) og til å gi initiell sannsynlighetstetthet til hvert enkelt gridpunkt. I tilfelle hvor man ikke har noe formelt mål på usikkerhet men har et søkeområde, kan man initiere alle gridpunktene med lik sannsynlighet.

5.3.3.1 Global posisjonsfeil i kart

Hvis vår initielle posisjonsusikkerhet er i forhold til et globalt referansesystem, f eks lengde/bredde i WGS84, skal man i teorien legge til kartets usikkerhet i forhold til det samme referansesystemet i den initielle usikkerheten. Dette anses å være unødvendig for de fleste praktiske formål da usikkerheten i kartet normalt er signifikant mindre enn både oppløsningen i kartet og usikkerheten i egen posisjon.

5.3.4 Kjent posisjonsendring

Ved oppsamling av målinger over tid vil posisjonen endre seg mens oppsamlingen pågår. Algoritmen krever at den hele tiden har nominelle posisjoner knyttet til dybdemålingene, det betyr at den må ha et eksternt system (treghetsnavigasjon, bestikkregning eller lignende) for å beregne posisjonsendringen. Eventuelle feil i disse beregningene skal modelleres i filterets tidsoppdatering. Siden algoritmen søker etter feilen i posisjon er det ikke nødvendig å flytte kandidatgriddet etter hvert som posisjonen endrer seg.

5.3.5 Vedlikehold

Dersom usikkerheten øker markant ved tidsoppdatering kan det være nødvendig å utvide søkeområdet. Det kan også være lønnsomt å drive vedlikehold av kandidatgriddet ved å fjerne celler med sannsynlighet mindre enn en eller annen terskelverdi. Det vil minske regnebehovet, prisen er antagelig bare en liten økning av sannsynligheten for feil konvergens. I begge tilfelle må det gjøres en renormalisering av sannsynlighetstetthetene slik at de fortsatt integrerer seg til 1. Vi har ikke testet dette.

5.3.6 Konvergenzkriterium

Ved at metoden beregner kovariansen til estimatet har man et innebygget konvergenzkriterium. I praksis har det vist seg at standardavviket (rota av variansen) bør være mindre enn oppløsningen på kartet for at man skal kunne si at metoden har konverget. Dersom man har to (eller flere) klart adskilte topper i fordelingen har den ikke konverget. Man kan selvsagt fortsatt få ut et estimat, men forventningen vil da bli liggende et eller annet sted mellom toppene, kanskje i et område med lav sannsynlighet.

Før algoritmen har konverget, vil sannsynlighetstettheten ha en svært irregulær form, se Figur 5.1. Vanlige antagelser om sammenheng mellom standardavvik og sannsynlighetsnivåer vil ikke holde, faktisk kan standardavviket bli høyere enn det var initielt ved en tilstrekkelig irregulær form på fordelingen. Man kan allikevel finne f eks området sann posisjonsfeil med 99%

sannsynlighet befinner seg innenfor ved å inspisere fordelingen. Det betyr at man kan bruke filterert til kollisjonsunngåelse før det har konverget.

5.3.7 Korrelerte differanser

Korrelasjon mellom differansene kan bare uttrykkes for målinger som prosesseres samtidig; da kan de uttrykkes i kovariansmatrisen. Det er enkelt og naturlig for MBE og 3D-sonar, men dersom man i utgangspunktet har enkeltmålinger må man gjøre en avveining mellom å uttrykke korrelasjon eller tidsutvikling av posisjonsfeilen. Man kan sette variansene litt høyere enn de faktisk er for å ta høyde for at man ikke kan uttrykke alle feiltyper samtidig.

5.3.7.1 Eksempel: Konstant dybdefeil

Konstant dybdefeil er et aktuelt eksempel på korrelert feil. La δy_d og δy_m være som tidligere. I sann posisjon blir da

$$e = \delta y_{m_o} + w_m - \delta y_{d_o} - w_d \quad (5.15)$$

hvor biasleddene antas konstante mellom målinger, mens støyleddene er uavhengige. Vi får da variansen:

$$E\{e_i^2\} = E\{\delta y_{m_o}^2 + w_m^2 + \delta y_{d_o}^2 + w_d^2\} = E\{\delta y_{m_o}^2\} + E\{w_m^2\} + E\{\delta y_{d_o}^2\} + E\{w_d^2\} \quad (5.16)$$

Dette gir diagonalelementene i kovariansmatrisa.

Kovariansen mellom målinger blir:

$$E\{e_i e_{j, j \neq i}\} = E\{\delta y_{m_o}^2\} + E\{\delta y_{d_o}^2\} \quad (5.17)$$

Dette gir elementene utenfor diagonalen. I et terreng som gjentar seg vil spesifikasjon av variansen til konstant dybdefeil hindre filteret i å konvergere på forskjeller som like gjerne kan skyldes konstant dybdefeil som posisjonsfeil.

6 TERCOM

TERCOM står for Terrain Contour Matching. Dette er den klassiske terrengkorrelasjonsmetoden, brukt bl a i amerikanske Tomahawk-missiler. Metoden er egnet for batchkjøring (oppsamling av profil), men kan også kjøres rekursivt. Igjen er det naturlig å kjøre MBE og lignende flerdimensjonale målinger i batch. Det er gitt en grundig drøfting av TERCOM i forskjellige varianter i (5).

6.1 Prinsipp

Metoden antar implisitt at posisjonsfeilen er konstant. Vi legger ut kandidatene i et grid som tidligere, og bruker samme notasjon. Vi ønsker å finne den posisjonsfeilen som minimaliserer et kriterium knyttet til forskjellen mellom målt høyde og karthøyde i kandidatposisjonen. Den klassiske TERCOM bruker minimalisering av gjennomsnittlig absolutt avstand (TERCOM

MAD):

$$\delta \hat{x} : \arg \min_{k,l} \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t |e_i(k,l)| \quad (6.1)$$

Dvs vi velger den posisjonen som minimerer summen av absolutte differanser, dette kalles MAD-metoden (Mean Average Distance).

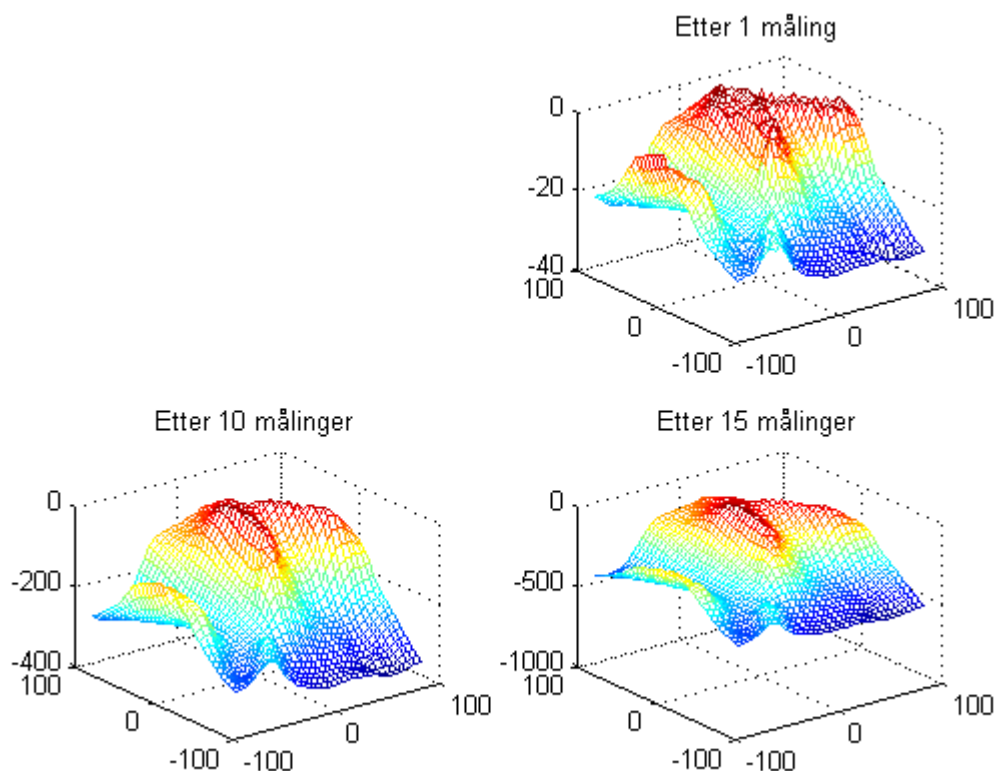
Det er godt mulig å lage varianter på metoden, f eks kan man veie målingene ut fra deres (antatte) kvalitet:

$$\delta \hat{x} = \arg \min_{k,l} \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t \beta_i |e_i(k,l)| \quad (6.2)$$

Det er også mulig å velge å minimere annet enn absolutt avstand, f eks kvadratavstand:

$$\delta \hat{x} = \arg \min_{k,l} \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t \beta_i e_i^2(k,l) \quad (6.3)$$

Fordelen med dette kriteriet er at det er enklere å analysere matematisk enn absoluttverdi, prisen er at det krever tyngre beregninger. Konvergensesegenskapene skal være noenlunde de samme for de to kriteriene (vi har gjort noen enkle forsøk som indikerer at kvadrat er svakt dårligere enn absolutt). Generelt er det kjent at kvadratfeil er mer følsomt for wildpoints enn absoluttfeil. Merk at uansett metode vil det være et av punktene i griddet som blir funnet. Flaten man får ved å sette inn kriterieverdiene i kandidatgriddet kalles en korrelasjonsflate, vist i Figur 6.1.



Figur 6.1: TERCOM korrelasjonsflate, snudd fortegn (Høyest passer best)

6.1.1 Konvergens- og integritetssjekk

Under arbeidet med søkemethodene viste det seg ganske raskt at PMF var bedre enn TERCOM. Vi har derfor ikke gjort så mye på konvergens- og integritetssjekk for TERCOM, og dette avsnittet er først og fremst en oversikt over problemstillinger.

6.1.1.1 Konvergenssjekk

Et generelt problem med TERCOM er at det ikke finnes noe klart konvergenzkriterium for metoden. Det kan være det er mulig å utarbeide et basert på hvor markert det globale minimumet er i forhold til evt andre lokale minimum, for eksempel kreve at nest minste minimum er minst $x\%$ større enn minste. Mer kompliserte løsninger kan være å se på geometrien til korrelasjonsflaten.

Våre tester har vist at det ikke er nok å se på hvor stabilt minimumet er, dvs om det flytter seg. Det kan være stabilt i feil posisjon over mange målinger før det flytter seg til sann posisjon.

I våre undersøkelser av metoder for terrengekarakterisering har det vist seg at standardavviket har en viss sammenheng med terrengets egnethet for terrengreferert posisjonering, se avsnitt 10.5. Det er mulig at standardavviket til målingene på samme måte kan si noe om konvergenssannsynligheten.

Vår erfaring er at statistiske tester på kriteriefunksjonen (se 6.1.1.2) bare kan brukes i integritetssjekk, til å forkaste klart feilaktige løsninger. Det at en løsning tilfredsstillende en slik test er ikke nok til å si at den er riktig. Ser man på hvordan metoden skal fungere, skjønner man hvorfor: Posisjonen TERCOM har funnet passer minst like godt med dataene som sann posisjon, gitt at sann posisjon er innenfor søkeområdet. Dermed kan man vente at den også vil tilfredsstillende de fleste statistiske egenskaper kriteriefunksjonen skal ha i sann posisjon.

For missiler har man gjerne løst problemet ved å velge terreng og antall målinger/lengde av profil slik at man så godt som sikkert har konvergens.

6.1.1.2 Integritetssjekk

I en integritetssjekk kan test på stabilitet av minimumet inngå. Hyppige, 'store', endringer av minimumets posisjon vil indikere at løsningen ikke har konvergere.

For sann posisjon vil kriteriefunksjonen være en sum av funksjoner (absoluttverdi, kvadrat eller lignende) av diverse feilstørrelser: feilene i kartet + feilene i dybdemålingen. Det betyr at kriteriefunksjonen vil følge en kjent fordeling dersom feilenes fordeling er kjent. Dette kan kanskje utnyttes til en integritetssjekk. Man kan forkaste løsninger hvor verdien av kriteriefunksjonen er urimelig (f eks mindre enn 5% sannsynlig) i forhold til den fordelingen den skal følge. Denne tanken kan ikke brukes for å teste for konvergens: flat bunn vil returnere bare målestøy i alle posisjoner, og alle posisjoner vil tilfredsstillende kravene. I slike tilfelle vil det dermed heller ikke gis et integritetssvarsel. Et lignende system er foreslått for integritetssjekk av

sanntids terrengvisualisering, se (6). Imidlertid krever en slik sjekk kunnskap om feilenes fordeling, har man slik kunnskap kan man like gjerne kjøre punktmassefilteret gitt at man har regnekapasitet nok.

Alt i alt ser det ut som den sikreste måten å bruke TERCOM på, er å undersøke terrengets egnethet på forhånd, og så måle en lengre profil enn det terrengundersøkelsen har sagt er nødvendig (sikkerhetsmargin). Tomahawk opererer på denne måten, med predefinerte korrelasjonsområder. Behovet for slike områder legger føringer på rutevalg.

Problemene omkring konvergens og integritet som er drøftet her er ikke uløselige. TERCOM er en metode som har fungert i praktiske anvendelser, og anvendelse er tross alt den endelige testen av en metode.

6.1.2 Standardavvik

Legg merke til at metoden ikke sier noe om godheten av estimatet. Et standardavvik eller andre mål må settes ut fra erfaring, simuleringer eller lignende. Det er mulig å modifisere metoden slik at man får et pseudo-standardavvik.

Vi har valgt å ikke se på hverken vektning av målingene eller endringer for å få et pseudo-standardavvik. Dette er fordi PMF gjør dette optimalt, og det er da naturlig å bruke TERCOM som det motsatte ytterpunktet: en enkel og parameterfri metode. Den eneste a priori kunnskapen man trenger for TERCOM er søkeområdet. Se (5) for avanserte modifikasjoner av TERCOM som bl a gir et standardavvik.

6.1.3 Global dybdefeil

TERCOM bruker ikke statistiske metoder og det er ikke mulig å angi korrelasjon mellom målinger. I mange sammenhenger er det derfor foreslått å takle globale dybdefeil ved å trekke gjennomsnittet av målingen fra målingen og gjennomsnittet av kandidatprofilen fra kandidatprofilen slik at man ser bare på variasjonen. Grunnen til å gjøre dette er selvsagt at global dybdefeil kan føre til feil konvergens. Fratrekk av gjennomsnitt kan bare gjøres når man kjører i batch, og innebærer at man ikke kan korrelere på terreng som gjentar seg ved forskjellige dybder. Dette gjelder også spesialtilfellet skråplan: Dersom bunnen følger et skråplan ville man uten fratrekk av gjennomsnitt kunne korrelere i skrånende retning, men ikke på tvers. Denne muligheten mister man hvis man trekker fra gjennomsnittet.

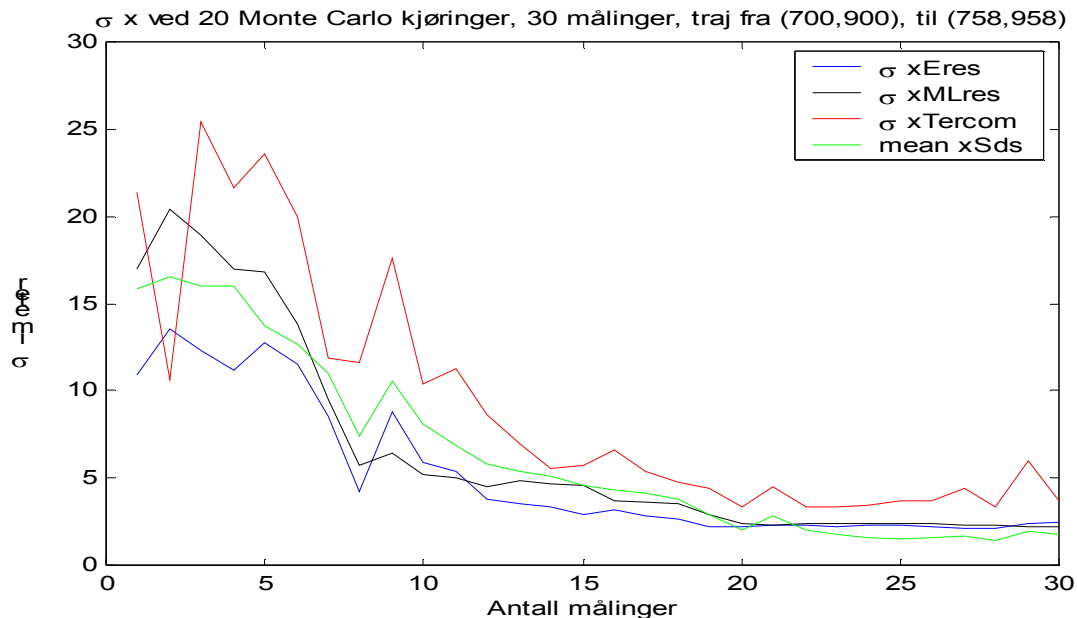
7 ERFARINGER MED SØKEMETODENE

Vi har gjennomført en lang rekke simuleringer og off-line tester av metodene. Vi har hatt data på noe forskjellig format fra fire forskjellige områder. For to av områdene har vi hatt datasett med en meters oppløsning, som vi har brukt til å lage kart med 10m oppløsning og laget syntetiske målinger fra 1m-dataene. For de to andre områdene har vi hatt datasett med en og to meters oppløsning og uavhengige målinger med multistrålesonar. Der vi har laget syntetiske

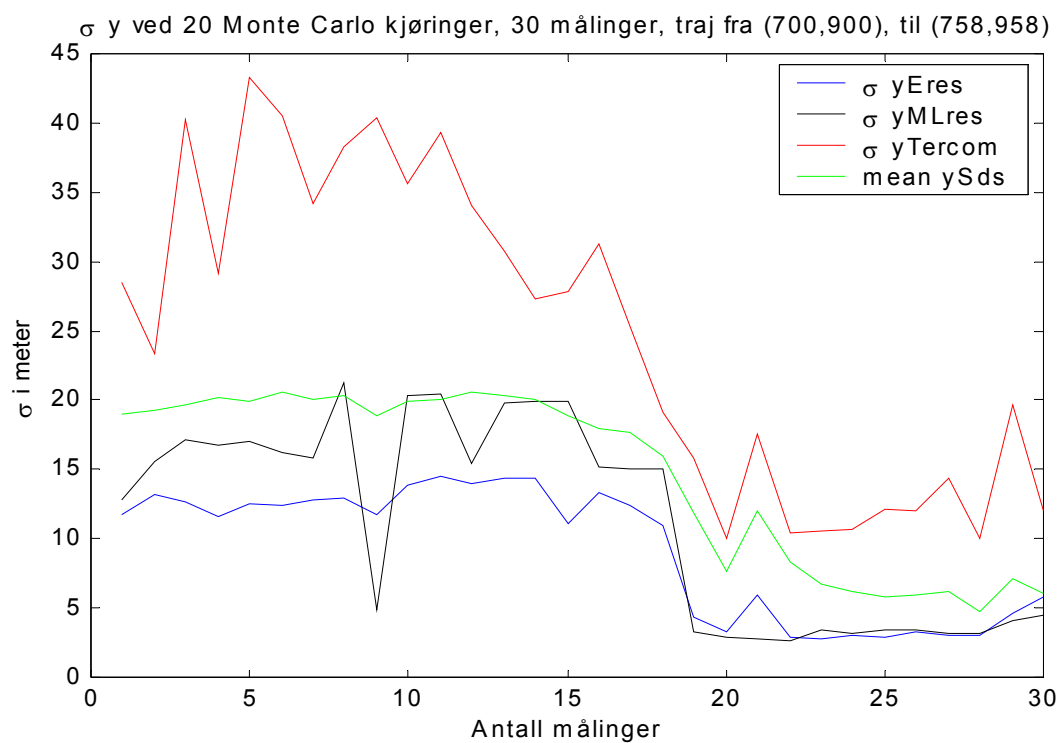
målinger har vi lagt til uavhengig normalfordelt målestøy med 1m standardavvik. Kvaliteten på kartene har variert alt ettersom hvor gode de originale dataene var. Vi har gjort langt flere simuleringer og tester enn de som er gjengitt i rapporten, det som er gjengitt her er et representativt utvalg. Vi har ikke brukt noe konvergenzkriterium for TERCOM, men jevnt over brukt like mange målinger som PMF trengte for å konvergere.

7.1 Standardavvik og fordeling

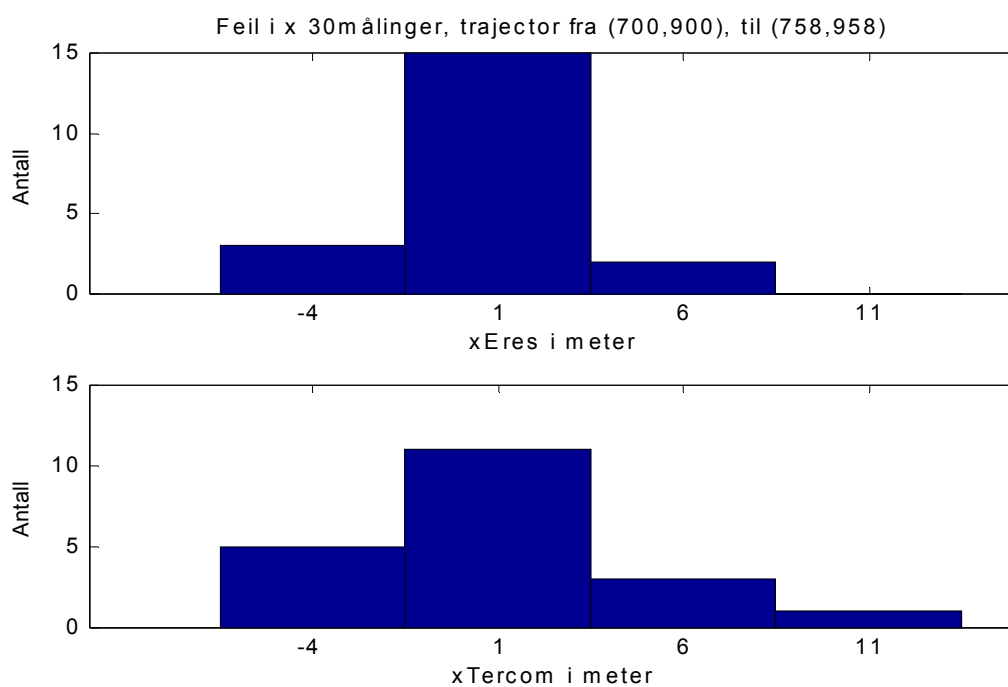
Noe av hensikten med disse kjøringene har vært å se om standardavviket PMF beregner er riktig nok til at det kan brukes som konvergenzkriterium og eventuelt brukes i et Kalmanfilter. For å undersøke dette har vi kjørt Monte Carlo simuleringer. Vi plukket ut en profil i kartet og kjørte denne 30 ganger med både PMF og TERCOM med ny målestøy for hver kjøring. Fra disse kjøringene beregnet vi gjennomsnittlig feil og gjennomsnittlig standardavvik. Vi beregnet også gjennomsnittet av standardavviket PMF gir. PMFs standardavvik ser ut til å være riktig, se Figur 7.1 og Figur 7.2. I figurene er middel av xEres middelveidiestimatet, xMLres middel av maksimumestimatet (toppen i fordelingen), xTercom middel av TERCOMs estimat og mean xSds gjennomsnittet av PMFs beregnede standardavvik. Man ser at TERCOM er svakt dårligere enn PMF. TERCOMs virkelige svakhet i disse kjøringene viser seg best når man går inn og ser på selve fordelingene: TERCOM har mye større maksimalfeil enn PMF, og kan ikke si ifra om at noe er galt, se Figur 7.3 og Figur 7.4. I Figur 7.4 har også PMF en stor feil, imidlertid oppgir det 12m som standardavvik for denne målingen og varsler slik at det ikke har konvergert.



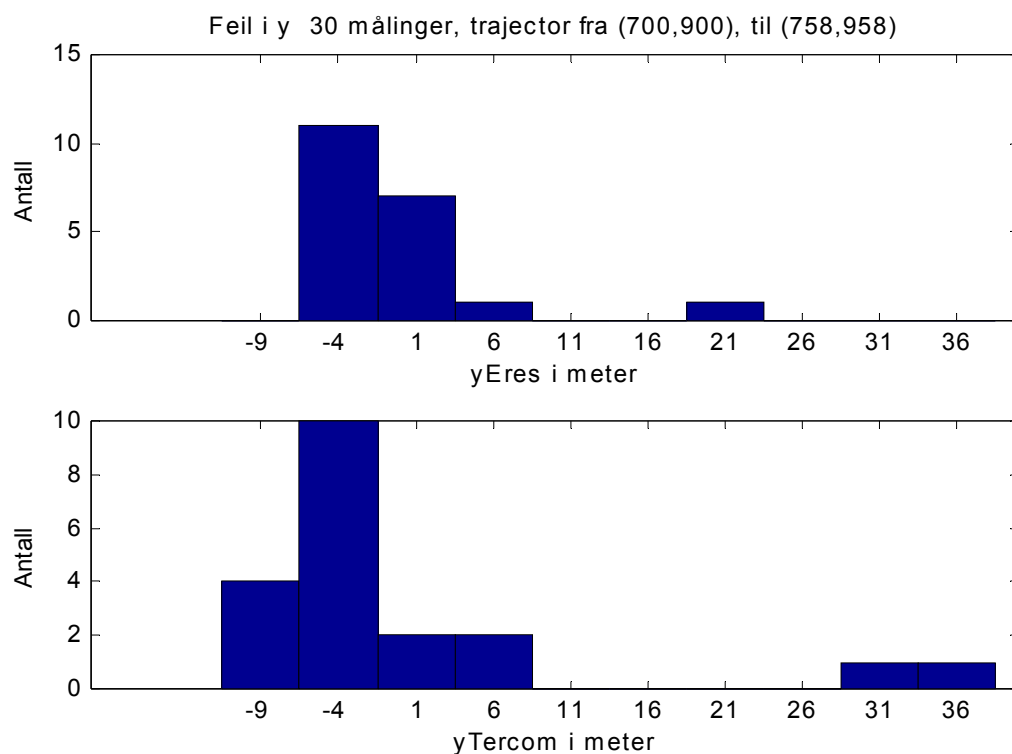
Figur 7.1: Standardavvik fra Monte Carlo simulering, nord



Figur 7.2: Standardavvik fra Monte Carlo simulering, øst



Figur 7.3: Fordeling av posisjonsfeil, nord



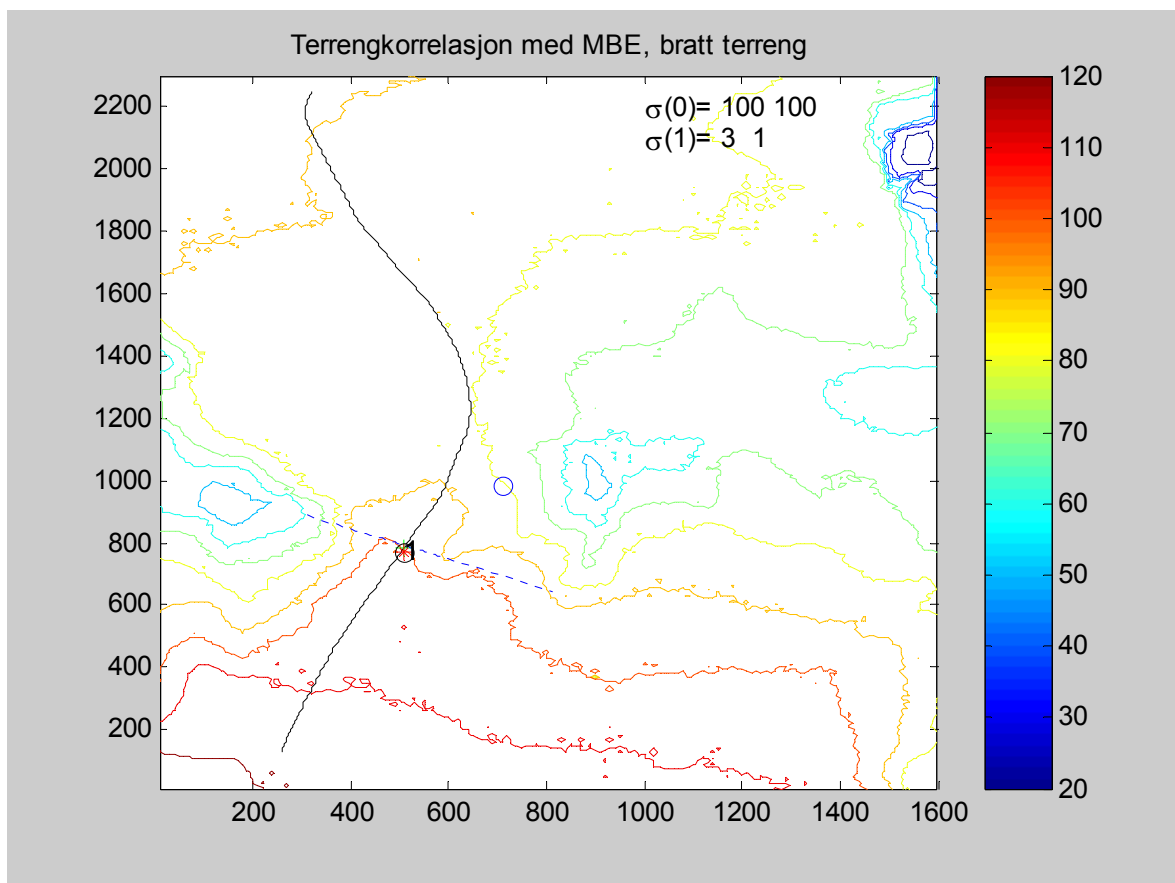
Figur 7.4: Fordeling av posisjonsfeil, øst

Fordelingene viser at søkemetodene jevnt over finner riktig rute i kartet når de konvergerer. Med et 10m grid vil man med andre ord det meste av tiden ha en feil mindre enn 10m, gitt at metoden faktisk har konvergert.

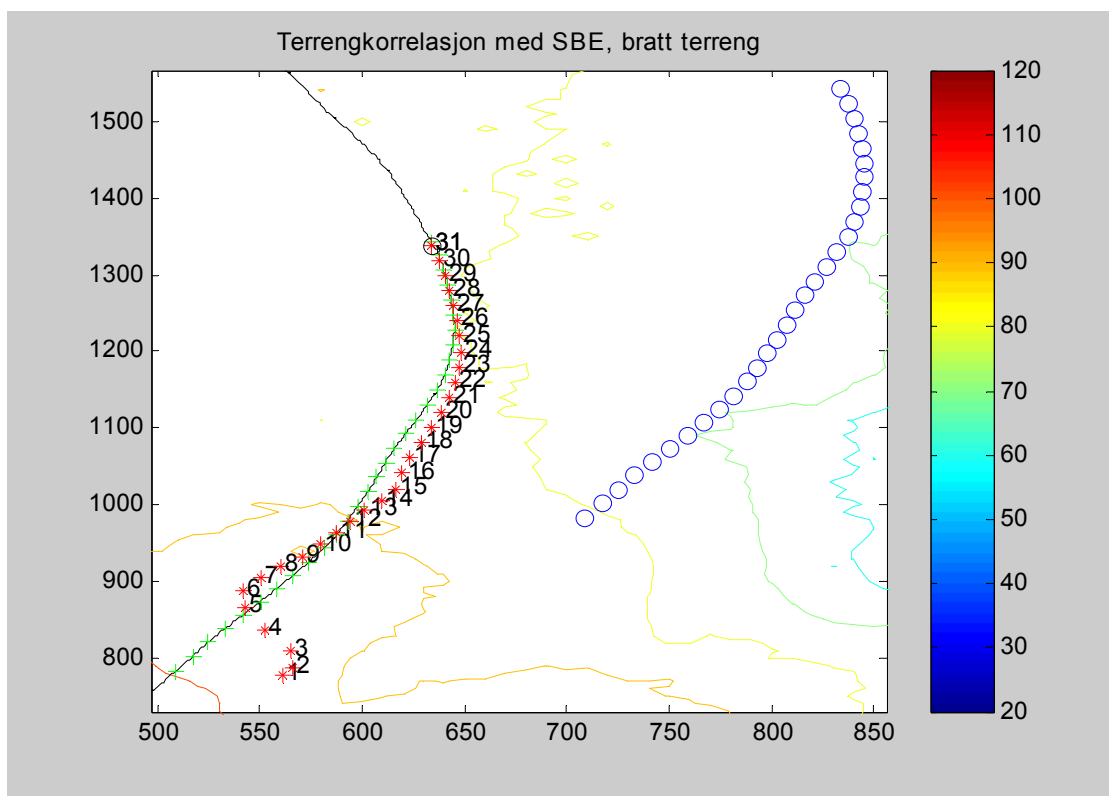
7.2 PMF, konvergens og standardavvik

Alle simuleringene har vist at med riktig statistisk beskrivelse gir standardavviket et godt konvergenskriterium for punktmassefilteret, og at det også har riktig dynamikk: Det er i stand til å fange opp at feilen øker. Figur 7.5 til Figur 7.8 viser hvordan standardavviket utvikler seg for målinger med MBE og SBE i to forskjellige områder. Dette er reelle data hvor vi har lagt på en ekstra posisjonsfeil. I figurene er grønne '+' sann posisjon, blå 'o' initiell posisjon for søket, røde '*' PMFs forslag, svart 'o' løsningen fra konvergent PMF, svart linje fartøyets rute og blå stiplet linje profilen som MBE har målt, der MBE er brukt. Legg spesielt merke til hvordan PMFs beregnede standardavvik øker når løsningen beveger seg bort fra sann posisjon i Figur 7.7 og Figur 7.8. Nummerering i figurene er nummeret på skuddet (dvs profil fra MBE og enkeltmåling fra SBE).

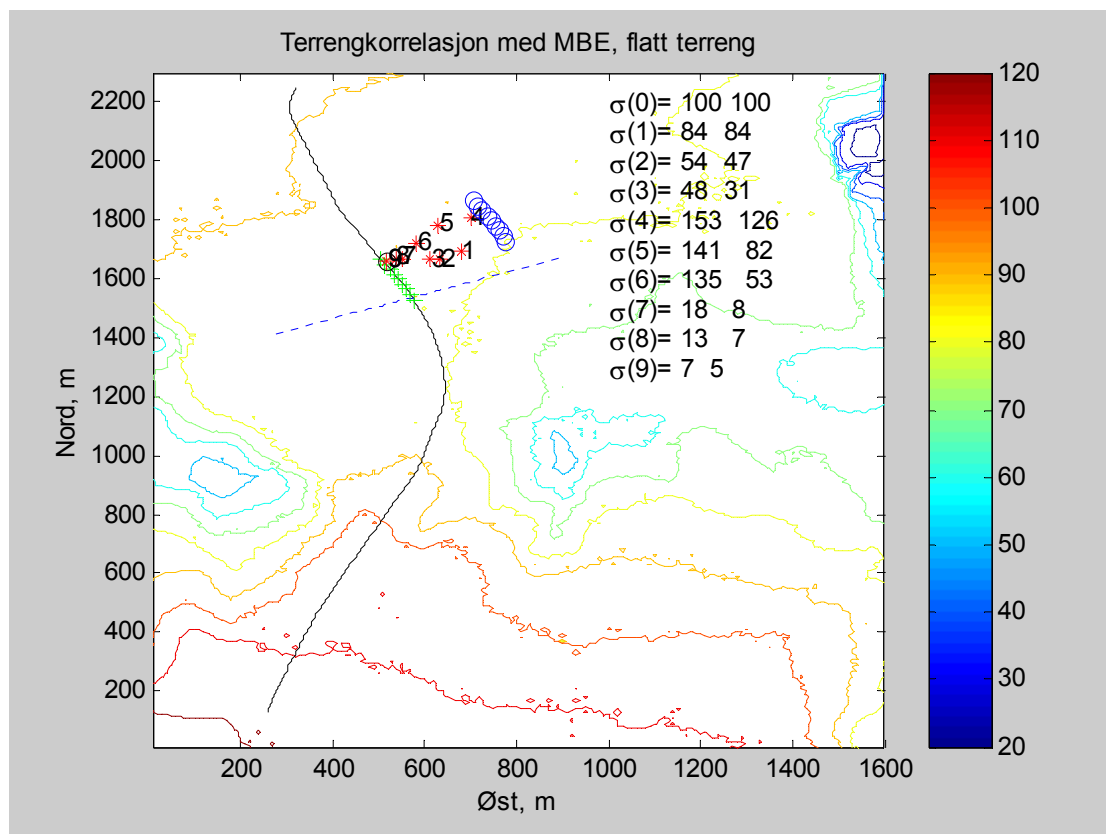
Det er ikke lagt til standardavvik for uniformfordelt feil når man er innenfor en rute på kartet i disse kjøringene. Der standardavvik er oppgitt som mindre enn 3, burde det vært satt til 3.



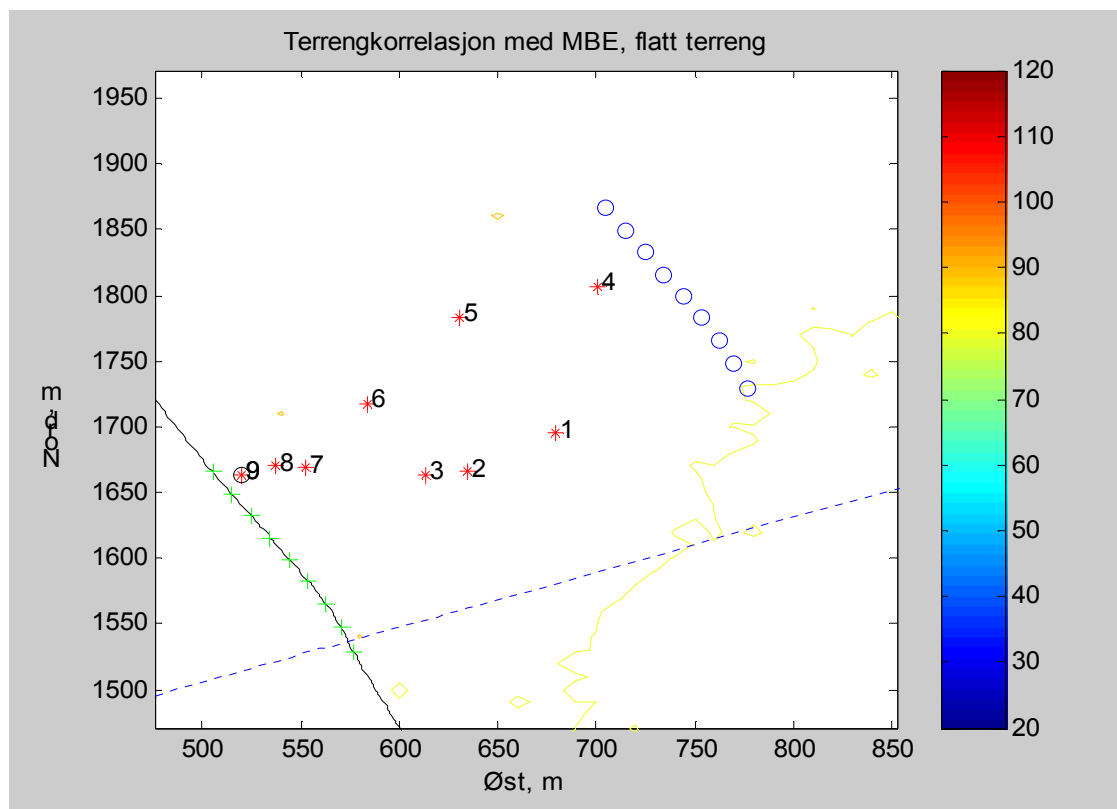
Figur 7.5: Terrengkorrelasjon med PMF og MBE i bratt terreng



Figur 7.6: Terrengkorrelasjon med PMF og SBE i bratt terreng



Figur 7.7: Terrengkorrelasjon med PMF og MBE i flatt terreng

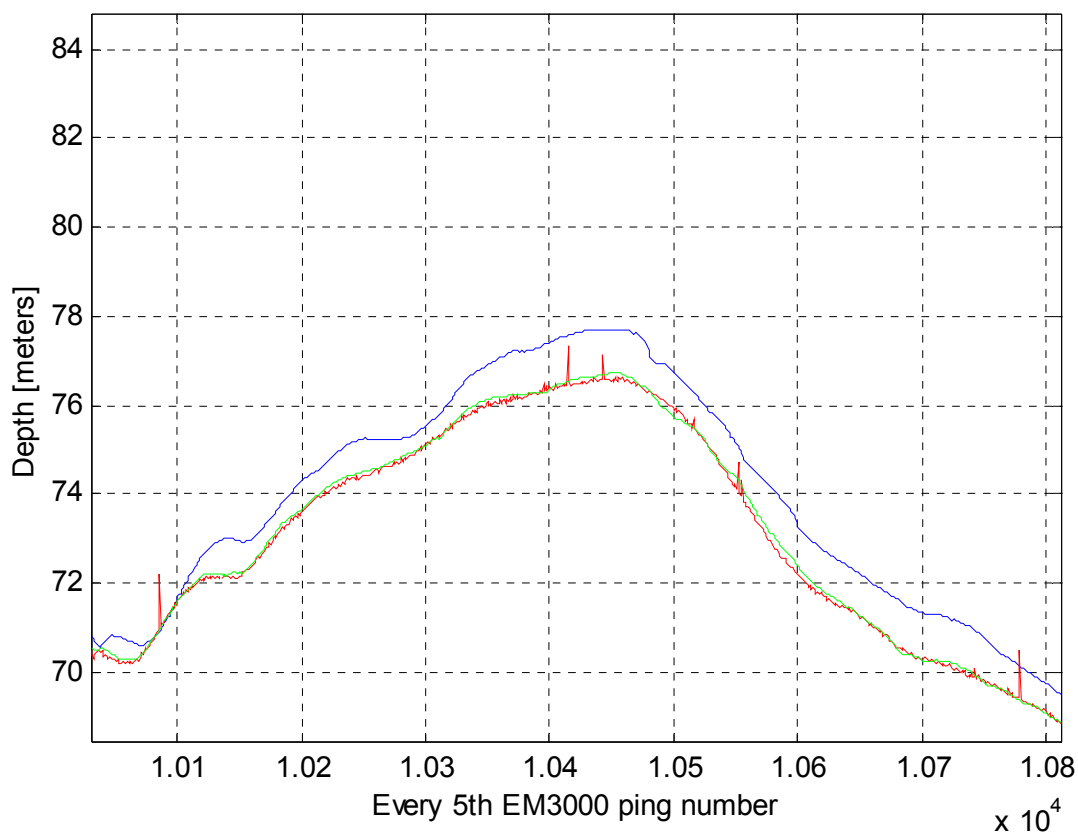


Figur 7.8: Terrengkorrelasjon med PMF og MBE i flatt terreng, detalj

7.3 TERCOM og global posisjonsfeil

FFIBM har i 2001 deltatt i et SACLANTCEN prosjekt ved Elba, der det blant annet var meningen å demonstrere (off-line) terrengkorrelasjon med målinger fra overflatefartøy. Området var en slak bukt som ble kartlagt i 1999. Kartleggingen ble gjort med RTK-GPS (Real Time Kinematic GPS, bedre enn diferensiell GPS) som globalt referansesystem, RTK-GPS ble også brukt som fasit under forsøkene med terrengkorrelasjon. Begge ganger ble det satt opp en lokal referansestasjon for anledningen. Imidlertid viste det seg at profilene som ble målt nå stemte dårlig med kartet i fasitposisjonene. For å undersøke dette nærmere, bestemte man seg for å kjøre TERCOM på hele måleserien for å se om man fant noe mønster i posisjonsfeil. TERCOM viste at det var en forskjell i global posisjon mellom måleserie og kart på ca 40m nord og 20m øst, konsistent over to dager. Korrigert for denne forskjellen matchet profilene helt, se Figur 7.9. Figuren er hentet fra (7), som gir flere detaljer.

Depth profiles along ship track: EM3000(red), Map(blue) and Map + TERCOM offset(green)

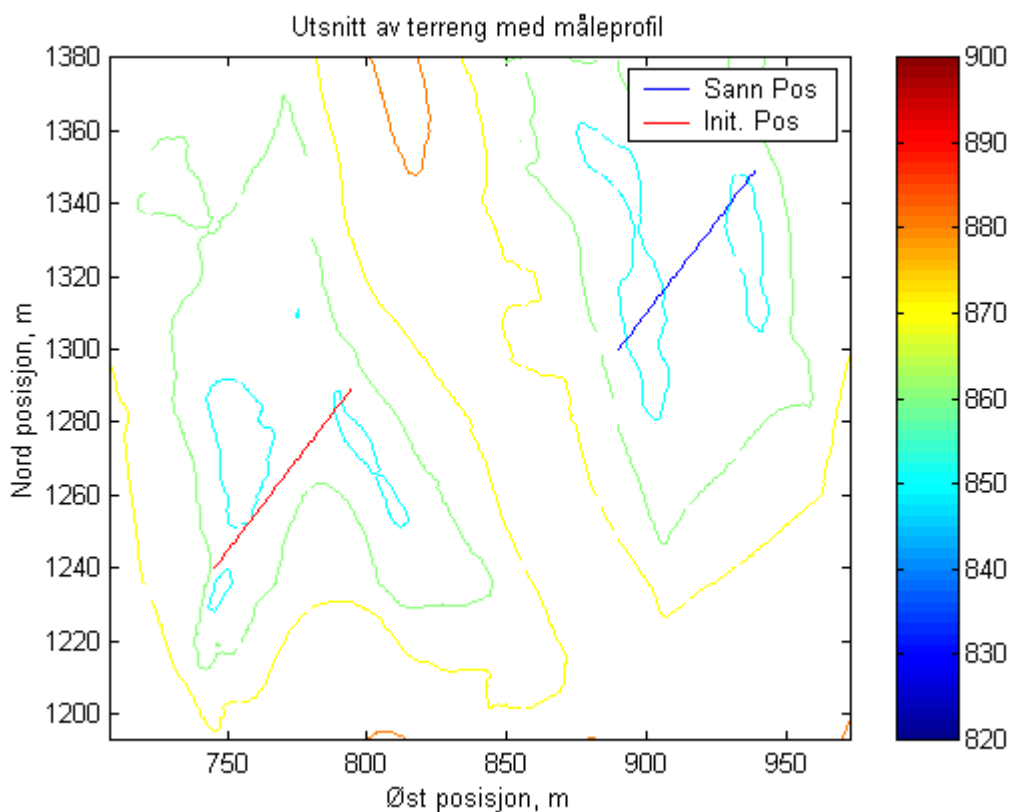


Figur 7.9: Forbedring etter TERCOM-tilpasning

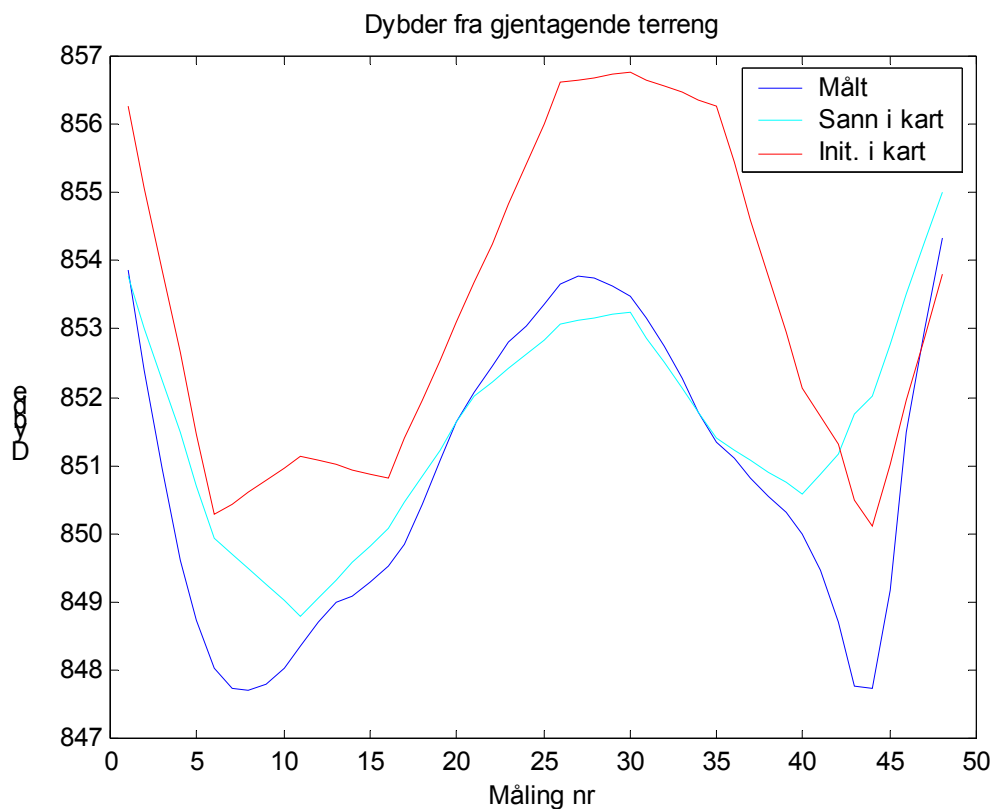
7.4 Global dybdefeil og terreng som gjentar seg

Vi har kartdata med 1m oppløsning for et veldig spesielt område i Nordsjøen. Området består av små hauger, med former som gjentar seg ved forskjellige dybder. Dybdeforskjellene er så små at

en global dybdefeil på 2-3 meter er nok til at metodene kan konvergere feil. Som tidligere ble det laget et kart med 10m oppløsning, mens dybdemålinger ble laget fra 1m dataene. Det viste seg at pga. huller i 1m dataene ble kartet dårlig, så vi satte standardavviket for målingene til 3m for å ta hensyn til feil ved kartoppslag. Siden kart og målinger er fra samme datasett, har de naturligvis ingen global dybdefeil i forhold til hverandre, men de kan brukes til å illustrere hva som skjer når vi må ta hensyn til muligheten for en slik feil. Området og profiler er vist i Figur 7.10 og Figur 7.11. Initielt posisjonsstandardavvik var satt til 200m, slik at søkeområdet var +/- 600m i begge retninger.



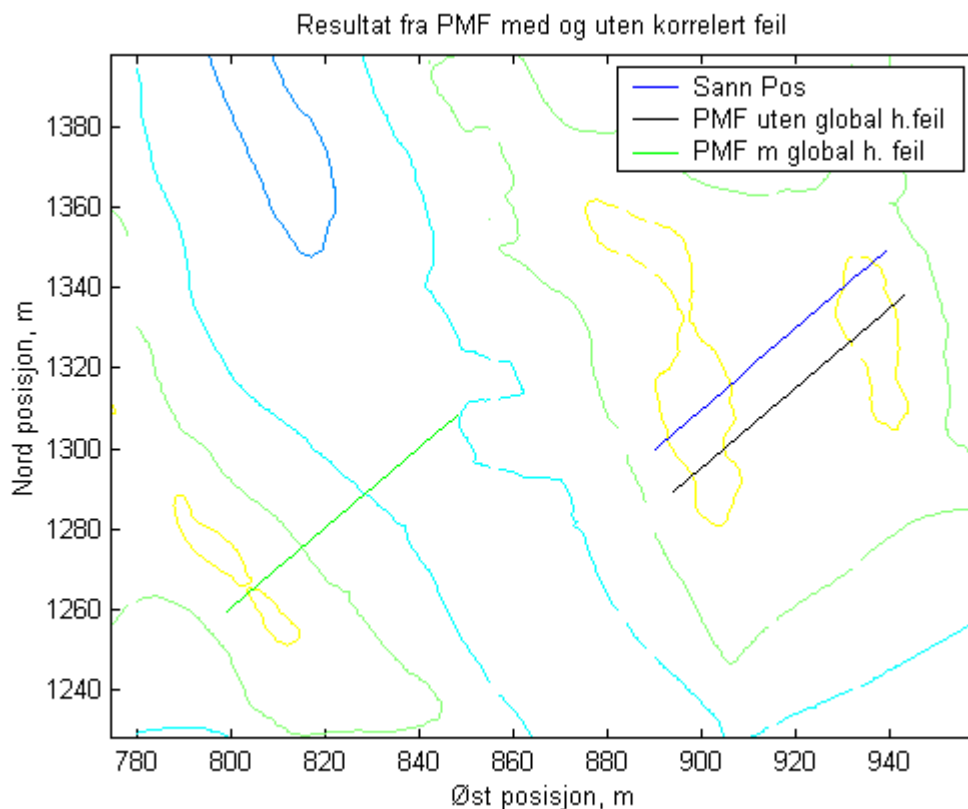
Figur 7.10: Gjentakende terreng med sann og initiell profil



Figur 7.11: Dybdeprofiler fra gjentagende terreng

7.4.1 PMF

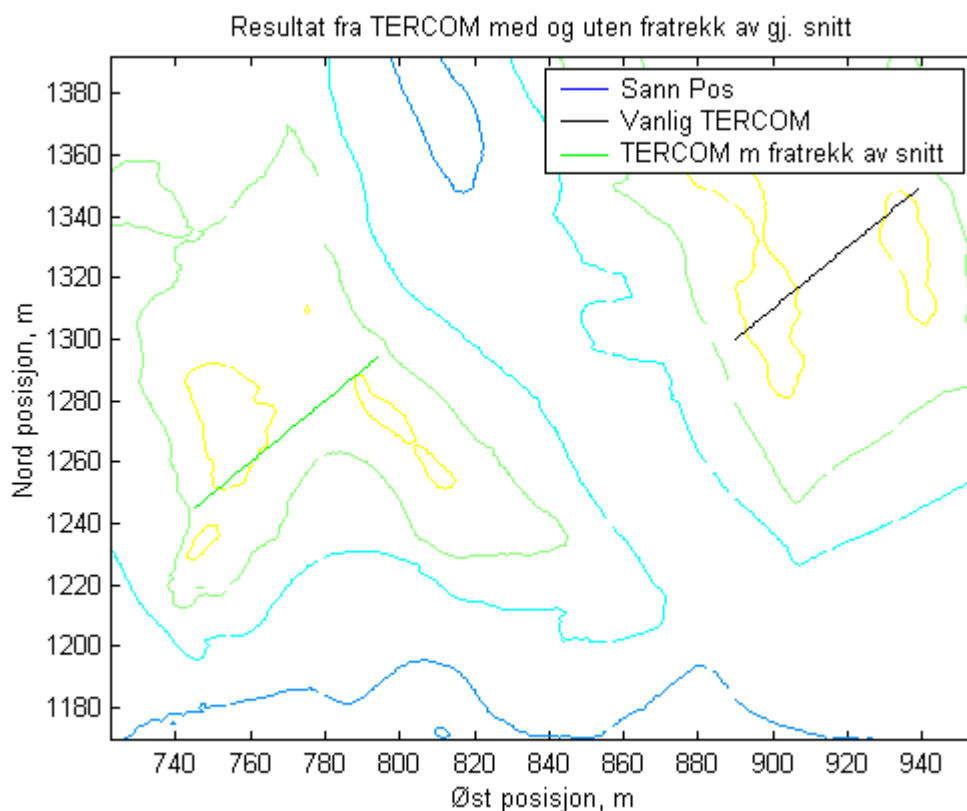
Vi kjørte først PMF med en feilbeskrivelse som sa at alle feil var ukorrelert med et standardavvik på 3m, med andre ord ingen global dybdefeil. Resultatet var at metoden konvergente med en profillengde på ca 70m, standardavviket etter siste måling var 8m nord og 5m øst. Deretter endret vi feilbeskrivelsen som ble gitt filteret til å bestå av en global feil med standardavvik 2.1m og ukorrelert feil 2.1m (gir ca 3m kvadratsummert). Resultatet ble at filteret ikke konvergente, samme måleserie som første gang ga et standardavvik på 20m nord og 72m øst. Dette er intuitivt rimelig, dersom man kan ha en slik feil er det vanskelig å si at den ene profilen passer bedre enn den andre. Filteret takler med andre ord den globale dybdefeilen riktig. Man ser at for å sikre rask konvergens uansett terreng bør den globale dybdefeilen holdes så liten som mulig. Posisjonsestimatene for de to kjøringene kan sees i Figur 7.12.



Figur 7.12: PMF-resultater med og uten korrelert feil

7.4.2 TERCOM

Som for PMF kjørte vi først uten å ta hensyn til mulighet for global dybdefeil. Resultatet var at metoden med samme profil som PMF konvergente til sann posisjon. Deretter lagde vi en spesialutgave som trakk fra gjennomsnittet både i den målte profilen og i hver enkelt kandidatprofil. Resultatet var at metoden med samme profil som tidligere ikke klarte å konvergere til sann posisjon, i stedet endte den opp i initialposisjonen. Resultatene er vist i Figur 7.13. Det samme kunne den selvsagt gjort dersom den faktisk hadde hatt en global dybdefeil som gjorde at initialposisjonen passet best. Konklusjonen må derfor bli at man for TERCOM enten må unngå global dybdefeil eller unngå å bruke metoden i terreng som gjentar seg på denne måten.



Figur 7.13: TERCOM med og uten korrelert feil (Sann er skjult under vanlig TERCOM)

7.5 Oppsummering

I testene har PMF vist seg som den beste metoden. Den har noe bedre standardavvik enn TERCOM, og den har den avgjørende fordel at den kan beregne sitt eget standardavvik og slikt sett har et innebygget konvergenzkriterium. Vi har vist at PMF kan takle global dybdefeil i terreng som gjentar seg ved forskjellige dybder, noe TERCOM ikke klarer. PMF må dog ha lengre profil for å konvergere med global dybdefeil enn uten. Begge metodene finner jevnt over fram til riktig rute i kartet når de konvergerer.

8 GRADIENTMETODER

Gradientfølging krever bedre initialposisjon enn søkemetoder. Dersom man er sikker på at man er over en dalside kan man følge hellingen på denne, men metoden kan ikke brukes dersom man ikke vet over hvilken side av en dal man er (dalsidene heller i motsatt retning) eller hvis posisjonsusikkerheten dekker flere mulige daler. Den kunne ikke blitt brukt i scenariet som ble testet i avsnitt 7.4.

Metoden ble først utviklet av Sandia laboratoriene, og ble da kalt SITAN (Sandia Inertial Terrain Aided Navigation). I FFI-sammenheng er metoden utviklet og brukt som en del av BMs TRIN-pakke (Terrain Referenced Integrated Navigation), se (8). Metoden implementeres i et utvidet Kalmanfilter, teorien bak Kalmanfilter vil ikke gjengis her. Det er mulig å gjøre

gradientfølging uten Kalmanfilter, f eks ved hjelp av frekvensbaserte filter eller reguleringsteknikker, det vil ikke bli drøftet i denne rapporten.

Gradientfølging gjøres gjerne kontinuerlig, dvs at man gjør en oppdatering hver gang man får en dybdemåling. Dette hindrer posisjonsfeilen i vokse. Metoden vil da først og fremst få problemer hvis man i perioder er uten kart eller målinger, eller hvis terrenget er flatt.

8.1 Måleligning

Vi har en antatt posisjon og ser på sammenhengen mellom den dybden denne gir ved oppslag i kartet og dybden i sann posisjon, $y(x)$. Rekkeutvikling gir:

$$d(\underline{x}) = d(\underline{x} + \delta \underline{x}) = y(x) + \frac{\partial y}{\partial x_1} \delta x_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} \delta x_2 + \text{h.o.l.} + \delta y_d \quad (8.1)$$

Anvendelse av denne ligningen krever at høyereordensleddene (h.o.l.) er små og 'tilfeldige', slik at de kan modelleres som støy. Vi har her gjort en antagelse om at dybden er lokalt deriverbar. I praksis finnes de deriverte numerisk ved oppslag i kartdatabasen, som selvsagt innfører nye feil.

Ser vi på forskjellen mellom karthøyde og målt høyde, får vi:

$$\Delta y = d(\underline{x}) - \tilde{y} = \frac{\partial y}{\partial x_1} \delta x_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} \delta x_2 + \text{h.o.l.} + \delta y_d + \delta y_m \quad (8.2)$$

Vi setter dette opp som måleligning for Kalmanfilteret:

$$z = \Delta y$$

$$z = H\underline{x} + v = \begin{bmatrix} \frac{\partial y}{\partial x_1} & \frac{\partial y}{\partial x_2} & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x_1 \\ \delta x_2 \\ \vdots \end{bmatrix} + v \quad (8.3)$$

Her er v støy. Gjennom Kalmanfilterets måleoppdatering vil vi nå få ut et optimalt estimat av posisjonsfeilen. Avhengig av modellen vi bruker i filteret kan feil i fartøyets dybde (inneholdt i δy_m) og også biaser legges inn som tilstander, feil i fartøyets dybde bør så avgjort legges inn.

Ligningen må da endres tilsvarende.

8.2 Multiple filtre

Dersom posisjonsusikkerheten er så stor at ligningene over ikke kan brukes kan man bruke en multipl modell filtreringsalgoritme, se (9). Man starter da flere filtre med ulike initialposisjoner spredd omkring i det opprinnelige usikkerhetsområdet, og lar dem gå parallelt inntil et av filtrene viser at det har konverget.

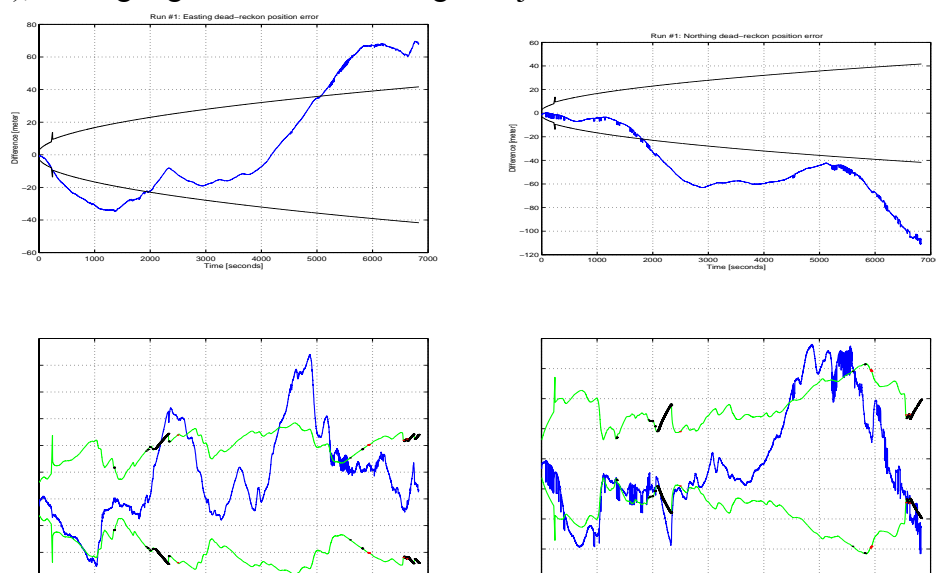
8.3 TERPROM

Multiple filter er regnekrevende og neppe bedre enn å starte med en søkemetode for å få ned den

initielle usikkerheten. British Aerospace's TERPROM algoritme gjør nettopp det: Den starter med en TERCOM-type metode, og går over til en SITAN-type når usikkerheten er nede på et akseptabelt nivå. TERPROM er en populær metode i jagerfly.

8.4 Resultater

Tidligere undersøkelser utført av BM på virkelige data viser at metoden kan oppnå et standardavvik på bedre enn 10m med 10m gridstørrelse i kartet, se (8). Disse testene var med et suboptimalt Kalmanfilter, og det kan være mulig å komme bedre ut med et bedre filter. Metoden har også vært testet på Elba-data fra overflatefartøy med gode resultater. I testene brukte man tre av strålene fra et multistråle-ekkolodd til å simulere dybdemålinger fra en DVL, samtidig som man brukte numerisk derivasjon av GPS-posisjon for å simulere DVL hastighetsmålinger. Man sammenlignet så resultater fra bestikkregning basert på hastighet og kurs med resultatene fra et Kalmanfilter med gradientfølging (TRIN). Ett sett resultater er gjengitt i Figur 8.1. Figuren er hentet fra (7), som også gir andre resultater og detaljer om forsøkene.



Figur 8.1: Resultater med TRIN på Elba-data. Øverste figurer er bestikkregning, nederste TRIN

8.5 Hvorfor bruke SITAN evt TRIN

Ettersom SITAN ikke kan takle så store feil som søkemetodene, kan det virke litt kontraintuitivt å bruke den. Den har allikevel noen fordeler: Siden den ikke gjør noe søk krever den liten regnekraft, dermed kan den gjennomsnittlige prosessorlasten holdes lav. Ettersom den bruker navigasjonssystemets Kalmanfilter utnytter den alle kjente korrelasjoner mellom feil, og oppdaterer posisjon og korrelerte tilstander hver gang den får en måling av terrengdybde. Det betyr at man her kan ta med hastighetsfeil, kursfeil, dybdefeil og alt man av praktiske hensyn ikke kan ta med i søkemetodene. Dersom man allerede har et Kalmanfilter reduseres også programmeringsbehovet, siden alt som kreves er en ny måleligning og et interface mot

terrengdatabasen. Det er ett aber: Dersom posisjonsfeilen kan bli større enn metoden kan takle, må man ha en metode for å dra den inn.

9 SIMULTAN KARTLEGGING OG LOKALISERING

Simultan kartlegging og lokalisering (Concurrent Mapping and Localisation, CML) er metoder for å gjøre terrengreferert posisjonering i områder der man ikke har kart eller bare har dårlige kart. I områder man selv har kartlagt er oppløsningen på kartet gitt av sensorene om bord, slik at man ikke er begrenset av en standard gridstørrelse. Grovt sett er det to ulike problemer man ser på: områdekartlegging i globale koordinater og enkeltvis forbedring av posisjonsestimat.

9.1 Områdekartlegging

Ved områdekartlegging i globale koordinater ønsker man å lage et best mulig kart over et område, og feste dette til et globalt koordinatsystem slik at det kan brukes under andre tokt og av andre. Fremgangsmåten er at man har en liten del av terrenget godt kartlagt i globale koordinater, og så bruker dette som referanse ved stadig å besøke det igjen. Etter hvert som kartleggingen skrider frem vil stadig mer av terrenget bli godt posisjonert og kan brukes som referanseterreng. For å sikre dette bør man ha godt med overlapp i kartleggingen. Det opprinnelige referanseterreng kan enten være kartlagt tidligere eller bli kartlagt med GPS/dGPS støtte i starten av kartleggingen. FFIBMs TRIN system kan gjøre slik områdekartlegging med en metode hvor terrenget rundt farkosten modelleres i et Kalmanfilter. Det er vist at både posisjon og kart blir av god kvalitet så lenge man ikke beveger seg for langt bort fra det godt kartlagte området, se (8).

9.2 Forbedring av posisjonsestimat

Under visse betingelser kan man forbedre posisjonsestimatet vha lokal kartlegging, uten at kartet trenger å festes nøyaktig i et globalt referansesystem. Metoden går ut på å kartlegge et lokalt område man senere under samme tokt kan vende tilbake til. Når man så senere gjør terrengreferert posisjonering i området får man en posisjonsnøyaktighet i globale koordinater ned mot den man hadde da man laget kartet, og bare metodefeilen i lokale koordinater. Metoden vil med andre ord fjerne mye av den økningen av posisjonsfeil man har hatt etter kartleggingen. Man vil også få en reduksjon av hastighetsfeilen, som er gunstig i det videre toktet.

9.2.1 Manøveroppdatering

Dersom man har et Kalmanfilter i navigasjonssystemet kan man forbedre posisjonen også i globale koordinater ved lokal kartlegging. Metoden utnytter, og krever, korrelasjoner mellom hastighets- og posisjonsfeil. I korthet går metoden ut på at man kartlegger et lite område, drar unna det en kort tid, og vender tilbake og finner posisjonen i kartet. Tida man manøvrer mellom kartlegging og retur må være så lang at hastighetsfeilen gir en posisjonsfeil som er signifikant i forhold til posisjoneringsnøyaktigheten relativt kartet, samtidig bør hastighetsfeilen ikke få variere for mye. Under disse betingelsene vil oppdateringen etter manøveren bringe

hastighetsfeilen mot null og dermed redusere driften i posisjon videre i toktet. Avhengig av hvor nær konstant hastighetsfeilen er (tidskonstanten) kan man også redusere feilen man hadde ved den opprinnelige kartleggingen, ved at man delvis kjenner hastighetsfeilen man hadde tidligere i toktet. Vi har ikke testet slike metoder som en del av denne rapporten.

10 TERRENGKARAKTERISERING

Det kan være behov for å ha en metode for å kunne karakterisere et terrengs egnethet for terrengreferert posisjonering før man drar inn i det. Dersom man skal inn i en ukjent region kan det være ønskelig å undersøke kart for hele regionen for å finne de områdene som er best egnet for terrengreferert posisjonering. Dersom prisen for sonarbruk er høy (røping, energi) kan man før man gjør målinger undersøke om det er sannsynlig at man får et godt posisjonsestimert. Man kan alltid gjøre undersøkelser med simuleringer, så en eventuell uavhengig metode bør være mer effektiv dersom det skal være noe poeng i å bruke den. Man kan merke seg at hvor egnet terrenget er vil avhenge av størrelsen på søkeområdet og hvor lang profil man måler opp, slik at resultatene vil endre seg dersom man endrer disse parametrene. Under følger en drøfting av noen mulige metoder og simuleringsresultat for de samme metodene.

10.1 Informasjonsinnhold og gradient

I følge (4) er gjennomsnittlig lengde av terrenggradienten, $\sqrt{\frac{1}{N} \sum_i \|\nabla d(x_i)\|^2}$, proporsjonal med informasjonsinnholdet i et område av kartet. Kriteriet har imidlertid den svakheten at det i liten grad klarer å registrere at terreng gjentar seg. Det ser dermed ut til å mangle et vesentlig element av hva en karakteringsfunksjon må ha. Dette blir bekreftet gjennom simuleringer.

10.2 Standardavvik

Standardavviket et mål på variasjonen i et datasett. Ettersom vi i et kart kan tenke oss å ha et standardavvik langs radene for hver kolonne og omvendt, blir det her snakk om et gjennomsnittlig standardavvik for kolonne- og radretning (øst og nord). Standardavviket vil til en viss grad kunne plukke opp at terrenget gjentar seg.

10.3 Frekvensinnhold

Et annet alternativ er å se på frekvensinnholdet, f.eks. i form av spektraltetthet. Man vil da kunne plukke opp både variasjon og gjentakelse. Det har imidlertid ulemper: beskrivelsen er i form av to komponenter (frekvens og amplitude) og kan være vanskelig å tolke. Noen kombinasjoner av lav- og høyfrekvente komponenter vil gi god posisjonering, mens andre gir dårlige. I (10) brukes båndbredden, definert som den bølgelengden (i meter) 90% av energien ligger innenfor. Vi har testet dette, uten at resultatene var spesielt overbevisende.

10.4 Repetivitet/Unikhet

Repetivitet, eller motsetningen unikhet, er et enkelt mål: Hvor mange dybder er unike, alternativt gjentar seg, langs en linje? Kriteriet er inspirert av signalbehandlingens 'topologisk entropi', som er et mål på hvor mange sekvenser av samtlige mulige som opptrer i et signal. Man kan her ikke se på 'gjentar seg' som identisk like, men som så like at systemet ikke kan skille mellom dybdene gitt feilene i sensorene. I simuleringene har vi avrundet alle kartdybder til nærmeste meter og sett på hvor mange som er like av disse (repetivitet) langs en rad/kolonne. Så langt ser disse metodene mer lovende ut enn metodene nevnt tidligere.

10.5 Simuleringsresultat

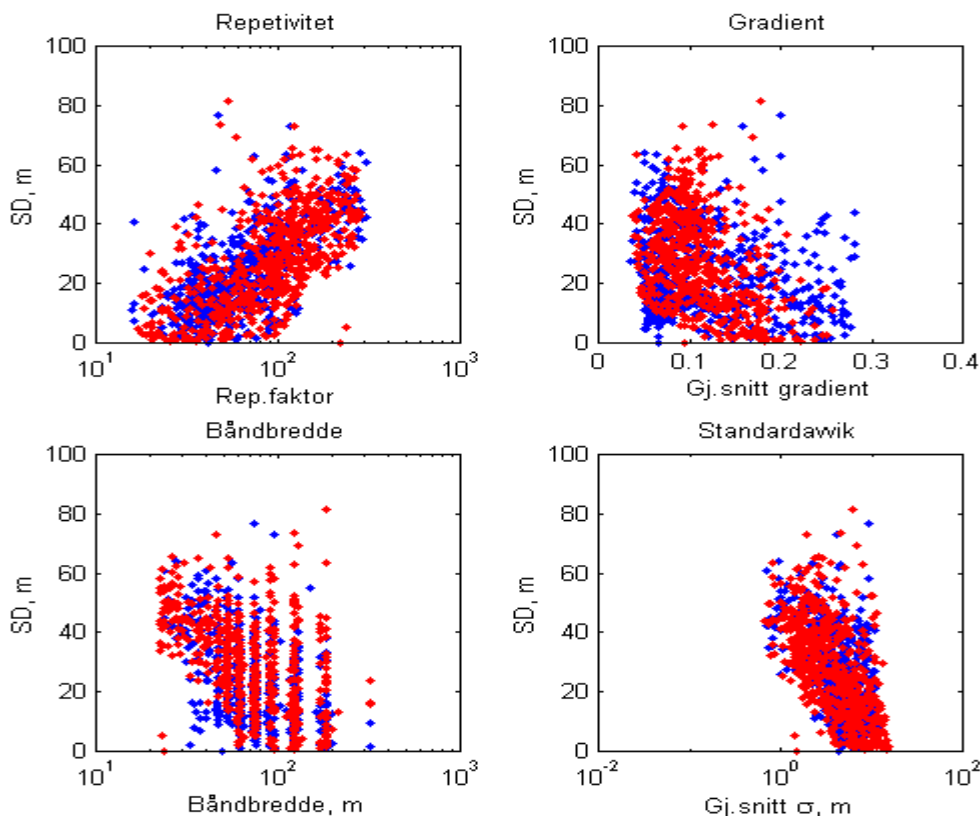
Vi gjorde enkle simuleringer for å undersøke godheten til metodene gradient, standardavvik, båndbredde og unikhet. Et antall like lange profiler ble simulert forskjellige steder i et kartblad og kjørt i PMF, samtidig som terrengkarakteristikkene ble beregnet for søkeområdet. Kartet var det samme som er vist i Figur 7.5. Resultatene er vist i Tabell 10.1 og grafisk i Figur 10.1. Vi har hele tiden sammenlignet med standardavviket PMF beregner.

For korrelasjonskoeffisienter og figurer er det det som ga best match av lineær og logaritmisk kurve (ln) som er gjengitt.

Metode	Korrelasjon mot σ , Nord	Korrelasjon mot σ , Øst	Korrelasjon, samlet
Repetivitet (ln)	0.67	0.62	0.65
Gradient	-0.20	-0.40	-0.28
Båndbredde (ln)	-0.39	-0.49	-0.44
Standardavvik (ln)	-0.52	-0.57	-0.56

Tabell 10.1: Korrelasjon for karakteriseringsfunksjoner

Korrelasjonskoeffisienten er den normaliserte kovariansen, og beskriver hvor mye av variasjonen i to størrelser som er felles. En korrelasjonskoeffisient på 0.5 sier at 50% av variansen i a er felles med b ('forklares' av b) og kan beregnes fra denne. Det fremgår av tabellen at repetivitet er best, fulgt av standardavvik. Disse to har også best overensstemmelse mellom nord og østretning. Selv for den beste, repetivitet, gjenstår det en god del variasjon å forklare, og indeksen må antagelig raffineres en del før den kan brukes i et terrengkarakteriseringssystem. Det ser man også klart fra figuren. Simuleringene er kjørt med en fast profillengde, det må også ses på i hvilken grad det er mulig å skalere med lengden på profilen.



Figur 10.1: Sammenheng mellom mulige terrenkarakteriseringsfunksjoner og standardavvik. Blå er nord, rød er øst.

11 KONKLUSJON

Vi har undersøkt to søkemetoder for terrenkarakterisert posisjonering, PMF og TERCOM. Av disse to metodene er PMF klart best. Den har noe bedre konvergenssegenskaper, men skiller seg først og fremst ut ved at den er en statistisk estimator. Dette betyr at den utnytter informasjon om posisjonsfeilens og dybdefeilens fordeling, som igjen gir den klare fordelingen at den kan beregne godheten av estimatet i form av et standardavvik. Metoden er imidlertid mer regnekrevende enn TERCOM.

For gradientmetoder har vi hovedsakelig bygd på arbeid gjort ved FFIBM. Gradientmetoder er lite regnekrevende og kan gå som en del av navigasjonssystemets Kalmanfilter. Gradientmetoder fungerer bra for små posisjonsfeil, men dersom feilen er stor kan man bli nødt til å bruke en annen metode for å få ned feilen. Metodene bør derfor ikke brukes alene dersom man har en mulighet for stor posisjonsfeil.

Simultan kartlegging og lokalisering kan være aktuelt i visse anvendelser. FFIBMs arbeid med slike metoder i TRIN vil danne et godt utgangspunkt for slike systemer.

Den mest lovende metoden for terrenkarakterisering vi har undersøkt er repetivitet. Det gjenstår

imidlertid en god del arbeid før metoden kan sies å være ferdig til bruk.

Det forgår arbeid med terrengreferert posisjonering for undervannsfarkoster både på FFIBM og FFIE. De siste årene har det vært et godt koordinert og fruktbart samarbeid mellom avdelingene. Dette samarbeidet bør fortsette.

Litteratur

- (1) AHLSEN Erik Lofstad, MANDT Magne (2001): Ubåtnavigasjon - krav og scenarier, FFI/RAPPORT-2001/05901, KONFIDENSIELT
- (2) MANDT Magne (2001): Navigasjonssensorer for nye ubåter, FFI/RAPPORT-2001/05961, KONFIDENSIELT
- (3) Russel Enns, Daryll Morell (1995): Terrain Aided Navigation Using the Viterbi Algorithm, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 18, 6, 1444-1449.
- (4) N. Bergmann, L. Ljung, F. Gustavsson (1999): Terrain Navigation Using Bayesian Statistics, *IEEE Control Systems Magazine* 19, 3, 33-40.
- (5) Oddbjørn Bergem (1993): Bathymetric Navigation of Autonomous Underwater Vehicles using a Multibeam Sonar and Kalman Filter with Relative Measurement Covariance Matrices, Dr. scient avh., Universitet i Trondheim, Trondheim.
- (6) Maarten Uijt de Haag, Steven D. Young, Robert A. Gray (2001): A Performance Evaluation of Elevation Database Integrity Monitors for Synthetic Vision Systems , Paper, 8th International Conference on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg, 28-30 Mai.
- (7) STØRKERSEN Nils, HAGEN Per Espen, HAGEN Ove Kent (2001): Møte på SACLANTCEN i GOATS Joint Research Project, 21-24 August 2001, FFI/REISERAPPORT-2001/04984, Untatt Offentlighet
- (8) KLOSTER Morten, HEYERDAHL Eilert (1997): Terrengnavigasjon med multistrålesonar for AUV, FFI/RAPPORT-97/04698, FORTROLIG
- (9) Wang Tang, Gregory L. Mealy (1981): Application of Multiple Model Estimation Techniques to a Recursive Terrain Correlation Sytem, *IEEE*.
- (10) A. Bar-Gill, P. Ben-Ezra, I. Y. Bar-Itzhack (1994): Impovement of Terrain-Aided Navigation via Trajectory Optimization, *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 2, 4, 337.

APPENDIKS**A AKRONYMER OG FORKORTELSER**

AUV	Autonomous Underwater Vehicle, autonom undervannsfarkost
CML	Concurrent Mapping and Localisation, simultan kartlegging og posisjonering
CVL	Correlation Velocity Log, korrelasjonslogg. Aktiv akustisk måling av bunnreferert hastighet
DVL	Doppler Velocity Log. Aktiv akustisk måling av bunnreferert hastighet
GPS	Global Positioning System
dGPS	Differensiell GPS, GPS med støtte fra referansestasjon
MBE	Multi Beam Echosounder, multistråle ekkolodd
PMF	PunktMasseFilter, terrengkorrelasjonsmetode
RTK-GPS	Real Time Kinematic GPS, GPS med støtte av lokal basestasjon.
SITAN	Sandia Inertial Terrain Aided Navigation, gradientmetode
TERCOM	Terrain Contour Matching, terrengkorrelasjonsmetode.
TNS	TreghetsNavigasjonsSystem, integrerer målinger fra TSE til attityde, hastighet og posisjon
TRIN	Terrain Referenced Integrated Navigation, terrengkorrelasjonspakke fra FFIBM

FORDELINGSLISTE

FFIE
Dato: 18 Desember 2001

RAPPORTTYPE (KRYSS AV)		RAPPORT NR.	REFERANSE	RAPPORTENS DATO	
<input checked="" type="checkbox"/> RAPP	<input type="checkbox"/> NOTAT	<input type="checkbox"/> RR	2001/05900	FFIE/771-U/132.1	18 Desember 2001
RAPPORTENS BESKYTTELSESGRAD			ANTALL EKS UTSTEDT	ANTALL SIDER	
UGRADERT			42	42	
RAPPORTENS TITTEL TERRENGREFERERT POSISJONERING FOR UNDERVANNSFARKOSTER			FORFATTER(E) MANDT, Magne		
FORDELING GODKJENT AV FORSKNINGSSJEF:			FORDELING GODKJENT AV AVDELINGSSJEF:		

EKSTERN FORDELING

INTERN FORDELING

ANTALL	EKS NR	TIL	ANTALL	EKS NR	TIL
1		SFK/T	14		FFI-Bibl
1		v/ KK Hans-Christian Kjelstrup	1		Adm direktør/stabssjef
1		FO/SST/PLAN 2	1		FFIE
1		v/ KK Ole Bosse	1		FFISYS
1		SFK/P-PPG03	1		FFIBM
1		v/ Tor Arild Orre	1		Jon Mikael Størdal, FFIE
1		UVBI	1		Stig Lødøen, FFIE
1		v/ OK Christian Harstad	1		Arild Melkevik, FFIE
1		KNM Tordenskjold	1		Erik Lofstad Ahlsen, FFIE
1		v/ OK Petter Solheim	1		Pål Kristiansen, FFIE
			1		Bjørn Jalving, FFIE
			1		Kenneth Gade, FFIE
			1		Emil Brodersen, FFIE
			1		Øistein Hoelsæter, FFIE
			1		Nils Størkersen, FFIBM
			1		Per Espen Hagen, FFIBM
			1		Ove Kent Hagen, FFIBM
			1		Bjørn Bruun, FFIBM
			1		Magne Mandt, FFIE

FFI-K1

Retningslinjer for fordeling og forsendelse er gitt i Oraklet, Bind I, Bestemmelser om publikasjoner for Forsvarets forskningsinstitutt, pkt 2 og 5. Benytt ny side om nødvendig.