

John Cantwell, Johan Schubert och Per Svensson

# **Informationsfusion**

**Förslag till “strategisk forskningskärna” år 2001-2005**

John Cantwell, Johan Schubert och Per Svensson

# Informationsfusion

Förslag till "strategisk forskningskärna" år 2001-2005

**Distribution:** Fö (2 ex), FM HKV KRI (3 ex), FM HKV KRI LED (3 ex), FM HKV STRA (3 ex), FM MUST (3 ex), FM UndSäkC (3 ex), FM ATK (3 ex), FM MTK (3 ex), FM FTK (3 ex), FMV ELEKTRO (3 ex), FMV SYST (3 ex), FRA (3 ex), FHS (3 ex), SAAB Tech Systems (5 ex), Ericsson Microwave (3 ex), Linköpings universitet Datavetenskap (3 ex), KTH NADA (6 ex).  
FOA: GD (1 ex), Program (2 ex), Strat (1 ex), 1 (6 ex), 3 (5 ex), 5 (5 ex), 6 (5 ex), 7 (50 ex)



<b>Dokumentets utgivare</b> Försvarets Forskningsanstalt Avdelningen för Ledningssystemteknik Box 1165 581 11 Linköping	<b>Dokumentnamn och dokumentbeteckning</b> FOA-R--00-01632-505--SE	
	<b>Dokumentets datum</b> Oktober 2000	<b>Projektnummer</b> E 7037
	<b>Projektnamn (ev förkortat)</b> Strategisk förstudie Informationsfusion	
<b>Upphovsman(män)</b> John Cantwell, Johan Schubert, Per Svensson	<b>Uppdragsgivare</b> FOA Forskningsstrategi	
	<b>Projektansvarig</b> Per Svensson	
	<b>Fackansvarig</b> Per Svensson	
<b>Dokumentets titel</b> Informationsfusion. Förslag till "strategisk forskningskärna" år 2001-2005		
<b>Huvudinnehåll</b> Vi beskriver ett förslag till strategisk forskningsinsats inom området Informationsfusion, avsett att bedrivas under åren 2001-2005. Förslaget har ett starkt inslag av forskningssamverkan mellan Försvarets forskningsanstalt (FOA) och universitet och högskolor (UoH). Samråd i nätverksform med försvarsindustri och domänexpertis från Forsvarsmakten och Forsvarshögskolan planeras, bl a genom inrättande av en referensgrupp. Samverkan med UoH föreslås ta formen av ett doktorandprogram med handledning från såväl UoH som FOA.		
<b>Nyckelord</b> informationsfusion, datafusion, situationsvärdering, hotvärdering, resursallokering		
<b>Övriga bibliografiska uppgifter</b>	<b>Språk</b> Svenska	
<b>ISSN</b> 1104-9154	<b>ISBN</b>	
	<b>Omfång</b> 42 sidor	<b>Pris</b> Enligt prislista

**Distributör (om annan än ovan)**

<b>Issuing organization</b> Defence Research Establishment Division of Command and Control Warfare Technology P. O. Box 1165 SE-581 11 Linköping SWEDEN	<b>Document name and doc.ref.no.</b> FOA-R--00-01632-505--SE	
	<b>Date of issue</b> October 2000	<b>Project No.</b> E 7037
	<b>Project name (abbrev. if necessary)</b> Strategic prestudy Information fusion	
<b>Author(s)</b> Johan Cantwell, Johan Schubert, Per Svensson	<b>Initiator or sponsoring organization</b> FOA Research strategy	
	<b>Project manager</b> Per Svensson	
	<b>Scient. and techn. responsible</b> Per Svensson	
<b>Document title</b> Information Fusion. Proposal for a "strategic research kernel" 2001-2005.		
<b>Abstract</b> We present a proposal for a strategic research activity in the area of Information fusion. This activity is intended to be carried out during 2001-2005. The proposal contains research cooperation between the Defence Research Establishment (FOA) and university. We propose to create a network of observers from industry and of domain experts from the Armed Forces and the Defence Academy. Cooperation between FOA and university research will be organized as a Ph. D. study program involving supervisors from both university and FOA.		
<b>Key words</b> Information fusion, data fusion, situation assessment, threat assessment, resource allocation		
<b>Further bibliographic information</b>	<b>Language</b> Swedish	
<b>ISSN</b> 1104-9154	<b>ISBN</b>	
	<b>Pages</b> 42 pages	<b>Price</b> Acc. to pricelist
<b>Distributor (if not issuing organization)</b>		

## Innehåll

1. Sammanfattning	1
1.1. Försvarsmaktens behov av metodik för informationsfusion	1
1.2. Nätverk och projektsamverkan	3
2. Kunskapsöversikt över situationsanalys, hotanalys och resursallokering	5
2.1. Situationsanalys	5
2.2. Hotanalys	10
2.3. Resursallokering	11
3. Forskargrupper inom Management of Uncertainty	13
3.1. Forskargrupper inom bayesiansk teori	13
3.2. Forskningsgrupper inom Dempster-Shaferteori	16
3.3. Forskargrupper inom possibilistisk teori	20
3.4. En jämförelse mellan de olika metodikerna	20
4. Internationella program	23
4.1. NATO Data Fusion Demonstrator (DFD)	23
4.2. NATO Task Group on Information Fusion	23
4.3. EUCLID Advanced Workstation for Command and Control Systems	24
4.4. DREV-projekten ACTIF och CASE ATTI	26
4.5. Command and Control Information Systems - DARPA	27
4.6. Enhanced All-Source Fusion - AFRL/IFEA	27
5. Projektförslag	29
5.1. Modeller för situations- och hotanalys som kan möjliggöra effektiv allokering av sensorresurser	29
5.2. Effektiv allokering av sensorresurser	32
5.3. Forskningsprogram	33
6. Litteraturlista	35

# 1 Sammanfattning

Vi beskriver ett förslag till strategisk forskningssatsning inom området Informationsfusion, avsett att bedrivas under åren 2001-2005. Förslaget har ett starkt inslag av forskningssamverkan mellan Försvarets forskningsanstalt (FOA) och universitet och högskolor (UoH). Samråd i nätverksform med försvarsindustri och domänexpertis från Försvarmakten och Förvarshögskolan planeras, bl a genom inrättande av en referensgrupp. Samverkan med UoH föreslås ta formen av ett doktorandprogram med handledning från såväl UoH som FOA.

Förslaget syftar till utveckling av metodik som skall möjliggöra informationsöverlägsenhet i Försvarmaktens framtida ledningssystem, men avsikten är inte i första hand att ta fram konkret teknologi för den första generationens *Revolution in Military Affairs* (RMA)-demonstratorer, utan att lägga grunden till praktiska tillämpningar i ledningssystemet i tidsperspektivet 2005-2010 och därbortom. För att göra detta på ett effektivt sätt anser vi att projektet behöver ha god insyn i och dialog med pågående demonstratorutveckling. I bästa fall kan en sådan dialog leda till lyckade praktiska tillämpningar av informationsfusion redan i den första generationens ledningssystemdemonstratorer.

Projektförslagen innebär kunskapsuppbyggnad och metodutveckling inom områdena behandling av osäker information (*management of uncertainty*), styrning av informationsinhämtning samt fusionsarkitekturer, med inriktning mot tillämpningar inom *situationsvärdering, hotvärdering och resursstyrningsprocesser i ett informationsfusionssystem för insatsledning*. Resultat av forskningen förväntas bli ökad förmåga att med känd informationskvalitet göra utsagor om position, identitet, omfattning, verksamhet, hotpotential och handlingsalternativ för komplexa, rörliga mängdobjekt (främst förbandsobjekt). Utsagorna baseras på metodik för aggregering, korrelering, verksamhetsidentifiering m m i ett distribuerat system av fusionsnoder.

## 1.1 Försvarmaktens behov av metodik för informationsfusion

Någon uttalad försvarmaktspolicy finns f n inte för datafusion, än mindre för delområdet informationsfusion. Nedanstående försök till karakterisering av Försvarmaktens behov av metodik för informationsfusion är därför preliminär och subjektiv, fast den grundas på flera års deltagande i studier och utredningar inom området för Försvarmaktens räkning, liksom på flera års forskning inom området.

Syftet med informationsfusion i lednings- och underrättelsesystem är att ge chefer och underrättelseofficerare stöd i sitt arbete med att planlägga anskaffning av, bearbeta och konceptualisera information om ett hot under ett pågående dynamiskt stridsförlopp. Sensorer och multisensorsystem har viktiga roller som "underleverantörer" till denna process, men vårt fokus är alltså frågan hur man kan utforma en adekvat datorstödd metodik för modellering, skattning, representation, tolkning och prognostisering av hotets omfattning, struktur, beteende och handlingsmöjligheter, utgående från vad som är känt om motståndarens läge och doktrin.

Några argument för nyttan av en framgångsrikt införd informationsfusion i ledningssystemet är:

- genom att ta steget från manuell till automatiserad övervakning kan man hantera situationer där tidspresen är större än människan säkert kan hantera, t ex försvar mot inkommande

sjömålsrobot eller taktisk ballistisk missil, där problemkomplexiteten är för stor jämfört med tillgänglig personalstyrka, t ex tolkning av satellitbilder eller av lägesbilder i det digitala slagfältet, eller där förmåga till kvantitativ osäkerhetshantering är viktig i sig, exempelvis när man vill utnyttja insamlad information på det mest kostnadseffektiva sättet givet existerande insamlingsresurser (om vi t ex inte har resurser att lägga ut så många sensorer att vi kan vara säkra på att detektera, lokalisera och identifiera alla potentiella mål, hur ska vi då optimera sensorutnyttjandet?),

- man kan automatiskt hantera många situationer där man inte har direkt observationell information, t ex därför att hotobjekt ännu inte emitterat någon strålning, men där man istället kan dra indirekta slutsatser från andra informationskällor som talar för att ett hot av viss typ föreligger,
- separering av detektion, tolkning och beslut i delprocesser gör att man under vissa förutsättningar kan väga in fler aspekter eller informationsmoder i tolkningsprocesserna och därigenom öka slutsatsernas trovärdighet radikalt,
- de enda gemensamma “språk” som systematiskt kan användas för att stringent väga samman information från många olika källor är någon form av matematiskt grundad (kvantitativ eller kvalitativ) osäkerhetsteori.

Studier av detta problemområde, vars olika delar i datafusionslitteraturen ofta kallas *situationsanalys*, *hotanalys* och *resursadaptation*, måste baseras på modellering, simulering och resultatanalys av sammansättning och beteende hos fientliga förband, liksom på relevanta delar av tillgänglig underrättelseinformation, egenskaper hos egen underrättelseledning, tillgängliga sensorer och signalerna från dessa, samt inte minst den omgivande miljön. Informationsfusion för lednings- och underrättelsesystemtillämpningar är ett komplext, tvärvetenskapligt forskningsfält. Idag bedrivs forskning inom detta område i alltför liten omfattning i Sverige för att vi skall kunna hänga med i utvecklingen. Internationellt har dock området blivit allt viktigare, och det är knappast någon överdrift att säga att det utgör den metodmässiga kärnan i koncept som digitala stridsrummet och de olika försvarsgrensvisioner som tagits fram inom det amerikanska försvarsdepartementet (US DoD).

Försvarsmakten har i samband med sin stora satsning på att utveckla ett svenskt RMA-försvar visat ökat intresse för tillämpning av metodik för informationsfusion i lednings- och underrättelsesystem. Än så länge är ändå forskningsinsatsen relativt liten och består under 2000 av de nedan nämnda projekten *Taktisk informationsfusion* och *Sensor management for ASW*. Ett projekt som bedrivs inom ramen för det nationella flygtekniska försöksprogrammet (NFFP) har också nyligen påbörjats. Det drivs av SAAB och FOA i samarbete och har till syfte att studera fusionsproblem för markmål. Övriga existerande projekt inom området data- och informationsfusion vid FOA är antingen inriktade mot (multi)sensorfusion eller mot plattformstillämpningar, men gränsen mellan ledningssystem- och plattformstillämpningar kommer troligen successivt att bli otydligare.

Övlt Per Nilsson vid Försvarsmaktens högkvarter (FM HKV) är en av de officerare som driver RMA-utvecklingen. Vi har intervjuat honom om vilka behov av informationsfusion han ser i det framtida ledningssystemet, respektive i de nu planerade demonstratorsystemen. Svaret blev i korthet följande: behovet är klart identifierat och FM strävar efter att få med metodik för informationsfusion redan i den första generationen demonstratorsystem, omkring år 2005, även om det bara kan ske i begränsad omfattning. Eftersom fusionerad lägesinformation för luftmål och sjöymål



existerar redan idag, föreslår Per Nilsson att man i första hand utgår från denna när man vill börja införa informationsfusion. På lite längre sikt (med början någon gång mellan 2005 och 2010) skall även markmålsinformationen kunna analyseras med informationsfusionsmetoder.

Intressant är att jämföra dessa synpunkter med intryck från en nyligen genomförd USA-resa för att studera data- och informationsfusion. Vid Air Force Research Laboratory (AFRL) framhöll man exempelvis att US Air Force sedan nästan tio år fokuserar sina forskningsresurser på markmålsfrågor, och att (sensor)datafusion för luftmål betraktas som ett väsentligen löst problem (dvs till dess att presumtiva motståndare kan uppvisa förmåga att möta USAs flyg på ett effektivt sätt, vilket inte anses föreligga idag). Detta understryker att fusionsproblemen för markmålsituationer av flera skäl är långt mer komplexa och svårbemästrade än de är för luft- och sjömål. Skymd sikt och tillgång till olika former av skyl, vilseledning och skenmål, mängd, stor variation och komplexitet hos förband och andra resurser och inblandning i civila miljöer, är sådana faktorer. Ett annat skäl är att hot på land kan anta praktiskt taget vilken skepnad som helst, medan effektivt uppträdande i luften eller på sjön förutsätter relativt robusta och förhållandevis lätt upptäckta, oftast rörliga plattformar eller missiler.

## 1.2 Nätverk och projektsamverkan

Nedanstående projektförslag har utarbetats i samråd med en intressegrupp för informationsfusion, kallad *IQ Ledning*. Formellt är IQ Ledning ett projekt som stöds av Nutek. SAAB (inklusive SAAB Tech Systems, f d Celsius Tech Systems; Bengt Gustafsson, Klas Wallenius), Kungl. Tekniska Högskolans institution för Numerisk Analys och Datalogi (KTH NADA; Stefan Arnborg, doktorand Joel Brynielsson), Försvarshögskolan (FHS; ROLF-projektet), Försvarets Materielverk (FMV) och FOA (Per Svensson) deltar i projektet. Projektledare är Lars Eriksson, Ledab. Projektet IQ Ledning har pågått ett drygt år och har bl a producerat en studie av begreppet Informationskvalitet, som dokumenterats i ett examensarbete [Brynielsson00] och en konferensartikel [Arnborg00].

Ett förslag till brett samverkansprojekt inom området data- och informationsfusion för Försvarets planerade RMA-demonstratorer har tagits fram av SAAB Tech Systems och FOA i samarbete. Förslaget har lämnats till FMV projekt för bedömning.

Inom FOA-studien LUST drivs en intressegrupp för datafusion. Denna grupp, som är informell och vars verksamhet huvudsakligen bedrivs i seminarieform, behandlar i första hand frågor inom sensordatafusion, medan informationsfusion hittills rönt ett svagare intresse. Gruppmedlemmarna kommer från försvarsindustrin, FMV och FOA.

Under våren 2000 har det nya studien LUST DS (Decision Superiority) startats, där bl a en separat delstudie planeras, med syftet att beskriva möjligheter och förutsättningar för att olika typer av informationsfusionsförmågor skall kunna ingå i Försvarets ledningssystem vid olika tidpunkter i framtiden (2005, 2010, 2020).

FOA-projektet Taktisk informationsfusion inom FoT-område Ledning, som påbörjades 2000-01-01, har bildat en referensgrupp med deltagare från Försvaretsmakten och FMV. Denna referensgrupp, eller snarare dess efterträdare under åren 2001-3, bör även kunna ingå i en samrådsgrupp för ett strategiskt forskningsprojekt inom informationsfusion.

Internationella kontakter har etablerats bland annat med informationsfusionsgrupperna vid Defence Research Establishment Valcartier (DREV), Canada; TNO (Netherlands Organisation for Applied Scientific Research), Nederländerna; Defence Forces Research Institute of Technology (DFRIT), Finland; Forsvarets forskningstjeneste (FOFT), Danmark; Defence Evaluation and Research Agency (DERA), Storbritannien; US Navy Space and Naval Warfare Systems Command (SPAWAR) och AFRL (USA); samt med Center for Distributed Multisource Information Fusion (DMIF) vid State University of New York at Buffalo. FOAs internationella kontaktnät på informationsfusionsområdet är alltså idag ganska väl utvecklat.

## 2 Kunskapsöversikt över situationsanalys, hotanalys och resursallokering

### 2.1 Situationsanalys

#### 2.1.1 Underrättelsehantering

Ett *multisensorsystem* är ett antal sensorer som var för sig skall bidra till en enhetlig situationsbeskrivning. Ett större multisensorsystem kan i sin tur bestå av flera mindre. Här är det på sin plats att tala om *system av multisensorsystem*. På högre nivå kan de dedicerade delsystemen betraktas som enskilda sensorer i ett större multisensorsystem.

De mindre systemen kan vara dedicerade system: en specifik kombination av sensorer, ofta riktade mot ett begränsat område (men inte alltid: jämför sammanlänkade flygradar), som sammantaget kan antas vara bra på att lösa specifika uppgifter, till exempel klassifikation eller spårning. Homogena multisensorsystem kombinerar ett antal likartade sensorer för att få bättre täckning eller upplösning. Heterogena multisensorsystem kombinerar olika sensortyper för att kompensera för svagheter hos de individuella sensortyperna.

Abstraktionsnivån på sensorrapporterna varierar från sensortyp till sensortyp, alltifrån obearbetade signaler med låg informationshalt till rikhaltiga rapporter från mänskliga observatörer. I dagsläget kräver de flesta sensorsystem utbildade operatörer för att tolka sensordata och omvandla dem till underrättelserapporter. Med ökad automatisering av klassifikation, bildigenkänning m m kan man förvänta sig att operatörens insatser minskar eller ändrar karaktär. På längre sikt kommer vi att få system som automatiskt genererar underrättelserapporter. En rimlig utgångspunkt är att multisensorsystem på högre nivå enbart skall hantera rapporter med relativt hög abstraktionsnivå.

All rapportering är förknippad med olika grader av osäkerhet. Moderna sensorer kan i många fall själva ange ett osäkerhetsmått på sina rapporter men den metodologiska utgångspunkten måste vara att dessa mått är en för sensorn intern representation. Det gäller i synnerhet för mänskliga observatörer: att en människa säger sig vara säker på sin sak innebär inte att rapporten kan behandlas som säker. Automatiska sensorer kan i högre grad testas och kalibreras men även dessa kan utsättas för mera systematisk störning, antingen medvetna försök att störa sensorn, ogynnsamma väderförhållanden eller interna fel.

Idag finns det ett batteri av olika metoder för att kombinera information från olika informationskällor som tar hänsyn till osäkerhet i olika dimensioner. Klassisk statistisk, bayesianska metoder [Jeffrey83, Pearl88, Bigün97], *Partial Probability Theory* (PPT) [Voorbraak97], Dempster-Shaferteori [Shafer76, Smets94] och *Evidentiary Value Model* (EVM) [Gärdenfors83] har alla använts och det finns studier där respektive metods styrkor/svagheter analyserats [Kyburg87, Halpern92]. Det finns även viss forskning baserad på kvalitativ representation av osäkerhet [Lin96, Cantwell98]. När olika sensorer är tränade mot olika mål är det viktigt att man vid fusion tar explicit hänsyn till detta [Janez98].

Metoder för att dynamiskt bedöma informationskällors trovärdighet är mindre utvecklade men även här finns det lovande ansatser baserade på bl a bayesianska metoder [Bigün97].

## 2.1.2 Aggregeringsproblemet och igenkänning av beteenden

Aggregeringsproblemet för mängder av objekt har vissa likheter med klassificerings- och identifieringsproblemet för enstaka objekt. Man skall på basis av observationer av enstaka objekt (attribut hos ett objekt) sluta sig till vilken typ av enhet (vilken typ av objekt) som det handlar om. Svårigheterna är i vissa avseenden likartade. Hur avgör man om två eller flera observationer härrör från samma enhet (samma objekt)? Vilken typ av förkunskap behöver man för att kunna avgöra vilken enhet (objekt) de olika objekten (attributen) tillhör? Hur skall förkunskapen representeras, hur går själva utvärderingen till och hur skall man bäst representera osäkerhet i slutsatserna?

Den tillgängliga litteraturen som direkt behandlar aggregeringsproblemet är ytterst begränsad [Rasmussen98, Johnson99, Schwartz00, Björnfot00a, Björnfot00b]. Likheter med klassificerings- och identifieringsproblemet kan tjäna som en metodologisk utgångspunkt eftersom det finns en hel del relevant litteratur på dessa områden (statistisk och bayesiansk metodik [Waltz90, Pearl88, Liu96, Chang96, Chang97] och Dempster-Shafermetoder [Denœux95a, Denœux95b, Denœux00a, Bogler87, Simard96, Bossé97]). Den geografiska utspridningen av enheter och de speciella funktionella samband som kan finnas mellan olika delenheter (exempelvis grupperingsmönster vid förflyttning [Björnfot00a, Björnfot00b]) är emellertid specifika för aggregering och kräver speciell behandling.

I aggregeringsproblemet tillkommer komplikationen att enhetstyperna är hierarkiskt ordnade. Olika objekt kan tillhöra olika förband, olika förband kan tillhöra olika kompanier, etc. Säker identifiering på en nivå kan kombineras med osäker identifiering på en annan nivå. Samtidigt är inte nivåerna oberoende av varandra. Större enheter kan ha vissa specifika mindre delenheter vilket kan underlätta identifieringen av delenheter samtidigt som vissa mindre enheter i sig kan vara organisationsbestämmande. Metoder som kan hantera sådana beroenden måste alltså anses speciellt intressanta. Metoder för hierarkisk aggregering finns beskrivna i [Johnson99, Björnfot00a, Björnfot00b], men ingen av dessa tar upp beroendeförhållanden mellan olika hierarkiska nivåer.

En större enhet kan vara utspridd över ett stort område, så att två olika observationer på två olika platser kan härröra från samma större enhet. Detta är ett problem redan när observationerna görs vid samma tidpunkt. Om de sker vid olika tidpunkter så tillkommer korreleringsproblemet. I armésammanhang kan det vara ogörligt att spåra enstaka objekt så korrelering måste i första hand inriktas på större enheter än enstaka objekt. Det är alltså knappast ändamålsenligt att betrakta aggregering och korrelering som två isolerade och av varandra oberoende processer.

Både aggregering och korrelering handlar om att associera delmängder av den totala mängden rapporter på ett sådant sätt att varje delmängds rapporter motsvarar ett objekt eller en enhet. Mängden delmängder ökar exponentiellt med mängden rapporter så det är nödvändigt att först göra en grov sällning av vilka rapporter som kan tänkas tillhöra samma objekt eller enhet (*gating, clustering*). I grunden är detta ett optimeringsproblem och ett brett urval av metoder har applicerats på just klustring: fuzzy control, neurala nätverk etc. [Jain88, Ester96, Jain99, Schubert95, Schubert99].

Vid aggregering är *ett* viktigt kriterium i en grovsällning geografiskt avstånd mellan rapporterna: två objekt som befinner sig alltför långt ifrån varandra kan antas inte tillhöra samma enhet. Vad som skall betraktas som "alltför långt" avstånd måste givetvis variera med aggregeringsnivån. För ett litet förband lär avståndet i allmänhet vara mindre än för ett större. När rapporterna dessutom skiljer sig åt i tid måste man även ta hänsyn till kinematiska egenskaper hos olika enheter: skulle enheten ha hunnit förflytta sig den sträckan på den tiden? Man kan också lägga in manövringsaspekter. I kombination med geografiska data blir detta viktigt även i armésammanhang,

För spårning i flyg- och marinsammanhang finns det väl utvecklade metoder (Kalmanfilter, IMM) för klustringsproblemet som drar stor nytta av de studerade objektens kinematiska egenskaper men som samtidigt förutsätter en mer eller mindre kontinuerlig rapportström [Blackman99, Antony95, Waltz90]. Mer generella metoder mer lämpade för en tidsmässigt fragmenterad rapportström finns utvecklade bl a i [Bergsten93] och har tillämpats bl a för ubåtsspårning.

Centralt för både aggregering och klassificering är att det finns adekvata modeller av de olika enhets(objekts)-typerna. En modell för en enhetstyp måste givetvis innehålla information om organisationsbestämmande delenheter. Den måste också innehålla information om vilka typer av delenheter som den normalt består av. Därtill tillkommer kinematiska egenskaper och funktionella samband som påverkar hur de olika delenheter formerar sig både under förflyttning och när de grupperar. Den kunskap som finns om större enheter är alltså av ganska olika art. Ett viktigt problem blir hur sådan kunskap skall representeras och organiseras.

Modellerna för enhetstyperna är exempel på *à priori*- eller *doktrinkunskap*. Valet av representationsmetod beror till stor del på informationens struktur och hur den kan utvinnas. Bayesianska nätverk och Markovmodeller är representationsmetoder som förvisso är flexibla och har stark teoretisk förankring men är ofta svåra att implementera om man måste förlita sig till manuell inmatning av den stora mängd *à priori*- och betingade sannolikheter som vanligen krävs. Även Dempster-Shafermetoder används för att modellera doktrinkunskap. Här är det dock inte nödvändigt att ange *à priori*- och betingade sannolikheter om sådana inte finns tillgängliga, varför kraven på tillgång till modelldata blir lättare att uppfylla.

Det pågår intensiv forskning för att kringgå problemet med manuell inmatning genom att istället utnyttja approximativa metoder (t ex s k *fuzzy OR-gates*) eller automatisk inläring: modellerna "tränas" med representativa data. Eventuellt kan metoder för "data mining", att utvinna regler och generaliseringar från stora mängder data, vara relevanta.

Regelbaserade representationsmetoder är kanske bättre lämpade för manuell inmatning av *a priori* information. Ur robusthetssynpunkt bör system baserade på oskarpa regler (*fuzzy rules, rough sets*) vara av särskilt intresse. Även här pågår forskning om automatisk utvinning av regler från representativa data. Vissa regelbaserade metoder har en lösare teoretisk förankring än de som har en probabilistisk grund, likväl finns det användningsområden, exempelvis vid brist på representativa träningsdata eller om beroendeförhållanden mellan olika faktorer är svåra att överskåda. Det finns också möjligheter att använda kombinationer av probabilistiska och regelbaserade metoder för att på bästa sätt utnyttja de respektive metodernas starka sidor [Gonsalves99].

Några olika typer av enhetsmodeller har studerats i aggregeringslitteraturen. I [Rasmussen98] använde man sig av enkla *förbandsmallar* som i och för sig tar hänsyn till förbandssammansätt-

ning och grupperingsinformation men förefaller alltför rigida för att hantera ofullständig information och situationer där objekten inte är korrekt grupperade enligt känd doktrin.

[Johnson99] använder sig av bayesianska nätverk för att modellera enheter med hänsyn tagen framförallt till vilka delenheter som ingår i enheten. Modelleringen hanterar ofullständig information och osäker identifikation av delenheter, dessutom ges ett passningsmått mellan observationerna och modellen. Funktionella samband mellan enheterna modelleras däremot inte.

[Björnfot00a, Björnfot00b] använder *Hidden Markov Models* (HMM) för att modellera enheter i kolonn. Modellerna tränas med representativa data som inte behöver vara fullständiga. Modelleringen hanterar alltså ofullständig information och ger ett passningsmått mellan observationerna och modellen. Den verkar också kunna fås att hantera osäker identifikation av delenheter. Dessutom hanterar den viss form av funktionella samband mellan delenheter genom att hänsyn tas till grupperingen i kolonnen.

Andra exempel på aggregeringsmetoder som använder information om formationer är [Nifle98, Schwartz00].

Ett intressant metodspår med möjliga tillämpningar på igenkänning av beteenden, som enligt muntliga uppgifter studeras av bl a AFRL och FOFT, är *dynamiska bayesianska nätverk* [Kjaerulff95, Nicholson94], även kallade *dynamiska probabilistiska nätverk* (DPN) [Dean88, Forbes95, Boyen98, Binder00, Russell99, Zweig97, Zweig98, Zweig99]. [Ke00] tillämpar HMM på igenkänning av temporala sekvenser.

### 2.1.3 Korrelering

Korreleringsproblemet generellt innebär att para ihop ("korrelera", "associera") observationer med objekt eller enheter. Det finns alltså både synkrona och diakrona dimensioner i problemet. Olika observationer vid samma tidpunkt kan tillskrivas samma enhet, likaså kan olika observationer vid olika tidpunkter tillskrivas samma enhet. Ambitionen är att spåra olika objekt över tiden.

I praktiken är det stor skillnad mellan att spåra arméobjekt och att spåra luftbaserade objekt som flygplan eller missiler.

I flygsammanhang är ambitionen att hålla mer eller mindre kontinuerlig uppsikt över de olika objekten. Objekten är förhållandevis små och håller hög hastighet men den höga tidsupplösningen gör att man kan få ut en stor mängd information ur objektens kinematiska egenskaper med hjälp av t ex Kalmanfilter [Bar-Shalom88, Grewal93]. Informationsmängden gör det bl a möjligt att korrigera för en viss osäkerhet i positionsbestämningen. Den höga täckningen av området gör det möjligt att efter en tidsperiod avfärda vissa signaler som falska alarm. Mera problematiskt är att spåra tätt grupperade objekt på grund av dels sensorernas begränsade upplösning, dels ambitionen att spåra varje enskilt objekt. Metodiken för att spåra enheter på större aggregationsgrad än enstaka objekt är fortfarande outvecklad [Blackman86, Chang83, Chang84].

Ambitionsnivån för att spåra markobjekt är mer varierad:

1. ge exakt position av enstaka objekt eller enheter, t ex för att vägleda artilleri

2. över en vidare tidsram bilda sig en uppfattning om vilka enheter som befinner sig i området, var de befinner sig och hur de har färdats (för att avgöra vilken riktning de har och ytterst vilken målsättning de har).

Det första problemet liknar spårning av luftburna objekt även om oregelbundenheter i terrängen skapar speciella problem [Reid79]. Det andra problemet har vissa grundläggande metodologiska problem gemensamt med kontinuerlig spårning men då man kan anta att informationsmängden per objekt och tidsenhet är avsevärt mindre så uppstår nya problem.

Markobjektens egenskaper sätter givetvis ramar för hur de kan färdas. Men exempelvis kinematisk information är mindre användbar när man inte har kontinuerlig uppsikt över objekten. Hastigheten kan variera beroende på terräng, objekten kan även stanna och gruppera vilket gör att de aldrig når nästa prognosticerade position. Dessutom får man anta att om man inte har ett heltäckande system av sensorer så kan även större enheter "slinka förbi" utan upptäckt. Det går alltså inte att använda sig av "negativ" information i lika hög grad. Förslagsvis bör man kompensera för detta med ett utökat utnyttjande av taktisk doktrinkunskap och genom återkoppling från hotanalysen. Det kräver representationsformer med hög flexibilitet för att implementera a priori-kunskap som är given i form av regler, något som verkar tala för en probabilistisk metodik (bayesiansk, Dempster-Shafer) eller en fuzzy-metodik snarare än en (exempelvis) klassiskt regelbaserad.

För markburna objekt sätter terrängen gränser för olika färdvägar, något som varierar från fordon till fordon och enhet till enhet. Här spelar även storleken på enheterna en stor roll. Metoder för att utvinna information om framkomlighet och framryckningskorridorer ur kartmaterial finns i viss mån men skulle behöva utvecklas. Metoder för hantering av spatiell osäkerhet i kartdatabaser baserade på rough sets (grova mängder) har studerats av bl a [Worboys99] och [Ahlqvist00].

Brist på information på objektnivå kan i viss mån balanseras genom att sänka ambitionen och spåra på större enheter än enstaka objekt, vilket gör att korrelationsproblemet i viss mån sammanflätas med aggregeringsproblemet. Man måste också ge avkall på precisionen i positionsbestämningen av enheterna då man inte har dem under kontinuerlig uppsikt.

Metodik för kontinuerlig spårning vid hög informationstäthet är relativt välutvecklad och innefattar multisensorsystem [Waltz90, Antony95, Blackman99]. I jämförelse är metodiken för spårning under låg informationstäthet men med vidare tidsramar och lägre ambitionsnivåer nästan helt utvecklad, men se [Alberola99, Bergeron98, Bergsten93]. Trots skillnaderna har de två olika problemområdena många allmänna problem gemensamt vilket gör att det borde finnas en god potential för korsbefrukning.

Principer och metodik för när man skall påbörja nya spår (*track initiation*), när man skall korrelera nya observationer till gamla spår och i sådana fall till vilka spår (*data association*) finns utvecklade för kontinuerlig spårning och borde kunna anpassas till spårning med låg informationstäthet. Av särskilt intresse bör då vara olika implementationer av *multiple hypothesis tracking* (MHT) [Reid79, Cox96, Kurien90, Bar-Shalom95, Blackman99] och metoder för att "poängsätta" spår (*track scoring*) [Sittler64, Blackman86, Avitzour92].

Det är inte möjligt att hålla reda på alla möjliga målspar, speciellt inte när informationsmängden är stor och observationstätheten låg. En lösning, i [Blackman99] betecknad *Global Nearest*

*Neighbor* (GNN), är att varje ny observation associeras med det mest rimliga spåret. Om det inte finns några påbörjade spår eller om passningsvärdet till de existerande spåren är för dåligt påbörjas ett nytt spår. Denna metod är beräkningsmässigt effektiv eftersom tidigare associeringar av observationer till spår aldrig omvärderas. Problemet är att felaktiga associeringar tenderar att ackumulera så att kvalitén på spåren gradvis försämras. Någon metodik som växlar mellan klassificering och reklustring kan kanske användas (se t ex [Schubert00]).

*Multiple Hypothesis Tracking* (MHT) associerar varje ny observation till en *mängd* möjliga spår och inte till ett enda som i GNN. På detta sätt motverkar man att felaktiga associeringar ackumulerar. I gengäld krävs det metoder att begränsa mängden möjliga spår genom exempelvis en grov klustring av observationerna och genom att osannolika spår successivt elimineras. En relativt vanlig typ av implementering av MHT är *Interacting Multiple Models* (IMM) där flera Kalmanfilter används för att utöka den relativt begränsade mängden spår som ett enstaka Kalmanfilter tillåter. En generalisering av denna metod är att kombinera den kinematiska modellen med en icke-förutbestämd, simulerad sannolikhetsfördelning (s k partikelfiltrering) [Gordon00].

Möjligtvis kan metodik som utvecklats för korrelering på högre aggregationsnivå, ett centralt problem för armétillämpningar, tillämpas även på kontinuerlig spårning.

## 2.2 Hotanalys

Hotanalys är ett problemområde snarare än ett problem. Tillämpbarheten och ambitionsnivån varierar starkt mellan olika typer av behov och situationer. Ofta handlar hotanalys om prognoser i någon form och är därför behäftad med en osäkerhet som bör kunna hanteras av systemet och presenteras för operatören. För att på ett flexibelt sätt kunna resonera om framtida händelseutvecklingar krävs det en sammanhållen representation, en modell, av situationen. Situationsanalysen, med korrelering och aggregering, skall således inte bara ge en "bild" av läget som operatören kan tolka utan det måste ske via en representation som systemet själv på ett effektivt sätt kan tolka och manipulera [Fjällström00].

Metoder för att resonera om framtida händelseutvecklingar kan grovt delas in i två kategorier: regelbaserade system och modellbaserade system. Viktiga utgångspunkter för regelbaserade system är [Barwise83, Sandewall94] och det finns en rad tillämpningar som ofta är baserade på *fuzzy-rules* [Blackman99, Bergeron98, Dall99, Johnson99]. Probabilistiska tillståndsförändringsmodeller [Jesse93] är ofta baserade på bayesianska nätverk [Pearl88, Pearl00, Cowell99] eller olika former av Markov-modeller [Ross00].

I hotanalysen identifieras möjliga hot som rangordnas efter hotets art och tidshorisont. Forskningen har till stor del inriktats på tillämpningar inom flyget och marinen där hotanalysen utgår från det egna planets eller fartygets överlevnad. I de enklare fallen värderas hotet från fiendliga styrkor på grundval av avstånd och den hastighet med vilket hotet närmar sig. Här måste man även ta hänsyn till det egna planets/fartygets hastighet [Bergeron98, Dall99].

Doktrindata spelar en viktig roll. Kunskap om vapensystem och räckvidd kan hjälpa till att förfina hotvärderingen, mer komplexa doktrindata om till exempel taktiskt uppträdande kan också modelleras [Blackman99 kap12, Dall99, Waltz90].



I ett större tidsperspektiv utökas hotanalysen från att bara gälla enhetens egna säkerhet till andra mål som är av intresse för fienden. I arméutläggningar är specifikationen av sådana mål en naturlig del av *Intelligence Preparation of the Battlefield (IPB)* - processen [IPB94]. Även här spelar doktrininformation om de fientliga enheterna en viktig roll, men det måste utökas med geografiska data om färdvägar och framkomlighet.

*Timeline Analysis System (TAS)* (även beskrivet i [Jönsson98]) är ett system för hotanalys. Systemet är utvecklat av *GTE Laboratories Inc.* för *US Air Force Research Laboratory*. Här specificerar man med hjälp av ett modelleringsverktyg modeller av händelseförlopp (*Temporal Transition Models*) [Jesse93] som innehåller tillstånd och övergångar mellan tillstånd. Systemet ges en samling händelser som indata, letar reda på de modeller som bäst passar dessa händelser och prognosticerar framtida händelser med hjälp av de i modellen angivna övergångarna mellan tillstånd. Resultatet är en beskrivning av systemets slutsatser, uttryckta med hjälp av grafik och naturligt språk. Systemet har bl a testats på en utläggning som gäller övervakning av en flygbas.

I [Ross00] används *Hidden Markov Models (HMM)* för att representera olika hot. Varje möjligt hot beskrivs genom en serie tillstånd (till exempel platser som måste passeras) för att hotet skall realiseras. Hotet värderas med hjälp av ett beslutsträd. Även samverkan mellan olika fientliga enheter kan modelleras.

## 2.3 Resursallokering

Eftersom osäkerhet i hög grad är en funktion av den tillgängliga informationen är det viktigt att analysera hur spaningsresurser bäst skall allokeras för att så snabbt som möjligt minska osäkerheten. En viktig del av hotanalysen bör vara att med utgångspunkt från sensorernas aktuella placering indikera när en hypotes om ett hot skulle bli bekräftad om hypotesen är sann. Om sensorernas aktuella placering är dålig kan hypotesen komma att bli bekräftad för sent vilket bör föranleda förslag på reallokering av sensorresurserna. Resursallokering är ett problem både för dedicerade multisensorsystem och för system av multisensorsystem, men än en gång skiljer sig problemen i praktiken åt.

I dedicerade sensorsystem handlar resursallokering om direkt sensorstyrning: hur skall sensorerna styras för att på effektivaste sätt följa ett mål eller för att täcka ett område. I grunden är det ett optimeringsproblem där sensorresurser ställs mot informationsbehov. Sensorresurserna är givna, men informationsbehovet kan definieras på olika sätt. Ett tillvägagångssätt är att sträva efter att den allmänna spårningsförmågan upprätthålls utan att prioritera vissa mål [Sarunic95, Billam92, Hatch99]. Ett annat tillvägagångssätt är att gradera olika uppgifter efter prioritet och tilldela resurser efter detta [Weinberg77, Zhang96]. Det senare alternativet borde vara att föredra, men kräver metoder för att gradera uppgifternas prioritet [Schmaedeke98] vilket i sin tur kräver någon form av hotanalys [Molina95, Adrian93].

Multisensorsystem komplicerar saken ytterligare då olika typer av sensorer med olika typer av upplösning kan kombineras för att utföra vissa typer av uppgifter bättre än vad de olika sensorerna skulle kunna utföra individuellt [Schmaedeke98].

På högre nivå handlar sensorstyrning mindre om direkt styrning i realtid (även om detta i förlängningen kan vara aktuellt), än att bäst planera rutter för (kombinationer av) mobila sensorplattformar som t ex *Unmanned Aerial Vehicles* (UAV). De grundläggande problemen förblir dock desamma: sensorresurserna är i någon mån givna, informationsbehovet däremot måste definieras. Här spelar hotanalysen en viktig roll. I enklaste fallet handlar det om att på effektivast möjliga sätt täcka ett antal områden. Eftersom kanske inte alla områden kan täckas måste vissa områden prioriteras utifrån vilka hotbilder som föreligger.

Informationsbehovet förändras:

- Nya uppgifter kan plötsligt bli tillgängliga
- Existerande uppgifter kan plötsligt bli onödiga

De uppgifter som måste utföras för att täcka behovet är i högsta grad tidsberoende:

- Vissa uppgifter är tidskritiska med en strikt deadline (efter deadline har de inget värde)
- Vissa uppgifter har ingen deadline men istället en tidigaste starttid (innan den är det meningslöst att utföra uppgiften)
- Olika uppgifter tar olika lång tid att genomföra, ibland med stor osäkerhet om hur lång tid detta kan vara
- Vissa uppgifter är ”återkalleliga”: har man väl skickat iväg en sensor till en avlägsen plats tar det tid att kalla tillbaka den.

Lägg därtill att de olika uppgifterna har olika prioritet och att resurserna kanske inte räcker till så får man ett svårt resursallokeringsproblem. I praktiken måste man därför på olika sätt approximera en optimal lösning. Litteraturen om planering, resursallokering och optimering i allmänhet är stor och för sensorstyrning finns det en ganska omfattande diskussion i [Blackman99] där oskarpa regler (fuzzy rules) för resursallokering spelar en central roll, se även [Smith99, Kristensen96].

I den teoretiska litteratur som handlar om resonering om informationsbehov kan man urskilja ett informationsteoretiskt och ett ”pragmatiskt” perspektiv. Det informationsteoretiska perspektivet är huvudsakligen att man bör söka den information som mest skulle reducera osäkerheten. Det pragmatiska perspektivet tar hänsyn till de handlingsalternativ som föreligger och utgår ifrån att man bör söka den information som skulle maximera värdet på de olika handlingsalternativen [Pearl88]. Det senare perspektivet är det mer sofistikerade men ställer krav på kunskap om de egna handlingsalternativen som kanske inte finns representerad i systemet.

## 3 Forskargrupper inom Management of Uncertainty

### 3.1 Forskargrupper inom bayesiansk teori

Laboratoriet för kognitiv vetenskap vid institutionen för datavetenskap, Kaliforniens universitet i Los Angeles (UCLA), leds av Judea Pearl som brukar anses vara den främsta forskaren inom bayesiansk teori under 1980- och 90-talen. År 1988 publicerade han vad som kommit att bli ett standardverk inom bayesiansk teori "*Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of plausible inference*" [Pearl88]. Numera forskar han dock om kausala modeller och har inom det området nyligen publicerat boken "*Causality: Models, Reasoning, and Inference*" [Pearl00]. Ett urval av hans viktigaste publikationer är [Goldszmidt96, Pearl88, Pearl93, Pearl94, Pearl97, Pearl99a, Pearl99b, Pearl00].

De kanske mest intressanta forskningsgrupperna idag finns dock på betydligt närmare håll. Vid Aalborgs universitet i Danmark finns två mycket framgångsrika forskningsgrupper. Vid det statistiska laboratoriet på matematiska institutionen är man inriktad på grafiska modeller och probabilistiska expertsystem (Steffen Lauritzen) och vid enheten för beslutstödssystem på institutionen för datavetenskap forskar man kring beräkningsalgoritmer, teori och metoder för datorbaserat stöd och beslutsfattande under osäkerhet (Finn Jensen). Dessa problem karakteriseras av att slutsatsdragning måste göras på basis av otillräcklig och osäker information, och vanlig är även konsekvenserna av beslut också osäkra. Gruppen utvecklar här teorier och metoder för modellering och inferens i normativa system samt utvecklar teori och metoder för system anpassade till specifika användare och kontexter.

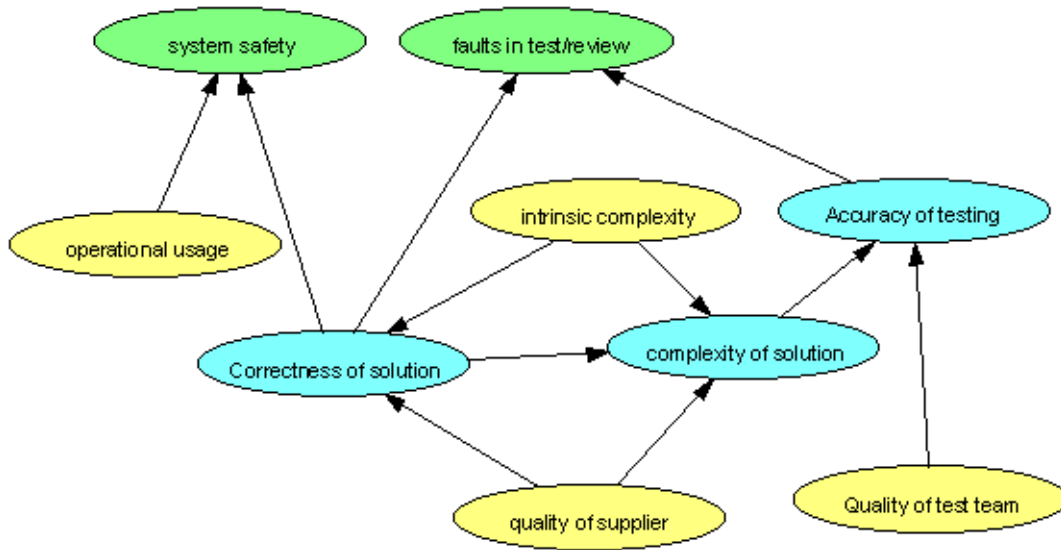
Normativa system karakteriseras av:

- grafisk representation av kausala relationer mellan storheter,
- användandet av sannolikheter för representation av kausala relationers styrka,
- användande av nyttomått för representation av behov och preferenser,
- användandet av maximerad nytta vid beslutsfattande.

De mest använda typerna av normativa system är bayesianska nätverk och influensdiagram. Resultaten har testats genom utvecklandet av system för t.ex. medicinsk diagnostik, felsökning av datorsystem och jordbruksplanering.

Forskningsgruppen för beslutstödssystem bildades år 1991, men forskning kring bayesianska nätverk har pågått vid institutionen sedan 1985 då man deltog i ett ESPRIT projekt för att konstruera en "Expert EMG Assistant." Gruppen inledde samarbete med Steffen Lauritzen and David Spiegelhalter (från Cambridge University), vilka tillsammans arbetade på samma problem. En artikel av Lauritzen och Spiegelhalter [Lauritzen88] visade på en lösning för stora bayesianska nätverk vilken gruppen sedan arbetat med att förfina och utöka till att omfatta också bayesianska nätverk med noder för slutsatsdragning, s.k. beslutsnätverk eller influensdiagram. Jensen, Lauritzen and Olesen [Jensen90] presenterade en förfinad inferensalgoritm vilken blev grunden till expertsystemskalet Hugin. Hugin blev senare en kommersiell produkt marknadsförd av avknoppningsföretaget Hugin Expert A/S, numera världsledande inom området system för bayesianska nätverk (se <http://hugin.com>).

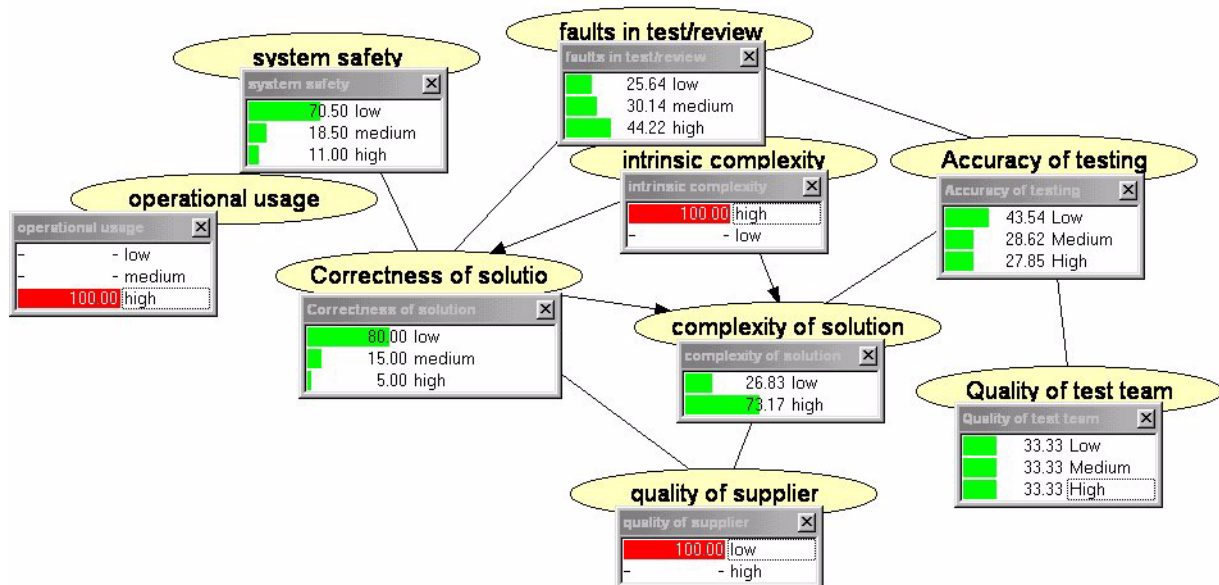
Ett exempel är på användningen av HUGIN är ESPRIT Projekt SERENE (SafEty and Risk Evaluation using bayesian NETs). Följande bayesianska nätverk är hämtat därifrån:



För att kunna använda detta bayesianska nätverk behöver vi inte enbart den kausala kunskap som motsvaras av nätverket ovan, utan vi behöver också apriorisannolikheter för alla variabler och en tabell som beskriver alla betingade sannolikheter som motsvarar pilarna ovan. Detta ställer krav för att kunna använda bayesianska nätverk som inte alltid är uppfyllda i ett faktiskt problem. En tabell över betingade sannolikheter kan se ut som:

Accuracy of testing	Low			Medium			High		
	Low	Medium	High	Low	Medium	High	Low	Medium	High
Correctness of solution									
Low	.33	.33	.3	.2	.33	.5	.1	.25	.7
Medium	.33	.33	.3	.3	.33	.3	.2	.5	.2
High	.33	.33	.4	.5	.33	.2	.7	.25	.1

Givet dessa (och apriorisannolikheter för alla variabler) kan systemet nu uppdatera alla variabelers sannolikheter om vi skulle erhålla någon ny information. När vi får veta att “quality of supplier” är “low” och problemområdets “intrinsic complexity” är “high,” samt att “operational usage” är “high” så matar vi dessa uppgifter i nätverkets motsvarande variabelnoder som säkra fakta, 100% säkert (röda staplar i fig nedan). Därefter propageras deras effekter genom det bayesianska nätverket och uppdaterar alla andra sannolikheter (gröna staplar i fig nedan):



Detta ger oss en uppdaterad översikt över problemets alla variabler som kan utgöra grunden för ett beslutsfattande.

Ett urval av de två gruppernas gemensamma publikationer är [Andersen89, Andreassen89, Cowell99, Jensen90, Jensen94, Jensen96, Jensen99, Jørgensen00, Lauritzen88, Lauritzen92, Lauritzen96, Lauritzen00, Madsen98, Nielsen99, Spiegelhalter93].

En fjärde forskningsgrupp av stor betydelse är gruppen för Maskininläring och tillämpad statistik vid *Microsoft Research* ledd av David Heckerman. Gruppen har framförallt inriktat sig på att skapa metoder för att automatiskt lära bayesianska nätverk från data. Metodiken är viktig då det är den enda realistiska metod att skapa stora bayesianska nätverk inom områden som är mycket datarika, men där domänkunskapen är dålig. Några publikationer är [Chickering97a, Chickering97b, Chickering99].

En femte forskningsgrupp leds av Stuart Russell vid den datavetenskapliga institutionen vid Kaliforniens universitet i Berkeley. Russells grupp forskar bl a kring arkitekturer för intelligenta agenter och beslutsfattande under osäkerhet och i realtid. Gruppen använder bl a "*dynamic probabilistic networks*" för representation och resonande [Binder00, Zweig97, Zweig98, Zweig99, Doucet00, Russell99], samt "*hierarchical abstract machines*" för *reinforcement learning* och generering av beteenden. Några tillämpningar man studerat är autonoma fordon (BATmobile-projektet) och följning av fordon i vägtrafik med fast monterade optiska sensorer [Forbes95, Pasula99].

I övrigt finns fler betydelsefulla grupper vid institutionen för systemvetenskap vid George Mason University, SRI International, institutionerna för datavetenskap vid Stanford University och Kaliforniens universitet i Irvine, universitetet i British Columbia, Kanada, och vid de datavetenskap-

liga institutionerna på TECHNION - Israels tekniska institut - och det hebreiska universitetet i Jerusalem, samt vid det amerikanska forsknings- och konsultföretaget Information Extraction & Transport, Inc.

Oavsett om man bygger bayesianska nätverk för hand eller om man skapar nätverken maskinellt genom inlärning av data så kan man säga att bayesianska metoder kräver stora mängder domänkunskap eller rådata. Ska man bygga nätverken "för hand" krävs ofta kunskap om hundratals variablers apriorisannolikheter och tiotusentals betingade sannolikheter mellan dessa variabler. Det är sannolikt anledningen till varför bayesianska nätverk fokuserar på medicinska problem och liknande, medan man inte sett sådana tillämpningar inom militära områden. Bayesiansk metodik används naturligtvis inom *target detection* och *target tracking*, men då är det inte frågan om att propagera sannolikhet i några nätverk. Man ska dock inte utesluta framtida militära tillämpningar på högre nivå. Sådana kan t.ex. utgöras av *data mining* inom avgränsade militära delområden där mycket rådata existerar. Resultaten från data mining-processen kan sedan fusioneras med annan aktuell information.

### 3.2 Forskningsgrupper inom Dempster-Shaferteori

Vid institutet för interdisciplinär forskning och utveckling inom artificiell intelligens (IRIDIA), Université Libre de Bruxelles, Belgien, bedriver man både teoretisk och tillämpad forskning inom området *soft computing*. Arbetet vid institutet karakteriseras av en tät koppling mellan grundläggande forskning kring inexact och osäker information och utvecklande av *soft computing*-tekniker tillämpat på industriella problem. Institutet har två kompetensområden: heuristiska metoder inspirerade av naturen, samt Dempster-Shaferteori (DST) för processtyrning och klassificering. Gruppen har varit världens ledande forskningsgrupp inom Dempster-Shaferteori och är fortfarande aktiv, men gruppens tidigare ledare, Philippe Smets, är numera pensionerad.

För representation av kvantitativ tilltro har gruppen utvecklat "transferable belief model" (TBM), en modell baserad på Dempster-Shaferteorin, och studerar dess relation till sannolikhetsteori, possibilitetsteori och oskarp logik. TBM-modellen är en av tre moderna varianter av Dempster-Shaferteorin. Den har tillämpats på diagnostiska problem, beslutsfattande under osäkerhet, aggregering av partiellt tillförlitlig information, approximativt resonerande etc.

Modellen utgör en flexibel och kraftfull representation av kvalitativ tilltro. Den behandlar samma problemomän som sannolikhetsteori, men är inte tänkt att ersätta sannolikhetsteorin vilken givetvis är lämplig när en underliggande slumpmässig fysikalisk process kan finnas. TBM-modellen är relevant i de situationer när icke-slumpmässig osäkerhet finns, t.ex. när data inhämtas från partiellt trovärdiga källor. TBM-modellen har utvecklats för de problem när det faktiska tillståndet inte är exakt känt, utan det endast är känt att det tillhör någon delmängd av alla möjliga tillstånd. Detta gör TBM mer generell och flexibel än sannolikhetsbaserade modeller (bayesiansk teori) och möjliggör att man representerar tillstånd i kunskap och utsagor som inte är möjligt i sannolikhetsbaserade modeller. Den *totala* tilltron i TBM-modellen till unionen av två disjunkta händelser kan vara större eller lika med summan av den *tilldelade* individuella tilltron till var och en av händelserna. Detta eftersom det kan finnas tilldelad tilltro direkt till unionen, något som inte är möjligt inom sannolikhetsbaserade modeller, t.ex. bayesiansk teori.

TBM har tillämpats inom områdena:

- fusion av data genererade av partiellt trovärdiga sensorer,
- fusion av experters utsagor,
- klassificering, diskriminant (särskiljande) analys (övervakad dataanalys/inläring),
- klusteranalys (icke övervakad dataanalys/inläring),
- diagnos,
- databaser med osäker data, disjunktiv information,
- datorseende,
- kartgenerering,
- approximativt resonerande.

I jämförelse med probabilistiskt baserade modeller medför TBM följande fördelar:

- varje tillstånd av partiell eller total okunskap kan representeras,
- systemet arbetar med den information som faktiskt finns tillgänglig, och kräver inte skapande av sannolikheter som egentligen inte är tillgängliga för användaren. Använda värden är de som rent faktiskt är tillgängliga för användaren,
- det finns inget krav på tillgänglighet av apriorisannolikheter i en diagnostisk process, utan à priori-kunskap kan representera vilken som helst kunskap fram till total okunnighet,
- systemet kan utföra diagnostik där hänsyn tas till “odefinierade” kategorier som klassen av ännu okända sjukdomar eller existensen av några “ouppräknade” tillstånd,
- vid diskriminantanalys kan systemet i träningsmängden använda data för vilken den egentliga kategorin är inexakt känd,
- i databaser kan systemet hantera, inte bara luckor i datamängden utan också inexakta värden,
- i approximativt resonerande kan systemet hantera allmängiltig kunskap och viktiga default kunskap,
- den är nära relaterad till predikatlogik, vilket gör deduktioner erhållna från TBM mycket enklare att förstå än de härledda från tekniker baserade på probabilistiskt resonerande.

Dessa egenskaper gör TBM flexibel när man vill representera tilltro: varje form av kunskap, från precis och säker kunskap fram till total okunskap kan representeras.

Att TBM-metodiken är intressant i informationsfusion visar följande sammanfattning av ett föredrag med titeln “*Applying the TBM (transferable belief model) to detection problems*” som hölls den 7 januari 2000 vid IRIDIA av Philippe Smets:

*“Imagine a set of sensors (radar) that collect data on some objects, like submarines in a sea. If sensors disagree among themselves (like one sensor states ‘I see something here’, and another states ‘I see something there’), it probably means that there are more than one submarine. A study of the conflict encountered when sensors are partially reliable is presented. It permits to determine the number of submarines observed by the sensors, and their respective localization. Using the same detection problem, we also show that defuzzifying beliefs (i.e., making decisions at intermediate levels) before combining them may be deleterious: defuzzification must be performed at the last step of the reasoning process (just like rounding numbers should be performed as late as possible).”*

Smets var också inbjuden talare med föredraget “*Data Fusion in the transferable belief model*” vid *3rd International Conference on Information Fusion* (FUSION 2000) i Paris 10-13 juli 2000.

Ett antal system har utvecklats för propagering av tilltro i nätverk (*evidential networks*) vilka bygger på en metodik kallad *valuation-based systems* (VBS) utvecklad av Shenoy and Shafer. I VBS representeras kunskap av ett nätverk av noder och länkar mellan dessa noder. För att uppnå effektiva beräkningar har VBS kompletterats med metoder för snabba lokala beräkningar i nätverket vilka tillsammans utgör systemet *TresBel*, som därigenom implementerar TBM på ett effektivt sätt i VBS. *TresBel* har därefter generaliserats i systemet *Pulcinella*, vilken kan hantera och propagera såväl tilltro (*Dempster-Shafer theory*) som möjlighet (*possibility theory*) och sannolikhet (*bayesian theory*).

Informationsfusionsgruppen vid FOAs institution för Data- och informationsfusion hade 1995 en gemensam ESPRIT-ansökan med IRIDIA, Université Libre de Bruxelles och flera andra grupper, Projekt SAGURE (Sensor Data Aggregation in Uncertainty Riddled Environments).

Ett urval av referenser är [Saffiotti91a, Saffiotti91b, Smets88, Smets90, Smets93, Smets94, Smets95, Smets99, Xu93, Xu94, Xu96]. Alessandro Saffiotti, som var en av skaparna av *Pulcinella*, är numera vid Örebro universitet där han leder det mobila robotiklaboratoriet vid gruppen för tillämpade autonoma sensorsystem.

Vid institutionen för informationsbehandlingsteknik vid tekniska universitetet i Compiègne (Thierry Denœux) finns en forskningsgrupp som fokuserar på statistisk mönsterigenkänning samt modellering av osäkerhet och datafusion. Speciellt intressanta för informationsfusionsgruppen vid FOA är de metoder Denœux utvecklat för klassificering med trovärdighetsfunktioner då de behandlar ett snarlikt problem till de klustrings- och klassificeringsalgoritmer som Johan Schubert har utvecklat för att hantera inkonsekventa underrättelserapporter.

Medan Denœuxs metoder antar att det redan är känt vilka olika objekt/händelser som är aktuella, och därefter fördelar ny inkommande underrättelserapporter till de olika objekten/händelseutvecklingar genom en jämförelse, görs inget sådant antagande i de metoder som utvecklats vid FOA. Här växer betydelsen av olika händelseutvecklingar fram successivt allteftersom nya underrättelserapporter inkommer. Betydelsen av en händelseutveckling avgörs av de rapporter som klustrats tillsammans. Ingen metod kan sägas vara generellt bättre än den andra, vilken som är bäst i ett konkret exempel avgörs av vilken information som redan är tillgänglig. Denœuxs metod kräver mer tillgänglig bakgrundsinformation och är därför inte alltid tillämplig, men är också mer effektiv om sådan information finns då den kan implementeras som ett neuronät av feed-forward typ vilka är snabba (millisekunder), medan metoden som utvecklas vid FOA implementeras som ett neuronät av Hopfieldtyp/Potts spin, vilken måste iterera till konvergens uppnås (sekunder). Detta är skillnaden mellan klassificering och klustring, eller om man så vill mellan supervised (Denœux) och unsupervised learning (FOA). Rimligen bör det gå att kombinera metoderna på så sätt att FOA metoden används initialt för att klustra inkommande underrättelserapporter och bygga upp bakgrundkunskap, varefter man när bakgrundkunskapen anses tillräcklig (t.ex. stabil vid ytterligare inkommande rapporter) kan övergå till snabbare klassificering med Denœuxs metod.



Denœuxs arbete med klassificeringsalgoritmer [Denœux95a] beskrivs av Smets [Smets99] som ett av de fyra delområden inom Dempster-Shaferteorin som idag utgör dess *state-of-the-art*. Ett antal av gruppen mest intressanta publikationer är [Denœux95a, Denœux95b, Denœux96, Denœux97, Denœux99, Denœux00a, Denœux00b, Petit-Renaud98a, Petit-Renaud98b, Zouhal95a, Zouhal95b, Zouhal97, Zouhal98].

Övriga områden som enligt [Smets99] utgör *state-of-the-art* inom Dempster-Shaferteorin är en metod av J. Picard för informationssökning baserad på analys av kedjor av citeringar [Picard98], en metod av F. Janez för fusion av sensorinformation när sensorer är tränade på olika begränsningsramar [Janez96, Janez98], samt en metod av J. Schubert som analyserar konflikten vid fusion av information från flera sensorer rörande flera olika händelser och finner antalet händelser när detta är okänt, samt klustrar alla sensorinformation på så sätt att konflikten minimeras [Schubert95, Schubert99].

I övrigt finns betydelsefulla forskningsgrupper vid universitetet i Fribourg, Schweiz (J. Kohlas); vid Shafers gamla forskningsgrupp vid universitetet i Kansas, USA (P. Shenoy); Tjeckiens vetenskapsakademi (P. Hayek); vid handelshögskolan i Kartago, Tunisien (K. Mellouli); vid institutionen för AI vid universitetet i Granada, Spanien (S. Moral); vid Machine Intelligence Institute, Iona College, New York, USA (R. Yager, dock verksam främst inom *fuzzy logic*); vid School of Information & Software Engineering, Universitetet i Ulster, Nordirland (D. Guan & J. Bell); vid forskningsinstitutet för informationsteori i Toulouse (IRIT), Université Paul Sabatier (D. Dubois & H. Prade, verksamma främst inom possibility theory); institutionen för elektronik vid Middle Eastern University i Ankara, Turkiet (I. Erkmen); vid institutet för datavetenskap vid Polska Vetenskapsakademin i Warszawa (M. Klopotek); vid gruppen för kunskapsbaserade system, New South Wales University i Sydney, Australien (A. Ramer); vid AI Center inom SRI International i Menlo Park, USA (J. Lowrance); vid laboratoriet för informationsbehandling och beslutsteori vid universitetet P. et M. Curie i Paris (B. Bouchon-Meunier, dock främst verksam inom fuzzy logic) samt vid sektionen för medicinsk informatik inom institutionen för medicin vid Stanford University (E. Shortliffe), där man 1976 utvecklade det berömda AI-systemet MYCIN och metodiken *certainty factors* (ett alternativ till bayesiansk teori), men senare övergick till Dempster-Shafer. Denna grupp var först (i mitten av 80-talet) med att utveckla snabba algoritmer för propagering av tilltro i evidensnätverk vilket ledde till det stora lyftet för Dempster-Shaferteorin då man nu kunde skaka av sig den tidigare kritiken mot att DST skulle vara alltför beräkningskrävande. Vidare bidrog arbeten av Shafer och Shenoy (Kansas Univ) om propagering i nätverk, samt Smets och Kennes (Univ. Libre, Bryssel) om vissa generella metoder, till ett genombrott för DST under åren 1985-87.

Utöver ovan nämnda grupper finns några tiotal forskare som gett teoretiskt värdefulla bidrag till DST utveckling utspridda på olika universitet främst i Europa, men även i USA, samt hundratals grupper som bedriver tillämpad forskning inom en stor mängd områden både i Europa, Asien och inte minst USA.

Utöver militära tillämpningar har vi i de viktigaste tidskrifterna under 1999 kunnat läsa om tillämpningar som utnyttjar DST inom *övervakning* (signaldetektering, analys av felkällor inom systemövervakning, tillståndsanalys inom elkraftförsörjning, patientuppföljning inom medicin), *analys* (riskanalys i distribuerade databaser, hantering av osäkra fakta vid ekonomisk revision,

medicinsk diagnos, visualisering inom medicin), *analys av bilder* (bildbehandling, mönsterigenkänning, igenkänning av ansikten, stereografiskt robotseende), *planering och konstruktion* (system för projektbemanning, CAD), *multikriteriebeslutsfattande* samt *dokumentsökning*.

### 3.3 Forskargrupper inom possibilistisk teori

Vid institutionen för artificiell intelligens och kognitiva system vid forskningsinstitutet för informationsteori i Toulouse (IRIT), Université Paul Sabatier, i Frankrike finns en forskningsgrupp kallad "*Plausibelt resonerande, beslutsteori och bevismetoder*" som leds av de välkända forskarna Didier Dubois och Henri Prade. Gruppen är sedan många år intresserad av matematiska och logiska metoder för representation av osäker information (t.ex. possibility theory, Dempster-Shafer theory, sannolikhetsteori och icke-klassisk logik).

Ett nyligen avslutat arbete gjorde en jämförande studie av dessa formella ramverk och deras kapacitet att representera situationer med partiell osäkerhet (icke-komplett information). Studien utfördes i samarbete med Philippe Smets inom ramen för det EU-stödda projektet ESPRIT BRA DRUMS-II. Projektet visade också att metodiker som flervärdeslogik (*multi-valued logic*) saknar möjlighet att representera osäker information på ett adekvat sätt. Projektet lyckades ta fram en operator för possibilitetsteorin motsvarande betingning inom sannolikhetsteorin. En rent kvalitativ version av possibilitetsteorin fann tillämpning inom defaultresonerande och *belief revision*.

Forskningsgruppen har industriellt samarbete med Matra Marconi Space i projektet *Distribuerat beslutsfattande och hantering av tid och resurser* (projekt DIDOM), med Cap Gemini (projekt BERENICE), med Thomson-CSF, samt med Montpellier CEMAGREF. De har akademiska samarbetsgrupper eller gemensamma projekt med tekniska institutet från Mons rörande optimering och schemaläggning, med LADSEB-CNR från universitetet i Padova, Italien, rörande representerande av spatiell och osäker information i avancerade informationssystem, med institutet för datavetenskap vid den tjeckiska vetenskapsakademien i Prag rörande logiska metoder för resonering med osäker information, och tidigare med det nu avslutade europeiska projektet ESPRIT DRUMS-II (Defeasible Reasoning and Uncertainty Management Systems).

Gruppen har under flera år varit intresserade av fusion av osäker information från flera olika källor och är medlemmar i ERUDIT (*European Network for Fuzzy Logic and Uncertainty Modelling in Information Technology*), i arbetsgruppen FALCON (*Fuzzy Algorithms for Control*) och den europeiska arbetsgruppen FUSION (*Fusion of Uncertain Data from Sensors, Information Systems and Expert Opinion*). FUSION har speciellt intresserat sig för fusion av kunskapsbaser med possibilistisk logik. Arbetet med fusion av osäker information har tillämpats inom signalbehandlingsområdet och resulterat i ett flertal avhandlingar vid universiteten i Compiègne, Lille och Evry.

Ett begränsat urval av publikationer är [Dubois94, Dubois95, Dubois96, Dubois97, Dubois98].

### 3.4 En jämförelse mellan de olika metodikerna

Medan tillämpningar inom bayesiansk teori tenderar att komma från områden med mycket god à priorikunskap, ofta från den medicinska domänen, är tillämpningarna inom Dempster-Shaferteori ofta militära. I proceedings från de tre stora datafusionskonferenserna *Int. Conf. on Information Fusion* (FUSION), *EuroFusion Int. Conf. on Data Fusion* (EuroFusion), och *Information, Deci-*

*sion and Control Conf.* (IDC) slås man av det stora antalet bidrag som använder Dempster-Shafer-teorin för att representera och fusionera osäker information på de högre datafusionsnivåerna.

Vid konferensen FUSION 2000 finns 18 bidrag som använder sig av bayesiansk metodik, 4 som använder sig av possibilistisk, 12 som använder Dempster-Shafer och 20 som använder fuzzy logic. Majoriteten av de bayesianska bidragen ligger i sessioner om *target tracking* resp. *detection* (datafusionsnivå 1). Endast 5 av 18 bidrag med bayesiansk metodik rör de högre datafusionsnivåerna (datafusionsnivå 2-4), medan 11 av 12 bidrag Dempster-Shafers metodik rör de övre nivåerna. De possibilistiska bidragen tenderar att behandla *image fusion*, vilket också gäller några av fuzzy logic-bidragen, övriga fuzzy logic-bidrag är utspridda över flera områden (t.ex. *resource management*, eller civila tillämpningar) men endast 2 av fuzzy logic-bidragen rör *target tracking* eller *detection*. Vill man generalisera kan man säga att i huvudsak rör bayesiansk metodik nivå 1, Dempster-Shafer nivå 2-3 och fuzzy logic nivå 4.

En sökning i databaser visar följande utveckling för de fyra metodikerna:

**Table 1:**

	Bayesian networks	Dempster-Shafer theory	Possibility theory	Fuzzy logic
1995 - 1999	4609	1195	1906	57441
1990 - 1994	1972	980	1255	31876
1985 - 1989	213	313	297	9564
1980 - 1984	49	27	116	4349
1975 - 1979	39	1	32	1581
1970 - 1974	29	0	2	242

För att få en uppfattning om spridningen av de olika teorierna kan det vara intressant att se hur många publikationer som publicerats på andra språk än engelska. För bayesianska nätverk är 4,7% publicerade på annat språk än engelska, för Dempster-Shaferteorin 10,7%, possibilitetsteorin 14,4%, och för fuzzylogiken 17,6%. Bakom siffrorna döljer sig ett antal trender:

I USA tenderar man att vara så traditionalistisk att man inte ens tar hand om de egna metoderna. Dempster-Shaferteorin, fuzzylogiken och possibilitetsteorin är alla utvecklade i USA, medan bayesiansk teori naturligtvis ursprungligen uppstod i Europa även om bayesianska nätverk också är utvecklade i USA. Denna traditionalism har lett till en splittring inom *management of uncertainty*-området så att den amerikanska konferensen *UAI* som ursprungligen var en allmän konferens nu utvecklats till en ren konferens för bayesianska nätverk, medan den europeiska motsvarande konferensen *IPMU* utvecklats till en konferens som behandlar alla teorier utom bayesianska nätverk. Enskilda konferensbidrag finns naturligtvis som bryter trenden men de bästa bidragen tenderar alltid att hamna på "rätt" konferens. Beträffande Dempster-Shafermetodik är Europa dominerande inom teoretisk utveckling, men det finns en hel del praktiska bidrag från

USA (ofta från mindre universitet). Fuzzylogiken är stark både inom Europa och i Japan och japanerna har gjort tillämpningar av fuzzylogik till en miljarddollarindustri! Possibilitetsteorin domineras av Europa.

## 4 Internationella program

### 4.1 NATO Data Fusion Demonstrator (DFD)

DFD är en demonstrator som sex NATO-länder (Storbritannien, Tyskland, Canada, Nederländerna, Danmark, Italien) utvecklat och relativt nyligen demonstrerat [Rasmussen98]. Här simuleras förloppet av ett scenario, som hittills varit av kallakrigstyp, men scenarier kan definieras tämligen fritt. Scenariet genererar ett flöde av underrättelserapporter, dvs sensorerna abstraheras som rapportgeneratorer med utinformation strukturerad enligt NATO-standarden AdatP3. Olika fusionsmetoder/algorithmerna får verka på detta underlag tillsammans med annan aprioriinformation, bl a omgivnings- och doktrininformation, och ger en lägesbild som av simulatören kan jämföras med "facit".

I [Rasmussen98] beskrivs DFD-systemet översiktligt, och resultaten av två olika utvärderingar diskuteras. Den första utvärderingen, *Manual Fusion Exercise* (MFE), var en ren underrättelseövning med deltagande av underrättelseofficerare från alla i projektet deltagande nationer. Övningen gav värdefull information till projektet om hur underrättelseofficerare arbetar, och den utvärderade också det scenario som användes för att testa DFD-systemet. Den andra utvärderingen, *Automated Fusion Evaluation* (AFE), syftade till att värdera den operationella potentialen hos automatiserad datafusion. Slutsatsen var att DFD framgångsrikt har visat att det finns rika möjligheter att öka automatiseringsgraden i den taktiska underrättelseprocessen och därigenom stödja och avlasta underrättelseofficeraren. Samtidigt har man pekat ut en rad områden där fortsatt forskning och utveckling krävs för att skapa ett operativt användbart system.

DFD-systemet består tre huvudmoduler, *Event Simulator System* (ESS), *Test Monitor System* (TMS) samt *Data Fusion System* (DFS). Indata till systemet är dels en rörelsebeskrivning, dvs varje enhets rörelse som funktion av tiden, dels en underrättelseplan som bl a anger vilka sensorer som skall användas, var och när. I ESS skapas med utgångspunkt i dessa informationer dels den sanna fiendebilden *Simulated Ground Truth* (SGT), dels ett stort antal sensorrapporter i NATOs standardformat *AdatP3*. Via TMS sänds dessa rapporter, eller en delmängd av dem, till DFS, som bearbetar och tolkar dem samt sänder den resulterande tolkade fiendebilden tillbaka till TMS, där den kan jämföras med SGT.

### 4.2 NATO Task Group on Information Fusion

Sedan 2000-01-01 pågår inom NATO Research and Technology Organization/Information Systems Technology ett studieprojekt som kan sägas vara en uppföljning av DFD, men med mer begränsade samarbetsambitioner. Deltagande länder är desamma som för DFD, förutom att Italien ersatts av USA. Under tre år skall de deltagande ländernas forskningsorganisationer gemensamt studera följande uppgift: förbättra förmågan till informationsfusion (fusionsnivå 2 och 3) inom en *All Source Cell* (ASC) tillhörande ett "combined/joint headquarter", dvs en stab för en insatsstyrka bestående av flera allierade nationer och med deltagande av flera vapenslag. Insatsstyrkan förutsätts ha bildats för att utföra fredsbevarande/fredsframtvängande operationer i ett fördefinierat scenario (Banja Luka, Bosnien år 2005).

Man har börjat med att utveckla en konceptuell modell av arbetsuppgifterna i en ASC samt en operativ miljö inklusive en sociopolitisk och en fysisk situation. Man avser att fortsätta med att

utveckla och utvärdera en funktionsmodell för en ASC samt identifiera funktioner som skulle kunna automatiseras.

### 4.3 EUCLID Advanced Workstation for Command and Control Systems

*EUropean Cooperation for the Long term In Defence* (EUCLID) är ett europeiskt försvarsforskningsprogram inom *Western European Armaments Group* (WEAG). Det EUCLID-projekt som är särskilt relevant för informationsfusion i underrättelsetillämpningar är projektet RTP 6.1, *Advanced Workstation for Command and Control Systems* [RTP99]. Projektets uppgift var att driva på utnyttjandet av artificiell intelligens och avancerade programvarutekniker i framtida system för *Command, Control, Communication, and Intelligence* (C3I). Det slutfördes 1998 och leddes av Logica UK Ltd. Övriga medlemmar i projektkonsortiet, som kallade sig *Grouping for Research into Advanced C3I for Europe* (GRACE), var 17 företag och institut från Danmark, Frankrike, Italien, Nederländerna, Norge och Spanien.

Projektet är indelat i arbetspaket, av vilka de viktigaste är:

Metoder och verktyg: Automatisk rapportanalys, analyserar inkommande rapporter och skapar en *Wide Area Picture* (WAP) som indata till beslutsstödsprocessen Planering och Uppgiftsdefinition (*Planning and Tasking*); marint beslutsstöd, som utvecklar stöd för planering, anfallskoordinering och taktisk hotanalys för ytstrid; Beslutsstöd för armétillämpningar, som utvecklar stöd för terränganalys, Course of Action-konstruktion, manöverplanering och eldunderstödsplanering.

Arkitektur: *C3I Application Building Environment* (CABLE) är en plattform som stöder utveckling av C3I-tillämpningar som multipla, interagerande agenter; *HCI Framework* utvecklar ett generiskt stöd för användargränssnitt med bl a kartpresentation som kan styras av de individuella C3I-applikationerna.

Simulering och test: separata mark- och sjöstridssimulatorer levererar en rapportström som indata till GRACE-demonstratorn; *Test Harness* levererar funktioner för att logga och analysera prestanda, och för att jämföra resultat med facit från simulatorn.

#### *Automatisk rapportanalys*

Syftet med funktionen automatisk rapportanalys (ARA) är tvåfaldigt: att minska mängden data som behöver beaktas av ledningsgruppen och att se till att viktig information får prioritet. ARA läser simulerade rapporter från mark- eller sjöstridssimuleringen. Den använder *parsing*-tekniker för att extrahera informationsinnehållet från strukturerade meddelanden och använder detta som grund för att skapa en WAP. Senare kommer metodiken att kompletteras med nyckelordsanalys och rapportprioritering baserat på innehåll.

Slutsatsdragning med hjälp av fuzzy logic och fuzzy clustering har demonstrerats i marinscenariot och har kunnat identifiera viktiga fartygsgrupperingar och -beteenden, t ex huvudstyrka av "task force", ytattackgrupper, medellinje för framryckning och skärningsbeteende.

#### *Marint beslutsstöd*

Arbetet med marint beslutsstöd har tre huvudområden:

- taktisk hotvärdering

- tidskritisk planering mot ytattack
- planering av koordinerat anfall

Taktisk hotvärdering söker känna igen vilken plan fienden följer. Modeller av möjliga fientliga planer har konstruerats och de levererar uppgifter om vilken information som är att förvänta medan planen fullföljs. Rapporter om fienden används för att uppskatta sannolikheten för att han följer en viss plan samt i vilket stadium av planen han befinner sig. Planigenkänning har demonstrerats i fallet att en landstigningsstyrkas chef observerar en försvarande styrka. Nästa steg är att använda denna information för att förutsäga fiendens nästa observerbara åtgärd.

För att stödja planering av åtgärder mot ytattack har s k *constraint-baserade* metoder utvecklats för att planera optimala fartygsmanövrer. Tidskritiska *agentbaserade* metoder har utvecklats för att beräkna siktområden, för att finna kortaste användbara vägen mellan två punkter och för att beräkna vart ett fientligt fartyg kan ha nått vid en given tidpunkt i framtiden. Nyckelidén här har varit att utveckla tekniker som kan ge mer noggranna resultat, ju längre de tillåts exekvera, för att möjliggöra optimalt utnyttjande av tillgängliga beräkningsresurser i varje situation.

Planeringen av koordinerat anfall sker utifrån perspektivet hos chefen för en försvarande patrullbåtsdivision. Stöd ges för att generera en koordinerad anfallsplan som tilldelar egna fartyg och robotar till de olika målen i en fientlig angreppsstyrka. Genom att använda en kombination av resonemang under osäkerhet och constraint-baserade metoder kan planer genereras som tar fler faktorer i beaktande än som kan hanteras manuellt.

#### *Beslutsstöd för armétillämpningar*

Följande tre armétillämpningar för beslutsstödsmetodik har demonstrerats:

- beräkning av framkomlighetskorridorer
- *Course of Action* (CoA) - jämförelser
- planering av manövrering och eldunderstöd

Digitala terrängdata lagras i en objekt-relationell databas och kan presenteras med utbytbara överläggsbilder. Överläggsbilderna används för att visa områden med olika framkomlighet (tre klasser). Ur denna information beräknas korridorer av bestämd bredd, tillräcklig för passage med fordon av en viss typ. Metoden som används bygger på beräkning av s k *generaliserade Voronoidiagram*. Korridorerna ger sedan möjliga framryckningsvägar och noder mellan sådana, vilket ger en utgångspunkt för konstruktion av CoA. Det sistnämnda betraktas som en kooperativ process, och stöd för sådant grupparbete planeras i kommande versioner.

Stöd finns för att jämföra egna och fientliga CoAs med hjälp av vapeneffektindex och vägda förbandsvärden. Dessa metoder kombinerar subjektiva värderingar av relativ vapeneffekt med sannolikhetsanalys av utfallen.

Konstruktion av en detaljerad manöverplan görs med stöd av constraint-programmering i kombination med *heuristisk sökning* i realtid. Med denna metod kan komplexa temporala, spatiella och taktiska villkor och kriterier beaktas vid planeringen.

Arbetet med eldunderstödsplanering har hittills fokuserats på optimal allokering av attackflygplan för *Close Air Support* från baser till mål. Optimeringsmetoden som använts är en variant av *simulated annealing* som ger en suboptimal lösning som blir bättre ju längre algoritmen får arbeta.

#### 4.4 DREV-projekten ACTIF och CASE ATTI

*Defence Research Establishment Valcartier* (DREV) är en del av Kanadas försvarsforskningsorganisation som närmast motsvarar FOAs avdelningar för sensor- och ledningssystemteknik. Där har man utvecklat två demonstrations- och testsystem för taktisk informationsfusion, ett som kallas *Advanced Concepts on Tactical Information Fusion* (ACTIF) och ett annat som har fått namnet *Concept Analysis and Simulation Environment for Automatic Target Tracking and Identification* (CASE ATTI).

ACTIF är ett prototypsystem för informationsfusion i taktiska underrättelsetillämpningar, som bygger på erfarenheter från arbetet med NATO Data Fusion Demonstrator och som börjat omsättas till funktioner i en fältmässigt system, kallat *Intelligence Repository, Interpretation and Dissemination* (IntRepID). IntRepID är avsett att ge en fullständig bild av underrättelsesläget för en ledningsstab på brigad- och divisionsnivå.

ACTIF är konstruerat för att hålla reda på fragmentarisk inkommande information, för att ge stöd för att dela in analysuppgifter i delar som kan hanteras av individer eller små grupper av analytiker, och för att sätta samman dessa resultat till en sammanvägd bild som lätt kan uppfattas av ledningsstaben. Allt detta måste kunna ske mycket snabbt och flexibelt för att underrättelseprocessen ska kunna hänga med i snabba förändringar av läget och den operativa målsättningen. Text- och grafikbaserade analys- och presentationsmetoder visar omedelbart hur nyinkommen information bekräftar eller står i konflikt med gällande lägesuppfattning. Verktyg för snabb sökning i doktrin- och historiedatabaser är avsedda att ge stöd för att värdera trovärdigheten hos nya observationer eller rapporterade förändringar i fiendens beteende och gruppering. Avancerade datahanteringsfunktioner ger stöd för snabb uppdatering och för fusion av ny information med gällande läge även om de två beskrivningarna delvis står i konflikt med varandra. Operatören kan alltid backa tillbaka i analysprocessen, vilket är nödvändigt när ny information direkt motsäger gällande lägesuppfattning. Effekter av terräng- och väderförhållanden kan hela tiden tillåtas påverka fusionsprocessen.

Föregångaren till ACTIF, TIF-demonstratorn, har använts i laboratorieexperiment sedan 1992 och har lett till att både dess militära användare och utvecklingsgruppen fått djup respekt för de svårigheter och fallgropar som måste bemästras när man inför automatisering på detta kritiska område av ledningsfunktionen. Proven har klart visat på många av de fördelar som kan uppnås, och resultaten pekar ut processer som kan automatiseras nu, men också i vilken riktning framtida forskning på området behöver gå.

CASE ATTI är en testbädd för detaljerad simulering av sensorfusion under marina förhållanden. Systemet medger simulering av omgivningsfaktorer som påverkar prestanda för sensorer och använder sig av användardefinierade scenarier som kan innefatta flera plattformar (på, under och över ytan) och sensorsystem samt olika följnings- och fusionsalgoritmer. Huvudsyftet är att studera algoritmer för multisensordatafusion: hur kan man kombinera fragmentarisk målinformation från flera sensorer, som kan vara monterade på olika plattformar och vilkas egenskaper och tillförlitlighet kan variera starkt, så att man uppnår den bästa möjliga uppskattningen av position, rörelse och avsikter hos ett mål.



Simuleringsomgivningens modulära uppbyggnad erbjuder flexibilitet till stöd för sådana studier. Operatören kan definiera scenarier, specificera sensortyper och förmågor, från generella till mycket detaljerade, beskriva hur målspar från olika plattformar och sensorer ska fusioneras samt tolka simuleringsresultat. System med olika datafusionsarkitekturer kan modelleras, från sådana där ett primärt sensorsystem levererar all målsparinformation till sådana i vilka information från flera olika sensorer på flera olika plattformar kombineras i en global fusionscentral. Man kan också ge "ledning" (*cues*) till lokala sensorer genom att mata dem med lägesinformation från fusionsprocesser på hög nivå. Externt genererad sensorinformation från verkliga eller simulerade sensorer kan också utnyttjas.

#### 4.5 Command and Control Information Systems - DARPA

Innehåller bl a följande delprojekt:

- utveckla, utvärdera och demonstrera system för att medverka till att ge en sammanhållen lägebild inom strategiska övervakningsoperationer, att hjälpa operatören att analysera olika möjligheter och att utforska nya lösningar,
- utveckla teknologier för att bygga en sammanhållen lägebild med hjälp av data- och informationsfusion, geografiskt material och databaser med aprioriinformation,
- *Distributed Information Demonstrator* - DERA (Land systems).

Projektet syftar till att demonstrera distribuerad informationshantering inom ledningssystem och har bl a följande teman:

- *compact tactical picture distribution*: förmåga till bärbar taktisk situationsanalys,
- *distributed tracking architectures*: experiment med och demonstrationer av distribuerade spårningssystem,
- *target detection*: demonstrationer av hur mål av alla typer kan upptäckas, spåras och inlemmas i den taktiska situationsanalysen.

#### 4.6 Enhanced All-Source Fusion - AFRL/IFEA

I [Hinman00] summeras ett nyligen avslutat projekt som utförts av Sterling Software och Raytheon/E-Systems på uppdrag av *AFRL Information Directorate Fusion Technology*. Projektet, *Enhanced All-Source Fusion for Electronic Warfare and Execution* (EASF), syftade till att genomföra en *Advanced Technology Demonstration* (ATD) för *Air Force Special Operations Command* (AFSOC). Systemet som utvecklats inom projektet ger möjlighet att korrelera, fusionera och automatiskt resonera om underrättelse- och spaningsdata, så att information om hot kan göras noggrannare och snabbare tillgänglig för planering och genomförande av uppdrag. Systemet följer *Theater Battle Management Core Systems Architecture* och kommunicerar med dess *Combat Intelligence System* och är ett markbaserat system avsett att (om det vidareutvecklas till ett fältmässigt system) kommunicera med ett system kallat *Real Time Information to the Cockpit* (RTIC).

EASF utnyttjar och vidareutvecklar tidigare utvecklade underrättelse- och fusionsfunktioner på nivå 1, och kombinerar dem med två nya delsystem för fusion på nivå 2 och 3, nämligen *Nodal Exploitation and Analysis Tool* (NEAT) och *Command and Control Temporal Analysis System* (C2TAS).

NEAT är en fusionsmodul på förbandsnivå som identifierar fientliga ledningsnoder, kritiska mobila mål och om så begärs, valfria militära enheter, baserat på underrättelsedata från alla slags källor. Klassificeringen är baserad på en hybridmetod (bayesiansk/kvadratisk klassificering) som utnyttjar mallar (*templates*) för att känna igen militära förbands uppträdande. NEAT innehåller också en funktion för att rekonstruera kommunikationsnät (*Communications Network Identification*, CNI), som används för att identifiera strukturen hos motståndarens luftförsvarsorganisation.

C2TAS är en uppsättning verktyg som används för att analysera över tiden observerade aktiviteter för att söka identifiera specifika temporala och spatiella karakteristika, dvs för att försöka identifiera och därefter känna igen karakteristiska spatiotemporala aktivitetsmönster.

Enligt [Hinman00] har projektet visat att informationsfusion kan bidra till att förbättra flygförarens situation i samband med specialuppdrag, framför allt genom att minska mängden oförutsedda mål (*pop-up targets*), som annars utgör ett allvarligt hot. Artikeln är skriven på en allmän nivå och innehåller inga algoritmiska detaljer, men en i datafusionsteknik bevandrad läsare kan få ut information av avsevärt praktiskt värde.

## 5 Projektförslag

Förslagen innebär kunskapsuppbyggnad och metodutveckling inom områdena *management of uncertainty*, styrning av informationsinhämtning samt fusionsarkitekturer, med inriktning mot tillämpningar inom *situationsvärdering, hotvärdering och resursstyrningsprocesser i ett informationsfusionsystem för insatsledning*.

Resultat av forskningen förväntas bli ökad förmåga att med känd informationskvalitet göra datorstödda utsagor om omfattning, verksamhet, hotpotential och handlingsalternativ för komplexa, rörliga mängdobjekt (främst förbandsobjekt). Utsagorna baseras på metodik för aggregering, korrelering, verksamhetsidentifiering, hypotesgenerering och verifiering genom allokering av spaningsresurser i ett distribuerat system av fusionsnoder.

### 5.1 Modeller för situations- och hotanalys som kan möjliggöra effektiv allokering av sensorresurser

#### Analys

Ett delmål är att utveckla modeller för situations- och hotanalys som på ett effektivt sätt kan interagera med metoder för resursallokering. Syftet skall vara:

1. Att ge en klar bild av det rådande läget, vilka enheter som finns var och vilka hot som de utgör.
2. Att bidra till beslutsfattarens "information awareness" [Arnborg00] genom att underlätta för beslutsfattaren att få en klar bild av:
  - kvaliteten på existerande information
  - vilken viktig information som saknas
  - hur information bäst skall inhämtas med hjälp av existerande sensorresurser.

Metoder med sund teoretisk grundval skall utvecklas och analyseras, bl a med hjälp av simuleringar. Särskilt viktig blir kopplingen till metodområdena bayesianska nätverk, Dempster-Shafer, possibilistiskt resonerande och fuzzy-logik och de relevanta metoder som redan har utvecklats inom dessa områden.

Fokus skall ligga på hur modeller för situations- och hotanalys kan ge beslutsunderlag för allokering av sensorresurser.

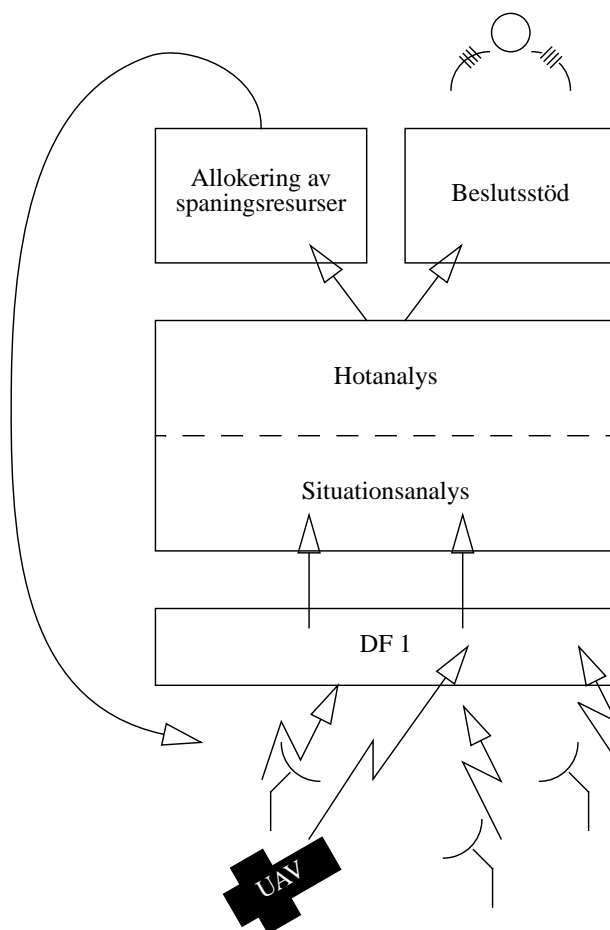
Hotanalys förutsätter en uppfattning om läget. Men för att på ett flexibelt sätt kunna resonera om framtida händelseutvecklingar (hypotesgenerering) krävs det en sammanhållen representation, en modell, av situationen. Situationsanalysen, med korrelering och aggregering, och hotanalysen skall således inte bara ge en "bild" av läget som operatören kan tolka utan det måste ske via en representation som systemet själv på ett effektivt sätt kan tolka och manipulera [Fjällström00].

#### Allokering

Allokering av sensorresurser utgår från det informationsbehov som föreligger. Informationsbehovet definieras av ett antal faktorer som kan sammanfattas i tre punkter:

- identifikation av den kunskap som saknas,
- identifikation av den kunskap som skulle kunna erhållas med hjälp av de tillgängliga sensorerna, det vill säga, identifikation av vilka informationsinsamlingsuppdrag som är möjliga,
- värdering av informationsinsamlingsuppdrag på grundval av en föreliggande hotanalys och kunskap om vilken relevant kunskap som saknas.

Det är inte meningsfullt att oplanerat söka identifiera all den kunskap som saknas eller all den kunskap som skulle kunna erhållas. Detta måste vara behovstyrt utifrån en bild av vilka hot som föreligger. Centralt är alltså att situations- och hotanalys görs på ett sådant sätt att det går att utläsa vilket informationsbehov som finns. Samtidigt är det riskabelt att låta de identifierade hoten helt styra informationsinhämtningen eftersom det minskar sannolikheten för upptäckt av oidentifierade hot. En avvägning måste göras mellan att upprätthålla en allmän övervakningsförmåga och mer specialiserad övervakning av specifika hot.



### 5.1.1 Hotövervakning

Hot, även på taktisk nivå, är komplexa. Olika typer av värden kan stå på spel. Vissa fasta mål hotas av förstörelse: civil infrastruktur såsom el och vattenförsörjning, militära anläggningar. Andra fasta mål hotas av kontrollförlust: broar, viktiga vägar och infarter till samhällen. Olika typer av resurser krävs för att förverkliga dessa olika typer av hot. Rörliga mål som militära enheter eller flyktingströmmar varierar i försvarsförmåga och mobilitet. Även här krävs olika typer av resurser för att förverkliga ett hot.

Förutsättningarna för att förverkliga ett hot är starkt situationsbundna. Avstånd och färdvägar, mobilitet och militär styrka, förmåga till samordning mellan geografiskt utspridda enheter, är några viktiga faktorer. Utvärderingen av ett hot beror alltså dels på den information som fås från situationsanalysen, dels på aprioriskunskap om geografi, olika enheters förmåga och taktiska beteendemönster.

### 5.1.2 Hotmodeller

För att kunna utgöra en grund för en identifikation av informationsbehovet krävs att man bygger upp en modell av varje hot. Modellen bör bland annat innehålla för hotet både tids- och rumsmässigt kritiska punkter. Med hjälp av modellen skall man kunna besvara frågor som: När kan hotet tidigast förverkligas, givet avstånd, färdvägar och mobilitet? När och var kan man avgöra om hotet är verkligt, vilka färdvägar är oförenliga med hotet och när kan man få reda på vilken färdväg som valts? Hur allvarligt är hotet, om det verkställs? När är sista tidpunkt för egna styrkor att ta ett beslut som innebär att egen handlingsfrihet att nu eller senare möta fienden bevaras?

En stor mängd information skall representeras och vara lättillgänglig vilket talar för att uppbyggnaden av en hotmodell sker systematiskt och i en sammanhållen representation [Fjällström00]. Detta innebär bl a att databasteknik som fortfarande befinner sig på forskningsstadiet (dynamiska, spatiotemporala databaser) kommer att behöva utnyttjas. Möjliga förebilder inom modellbaserad hotanalys är [Jesse93] och [Ross00]. Man behöver däremot inte förutsätta att en viss typ av modell skall kunna representera alla olika typer av hot utan man bör förmodligen skapa ett bibliotek av olika typer av hotmodeller (hotmallar) utifrån vilket en specifik hotmodell kan byggas upp för varje specifikt hot.

För att underlätta hanteringen av förekomsten av olika typer av modeller bör de vara utformade så att man för varje modell i ett gemensamt gränssnitt kan utläsa och rangordna informationsbehov om hotet: vilken typ av information som krävs, kanske även vilken (kombination av) sensor(er) som krävs, och var och när den skall inhämtas. Det skall alltså gå att lägga till nya hotmodeller utan att behöva omarbete de grundläggande algoritmerna för resursallokering.

Att bedöma sannolikheten att ett potentiellt hot verkligen är ett hot är en central del av hotanalysen. Potentiellt är varje fientlig enhet som finns inom ett område ett möjligt hot mot varje värdefullt mål i området, men givetvis är vissa kombinationer av enheter/hot mindre troliga. Hotmodellsuppbyggnaden måste alltså vara känslig för, och kunna ge en komprimerad representation (någon form av sannolikhetsmått) av de faktorer som bör påverka sannolikhetsbedöm-

ningen av möjliga hot, till exempel avstånd till målet, rörelseriktning, militär styrka och typ av enhet.

Strukturerade hotmodeller, där viktig men komplex information om hotet representeras på ett för systemet meningsfullt sätt, är en förutsättning för att få en flexibel resursallokering. De bör också bli en naturlig komponent i andra framtida beslutstöd för till exempel logistik eller ”wargaming”.

### 5.1.3 Allmän övervakning

Identifikation av hot utgår ifrån situationsanalysen: med kunskap om de enheter som finns i området identifierar man vilka hot som dessa enheter kan utgöra. Men situationsanalysen är alltid ofullständig. När stora ytor skall täckas finns alltid en risk att en större enheter i området är oupp-täckta. Dessutom kommer situationsanalysen att kvarlämna olösta korrelerings och aggregerings-problem. Är den enhet som observerades vid platsen A vid tidpunkten  $t_0$  samma enhet som observerades vid platsen B vid  $t_1$ ? Eller kan det vara två olika enheter? Var skulle den första enhe-ten ha tagit vägen i sådana fall? För att kunna besvara sådana frågor krävs det sensorresurser.

Eftersom situationsanalys inbegriper ett flertal olika processer, bl a korrelering och aggregering på olika nivåer, verkar det även här rimligt att söka modeller där det går att utläsa vilka informations-uppdrag som skulle ge en bättre situationsanalys. I exemplet ovan är kanske den primära hypote-sen att de två observationerna härrör från samma enhet, men en sekundär hypotes är att den första enheten istället färdas mot, säg, platsen C vilket ger skäl att tilldela sensorresurser till den färdvä- gen. Det skulle kanske kunna ske genom utveckling av paradigmen för *Multiple Hypothesis Tracking* (MHT).

För beslutsfattaren är vissa uppdrag givetvis mer angelägna än andra. Beslutsfattaren är inte intresserad av information för dess egen skull, utan som ett underlag för beslut. Vilka hot som skall prioriteras måste ytterst bestämmas av beslutsfattaren men det kan vara ineffektivt att låta detta ske när hoten väl uppdragar sig. Att tillskriva olika möjliga markmål olika prioritet som en grund för hotanalys bör ses som en del av IPB-processen [IPB94] och kan alltså göras innan fak-tiska hot uppträder. På grundval av de hot som har prioriterats av beslutsfattaren bör man även kunna värdera vilka spaningsuppdrag som bäst ökar kunskapen om enheter som är relevanta för de allvarligaste hoten.

Aggregering, korrelering och hotanalys är i stor utsträckning reaktiva eller händelsedrivna proces-ser: observationer görs, man försöker relatera dessa till andra observationer genom korrelering och aggregering och till ett större händelseförlopp genom hotanalys. I den mån man förlitar sig på mobila sensorer är faran att det blir som en sämre fotbollsmatch där alla springer efter bollen. För att undvika detta bör man även utveckla modeller där prioriterade områden men hitintills händel-sefattiga områden kan få del av sensorresurserna.

## 5.2 Effektiv allokering av sensorresurser

Utifrån en uppfattning om vilken information som skall hämtas in, var den skall hämtas in, när den kan hämtas in och när den behövs skall de tillgängliga sensorresurserna fördelas [Jönsson98].

Man behöver skilja på stationära sensorplattformar (aerostater, stationära radarstationer), som lätt kan inriktas på specifika områden inom sin givna räckvidd, och sensorplattformar av typen UAV, IAM ("intelligenta puckar") eller medföljande trupp, som antingen är mobila eller snabbt kan utplaceras för att täcka ett område. De förra allokeras med ett tidsperspektiv på sekunder eller bråkdelar av sekunder, medan de senare allokeras med ett tidsperspektiv på minuter eller timmar.

Poängen är inte att allokeringsprocesserna kan betraktas som helt oberoende: om information kan inhämtas med hjälp av en aerostat är det onödigt att skicka en spaningspatrull. Poängen är snarare att styrning av aerostater och stationära radarstationer bäst delegeras till sensornära styrningsprocesser. I vilken mån dessa behöver externt givna prioriteringar för att ge bästa möjliga information och i så fall hur dessa prioriteringar skall förmedlas är ett problem som bör studeras.

Resursallokering kräver åtminstone:

1. en lista över vilka uppdrag som det finns behov av att utföra, prioriteringar över dessa och när de behöver utföras.
2. en uppfattning om hur mycket resurser ett uppdrag tar i anspråk: Vilka sensorer skall användas? Hur länge behövs de?

Några faktorer som påverkar hur mycket resurser ett uppdrag tar i anspråk:

- varifrån spaning kan ske (siktlinjer, etc.),
- tillgängliga färdvägar,
- hotbilder för färdvägar (ett luftvärnsbatteri kan exempelvis omöjliggöra vissa färdvägar för en UAV),
- kan valet av en viss färdväg ge viktig "överskottsinformation"?
- den tid som måste avsättas för spaning (räcker en överflygning, eller kan det ta en timme innan man är säker på huruvida en enhet har passerat en viss plats?).

### 5.3 Forskningsprogram

Forskningsprogrammet kommer att bedrivas som ett samarbete mellan FOA och KTH/NADA. Två ledande forskare vid NADA, Stefan Arnborg vid gruppen för *Teoretisk datalogi* (TCS) och Henrik Christensen vid *Centrum för Autonom System* (CAS), arbetar redan idag med datafusionsproblem och har uttryckt intresse av att delta i projektet som forskarhandledare. Som vanligt när det gäller forskningssamarbete med UoH kommer huvuddelen av forskningsinsatsen att utföras av doktorander under ledning av respektive handledare.

Två FOA-forskare (John Cantwell och Johan Schubert), en handledare och en doktorand från NADA/TCS (Stefan Arnborg) samt en handledare (Henrik Christensen) och en doktorand från NADA/CAS avses delta i projektet.

Arbetet skall bestå i forskning med syfte att utveckla metoder för informationsfusion i ledningsstöd- och underrättelsesystem, som kan bidra till att en tidsaktuell läges- och prognosmodell för en komplex markstridssituation kan skapas och underhållas. Fokus skall vara att utveckla mod-

eller för situations- och hotanalys som kan möjliggöra effektiv allokering av sensorresurser (se 5.1 och 5.2).

I projektet ingår uppbyggnad av en simuleringsmodell baserad på ett scenario där metodiken kan utprovas och visualiseras, samt realisering, utvärdering och demonstration av de utvecklade fusionsalgoritmerna i denna modell.



## 6 Litteraturlista

- [Adrian93] Adrian, R.A. (1993) "Sensor Management", *Proc. 1993 AIAA/IEEE Digital Avionics System Conf.*, pp. 32-37.
- [Ahlqvist00] Ahlqvist, O., Keukelaar, J., Oukbir, K. (2000) "Rough Classification and Accuracy Assessment", *Int. J. of Geographical Inf. Sci.*, **14**(5), pp. 475-496.
- [Alberola99] Alberola, C. och G.V. Cybenko (1999) "Tracking with text-based messages", *IEEE Intell. Syst.*, pp. 70-78, July/August.
- [Allen90] Allen, J.F, J. Hendler, A. Tate (eds.) (1990) *Readings in Planning*, Morgan Kaufmann, San Mateo, California.
- [Andersen89] Andersen, S.K., Olesen, K.G., Jensen, F.V., Jensen, F. (1989) "HUGIN - a shell for building belief universes for expert systems", *Proc. 11th Int. J. Conf. AI*, pp. 1080-1085, Morgan Kaufmann.
- [Andreassen89] Andreassen, S., Jensen, F.V., Andersen, S.K., Falck, B., Kjærulff, U., Woldbye, M., Sørensen, A.R., Rosenfalck, A., Jensen, F. (1989) "MUNIN - an expert EMG assistant", *Computer-Aided Electromyography and Expert Systems* (Desmedt, J.E., Ed.), Elsevier, Amsterdam, pp. 255-277.
- [Antony95] Antony, R.T (1995) *Principles of Data Fusion Automation*, Artech House, Boston London.
- [Arnborg00] Arnborg, S., H. Artman, J. Brynielsson, K. Wallenius (2000) "Information awareness in Command and Control: Precision, Quality, Utility", *Proc. Third Int. Conf. Information Fusion (FUSION 2000)*, Paris, pp. ThB1/25-32.
- [Avitzour92] Avitzour, D. (1992) "A Maximum Likelihood Approach to Data Association" (1992) *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Syst.*, **AES-28** (2), pp.560-565.
- [BADD00] URL: <http://dtsn.darpa.mil/iso/> (October 2000).
- [Bar-Shalom88] Bar-Shalom, Y., T.E. Fortmann (1988) *Tracking and Data Association*, Orlando, FL: Academic Press.
- [Bar-Shalom95] Bar-Shalom, Y., X-R Li (1995) *Multitarget-Multisensor Tracking: Principles and Techniques*, Storrs, CT: YBS Publishing.
- [Barwise83] Barwise, J., J. Perry (1983) *Situations and Attitudes*, The MIT Press, Cambridge Massachusetts.
- [Bergeron98] Bergeron, P., J.Couture, J.R.Duquet, M.Macieszczak, M. Mayrand (1998) "A New Knowledge-Based System for the study of Situation and Threat Assessment in the Context of Naval Warfare", *Proc. First Int. Conf. Information Fusion (FUSION 98)*, pp.388-395.
- [Bergsten93] Bergsten, U., J. Schubert (1993) "Dempster's Rule for Evidence Ordered in a Complete Directed Acyclic Graph", *Int. J. Approx. Reason.*, 9:37-73.
- [Bigün97] Bigün, E.S. (1997) *Bayesian Risk Analysis of Rare Events, Such As Catastrophes, by Means of Expert Assessments*, Ph D thesis, Dept. of Statistics, Stockholm University.
- [Billam92] Billam, E.R. (1992) "Parameter Optimisation in Phased Array Radar", *Proc. Int. Radar Conf.*, pp.34-37.
- [Binder00] Binder, J., D. Koller, S.J. Russell, K. Kanazawa (2000) "Adaptive probabilistic networks with hidden variables", *Machine Learning J.*, to appear.
- [Björnfot00a] Björnfot, J. (2000) *Modellering av kolonnproblemet*, FOA R--00-014480505--SE.
- [Björnfot00b] Björnfot, J., P. Svensson (2000) "Modelling the Column Recognition Problem", antaget till *Proc. Third Int. Conf. Information Fusion (FUSION 2000)*, Paris, pp. MoD1/24-30.

- [Blackman86] Blackman, S.S. (1986) *Multiple Target Tracking with Radar Applications*, Norwood, MA: Artech House, 1986.
- [Blackman90] Blackman, S.S.(1990) "Association and Fusion of Multiple Sensor Data", *Multi-target-Multisensor Tracking: Advanced applications*, Y. Bar-Shalom (Ed.), Norwood, MA: Artech House, Ch. 6.
- [Blackman99] Blackman, S., R. Popoli (1999) *Design and Analysis of Modern Tracking Systems*, Artech House, Boston London.
- [Bogler87] Bogler, P. (1987) "Dempster Shafer Reasoning With Applications to Multi Sensor Target Identification", *IEEE Trans. Syst., Man and Cybern.*, **SMC-17**, Nov./Dec. 1987, pp. 968-977.
- [Bossé97] Bossé, E. J. Roy (1997) "Fusion of Identity Declarations From Dissimilar Sources Using the Dempster-Shafer Theory", *Optical Eng.* **36**(3), pp. 648-657.
- [Boyen98] Boyen, X., D. Koller (1998) "Tractable Inference for Complex Stochastic Processes", *Proc. Fourteenth Conf. on Uncertainty in AI*, pp. 33-42.
- [Brynielsson00] Brynielsson, J. (2000) *Decision Analysis in Microworlds*, TRITA-NA-E0033, KTH NADA, Stockholm.
- [Cantwell98] Cantwell, J. (1998) "Resolving Conflicting Information", *J. Logic, Language and Information*, **7**(2), pp. 191-220.
- [Chamberlain95] Chamberlain, S.C. (1995) "Model-Based Battle Command: A Paradigm Whose Time Has Come", *Proc. 1995 Symp. C2 Research and Technology*, National Defense University, Washington DC.
- [Chang83] Chang, C.B, L.C.Youens (1983) "An Algorithm for Multiple Target Tracking and Data Correlation", MIT Lincoln Laboratory Report TR-643, June 13, 1983.
- [Chang84] Chang, C.B, et al. (1984) "A Tracking Algorithm for Dense Target Environments", *Proc. American Control Conf.*, San Diego, CA, 1984, pp.613-618.
- [Chang96] Chang, K.-C., et al.(1996) "Bayesian Probabilistic Inference for Target Recognition", *Signal Processing, Sensor Fusion and Target Recognition V*, Proc. SPIE, Vol.2755, pp. 158-165.
- [Chang97] Chang, K.-C., R. Fung (1997) "Target Identification With Bayesian Networks In a Multiple Hypothesis Tracking System", *Optical Eng.*, **36**(3), pp.684-691.
- [Chickering97a] Chickering, D., Heckerman, D. (1997) "Efficient approximations for the marginal likelihood of Bayesian networks with hidden variables", *Machine Learning* **29**, pp. 181-212.
- [Chickering97b] Chickering, D., Heckerman, D., Meek, C. (1997) "A Bayesian approach to learning Bayesian networks with local structure", *Proc. 13th Conf. Uncertainty in AI*, Morgan Kaufmann.
- [Chickering99] Chickering, D., Heckerman, D. (1999) "Fast Learning from Sparse Data", *Proc. 15th Conf. Uncertainty in AI*, pp. 109-115, Morgan Kaufmann.
- [Choi99] Dae-Youn Choi (1999) "A new aggregation method in a fuzzy environment", *Decision Support Syst.*, **25**, pp. 39-51.
- [Cowell99] Cowell, R.G., Dawid, A.P., Lauritzen, S.L., Spiegelhalter, D.J. (1999) *Probabilistic Networks and Expert Systems*, Springer.
- [Cox96] Cox, I.J, S.L.Hingorani,(1996) "An Efficient Implementation of Reid's Multiple Hypotheses Tracking Algorithm and Its Evaluation for the Purposes of Visual Tracking", *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **PAMI-18**(2), pp. 138-150.
- [Dall99] Dall, I.W. (1999) "Threat Assessment without Situation Assessment", *1999 Information, Decision and Control Proc.*, pp. 365-370.
- [Dean88] Dean, T., K. Kanazawa (1988) "Probabilistic temporal reasoning". Proc. AAAI.
- [Dean91] Dean, T., M. Wellman (1991) *Planning and Control*, Morgan Kaufmann.

- [Dencœux95a] Dencœux, T. (1995) “A k-nearest neighbour classification rule based on Dempster-Shafer theory”, *IEEE Trans. Syst., Man and Cybern.* **25**(5), pp. 804-813.
- [Dencœux95b] Dencœux, T. (1995) “An evidence-theoretic neural network classifier”, *IEEE Int. Conf. Syst., Man and Cybern.*, pp. 712-717.
- [Dencœux96] Dencœux, T., Govaert, G. (1996) “Combined supervised and unsupervised learning for system diagnosis using Dempster-Shafer theory”, *IMACS Multiconf. Comp. Eng. in Syst. Applications (CESA’96), Symp. Control, Optimization and Supervision* (Borne, P., Staroswiecki, M., Cassar, J.P., and El Khattabi, S., Eds.) pp. 104-109.
- [Dencœux97] Dencœux, T. (1997) “Analysis of evidence-theoretic decision rules for pattern classification”, *Pattern Recognition* **30**(7), pp. 1095-1107.
- [Dencœux99] Dencœux, T. (1999) “Reasoning with imprecise belief structures”, *Int. J. Approx. Reason.* **20**, pp. 79-111.
- [Dencœux00a] Dencœux, T. (2000) “A neural network classifier based on Dempster-Shafer theory”, *IEEE Trans. Syst., Man and Cybern. A* **30**(2), pp. 131-150.
- [Dencœux00b] Dencœux, T. (2000) “Modelling vague beliefs using fuzzy-valued belief structures”, *Fuzzy Sets and Syst.* **116**(2), pp. 167-199.
- [Doucet00] Doucet, A., N. de Freitas, K. Murphy, S. Russell (2000) “Rao-Blackwellised Particle Filtering for Dynamic Bayesian Networks.”, *Proc. Sixteenth Conf. on Uncertainty in AI*, Morgan Kaufmann.
- [Dubois94] Dubois D., Prade H. (1994) “Can we enforce full compositionality in uncertainty calculi?”, *Proc. 12th Nat. Conf. AI (AAAI’94)*, Seattle, Washington, pp. 149-154.
- [Dubois95] Dubois D., Prade H. (1995) “Numerical representations of acceptance”, *Proc. 11th Conf. Uncertainty in AI (UAI’95)*, Aug. 1995, San Francisco, pp. 149-156.
- [Dubois96] Dubois D., Prade H., Smets P. (1996) “Representing partial ignorance”, *IEEE Trans. Syst., Man and Cybern.* **26**(3), pp. 361-377.
- [Dubois97] Dubois D., Prade H. (1997) “Bayesian conditioning in possibility theory”, *Fuzzy Sets and Syst.* **92**, pp. 223-240.
- [Dubois98] Dubois D., Prade H. (1998) “Possibility theory: qualitative and quantitative aspects”, *Handbook of Defeasible Reasoning and Uncertainty Systems Management* (P. Smets, Ed.), Kluwer.
- [Ester96] Ester M., Kriegel H.-P., Wirth S. (1996) “Feature Based Classification of Protein Docking Sites: An Algorithm for Large Databases and Experimental Results”, *Proc. German Conf. Bioinformatics (GCB ‘96)*, Leipzig, Germany, pp. 193-196.
- [Forbes95] Forbes, J., K. Huang, K. Kanazawa, S. Russell (1995) “The BATmobile: Towards a Bayesian Automated Taxi”, *Proc. IJCAI 1995*.
- [Fjällström00] Fjällström, P-O, G. Neider, M. Persson, T. Risch, P. Svensson (2000) *Arkitekturprinciper för informationsöverlägsenhet i framtidens ledningsstödsystem*, FOA rapport FOA-R--00-01435-505--SE.
- [Goldszmidt96] Goldszmidt, M., Pearl, J. (1996) “Qualitative Probabilities for Default Reasoning, Belief Revision, and Causal Modelling”, *Artificial Intelligence* **84**(1-2), pp. 57-112.
- [Goodman97] Goodman, I.R, R.P.S Mahler, H.T. Nguyen (1997) *Mathematics of Data Fusion*, Kluwer.
- [Gonsalves99] Gonsalves, P.G., et al. (1999) “A Hybrid Artificial Intelligence Architecture for Battlefield Information Fusion”, *Proc. Second Int. Conf. Information Fusion (FUSION 99)*, pp. 463-468.

- [Gordon96] Gordon, N., D. Salmond, (1996) "Bayesian Target Selection After Group Pattern Distortion", *Signal and Data Processing of Small Targets 1996*, Proc. SPIE, **2759**, Apr. 1996, pp. 279-292.
- [Gordon00] Gordon, N., A. Marrs, D. Salmond (2000) "Sequential analysis of nonlinear dynamic systems using particles and mixtures", antaget till *Nonlinear and nonstationary signal processing*, Fitzgerald, W.J., *et al.* (eds.), Cambridge University Press.
- [Grewal93] Grewal, M.S., A.P. Andrews (1993) *Kalman Filtering Theory and Practice*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- [Gärdenfors83] Gärdenfors, P., B. Hansson, N.E. Sahlin (1983) *Evidentiary Value: Philosophical, judicial and psychological aspects of a theory*. Lund, Sweden: C.W.K. Gleerups.
- [Halpern92] Halpern, J.Y., R. Fagin (1992) "Two views of belief: belief as generalised probability and belief as evidence", *Artificial Intelligence*, **54**, pp. 275-317.
- [Hatch99] Hatch, M.D., E.R. Jahn, J.L. Kaina (1999) "Fusion of Multi-Sensor Information from an Autonomous Undersea Distributed Field of Sensors", *Proc. Second Int. Conf. Information Fusion (FUSION 99)*, pp. 4-11.
- [Hinman00] Hinman, M., J. Marcinkowski (2000) "Final Results on Enhanced All Source Fusion (EASF)", *Sensor Fusion: Architectures, Algorithms, and Applications IV*, Proc. of SPIE, **405**.
- [IPB94] *Intelligence Preparation of the Battlefield*, US Army Field Manual 34-130, US Department of the Army, Washington, DC, 1994.
- [Jain88] Jain, A.K., Richard C. Dubes (1988) *Algorithms for Clustering Data*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- [Jain99] Jain, A.K., M.N. Murty, P.J. Flynn (1999) "Data Clustering: A Review", *ACM Computing Surveys*, **31**(3), pp. 264-323.
- [Janez96] Janez, F. (1996) *Fusion de sources d'information définies sur des référentiels non exhaustifs différents*. Doktorsavhandling, Université d'Angers.
- [Janez98] Janez, F., Appriou, A. (1998) "Theory of evidence and non-exhaustive frames of discernment: Plausibilities correction methods", *Int. J. Approx. Reason.* **18**(1-2), pp. 1-19.
- [Jeffrey83] Jeffrey, R.C. (1983) *The Logic of Decision*. Chicago: Univ of Chicago Press, 2. ed.
- [Jensen90] Jensen, F.V., Lauritzen, S.L., Olesen, K.G. (1990) "Bayesian updating in causal probabilistic networks by local computations", *Comp. Statist. Quarterly* **4**, pp. 269-282.
- [Jensen94] Jensen, F.V., Liang, J. (1994) drHUGIN - a system for value of information in Bayesian networks, in *Proc. 5th Int. Conf. Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge -based Systems (IPMU'94)*, Paris, France, pp. 178-183.
- [Jensen96] Jensen, F.V. (1996) *An Introduction to Bayesian Networks*, Springer Verlag, New York.
- [Jensen99] Jensen, F.V. (1999) "Gradient descent training of Bayesian networks", *Proc. 5th European Conf. Symbolic and Quantitative Approaches to Reasoning with Uncertainty (ECSQARU'99)*, Springer Verlag (LNAI 1638), pp. 190-200.
- [Jesse93] Jesse, L. (1993) *Temporal Transition Models, A New Approach to Situation Assessment and Predictive Analysis*, Ph.D. Thesis, University of Colorado.
- [Johnson99] Johnson, J. R. Chaney (1999) "Recursive Composition Inference for Force Aggregation", *Proc. Second Int. Conf. Information Fusion (FUSION 99)*, pp. 1187-1195.
- [Jönsson98] Jönsson, L., G. Neider, J. Schubert, P. Svensson (1998) *Informationsfusion i den taktiska underrättelseprocessen*, FOA-R-98-00902-505--SE (URL: <http://www.foa.se/infofusion/>).

- [Jöred98] Jöred, K, P. Svensson (1998) "Target Tracking in Archipelagic ASW: A Not-So-Impossible Proposition?", *Proc. of the Underwater Defence Technology Europe 98 Conference*, 23-25 June 1998, London UK, Nexus Media Limited, pp.172-175.
- [Jørgensen00] Jørgensen, B., Lauritzen, S.L. (2000) "Multivariate dispersion models", *J. Multivariate Analysis*, **74**, pp. 267-281.
- [Ke00] C.-C. Ke, J. Garcia Herrero, J. Llinas (2000) "Comparative Analysis of Alternative Ground Target Tracking Techniques", *Proc. Third Int. Conf. Information Fusion (FUSION 2000)*, Paris, pp. WeB5/3-10.
- [Kjaerulff95] Kjaerulff, U. (1995) "dHUGIN: a computational system for dynamic time-sliced Bayesian networks", *Int. J. of Forecasting*, **11**, pp. 89-111.
- [Kristensen96] Kristensen, S. (1996) *Sensor Planning with Bayesian Decision Analysis*. Doktors-avhandling, Aalborgs universitet.
- [Kurien90] Kurien, T. (1990) "Issues in the Design of Practical Multitarget Tracking Algorithms", *Multitarget-Multitracking Advanced Applications*, Artech House, pp.43-83.
- [Kyburg87] Kyburg, H.E. (1987) "Bayesian and non-Bayesian evidential updating", *Artificial Intelligence*, 31:271-293.
- [Lauritzen88] Lauritzen, S.L., Spiegelhalter, D.J. (1988) "Local computations with probabilities on graphical structures and their application to expert systems" (with discussion). *J. R. Statist. Soc., Ser. B* **50**, 157-224.
- [Lauritzen92] Lauritzen, S.L. (1992) "Propagation of probabilities, means and variances in mixed graphical association models", *J. American Statist. Assoc.* **87**, 1098-1108.
- [Lauritzen96] Lauritzen, S.L. (1996) *Graphical Models*, Clarendon Press, Oxford.
- [Lauritzen00] Lauritzen, S.L., and Jensen, F.V. (2000) "Stable local computation with conditional Gaussian distributions", *Statistics and Computing*, to appear.
- [Lin96] Lin, J. (1996) "Integration of Weighted Knowledge Bases", *Artificial Intelligence*, **83**, pp. 363-378.
- [Liu96] Liu, J., K.-C. Chang (1996) "Feature-Based Target Recognition With a Bayesian Network", *Optical Eng.*, **35**(3), pp.701-707.
- [Madsen98] Madsen, A. L., Jensen, F. V. (1998) "Lazy Propagation in Junction Trees", *Proc. 14th Conf. Uncertainty AI*, Madison, Wisconsin, pp. 362-369.
- [Maples89] Maples, W.K (1989) "Employment of Pattern Matching in Multiple Target Tracking", *Signal and Data Processing of Small Targets*, Proc. SPIE, **1096**, March 1989, pp. 160-171.
- [Molina95] Molina Lopez, J.M., et al. (1995) "Fuzzy Reasoning for Multisensor Management", *Proc. 1995 IEEE Int. Conf. Syst., Man and Cybern.*, pp. 1398-1403.
- [Mulgund97] Mulgund, S., et al. (1997) "OLIPSA: On-Line Intelligent Processor for Situation Assessment", *2nd Annual Symp. and Exhibition on Situational Awareness in the Tactical Environment*.
- [Nicholson94] Nicholson, A.E, J.M. Brady (1994) "Dynamic belief networks for discrete monitoring." *IEEE Trans. on Syst., Man and Cybern.*, **24**, pp. 1593-1610.
- [Nielsen99] Nielsen, T., Jensen, F.V. (1999) "Well-defined decision scenarios", in *Proc. 15th Conf. Uncertainty AI*, Stockholm, pp. 502-511.
- [Nifle98] Nifle, A. et al. (1998) "Multi Layout Identification", *Proc. Eurofusion '98*, pp. 177-184.
- [Pasula99] Pasula, H., S. Russell, M. Ostland, Y. Ritov, (1999) "Tracking many objects with many sensors" *Proc. IJCAI '99*, 1999.
- [Pearl88] Pearl, J. (1988) *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of plausible inference*, Morgan Kaufmann Publishers, Palo Alto.

- [Pearl93] Pearl, J. (1993) "Belief Networks Revisited", *Artificial Intelligence* **59**, 49-56.
- [Pearl94] Pearl, J., Verma, T.S. (1994) "A Theory of Inferred Causation", *Logic, Methodology and Philosophy of Science IX* (Prawitz, D., Skyrms, B., and Westerstahl, D., Eds.), Elsevier, pp. 789-811.
- [Pearl97] Pearl, J. (1997) "Graphical Models for Probabilistic and Causal Reasoning", *The Computer Science and Engineering Handbook* (Tucker, A.B., Jr., Ed.), CRC Press, pp. 697-714.
- [Pearl99a] Pearl, J. (1999) "Bayesian Networks", *MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences*, Cambridge, MA.
- [Pearl99b] Pearl, J. (1999) "Reasoning with cause and effect", *Proc. Int. J. Conf. AI*, pp. 1437-1449, Morgan Kaufmann, 1999.
- [Pearl00] Pearl, J. (2000) *Causality: Models, Reasoning and Inference*, Cambridge Univ. Press.
- [Petit-Renaud98a] Petit-Renaud, S., Dencœux, T. (1998) "A neuro-fuzzy system for missing data reconstruction", *1998 IEEE Workshop on Emerging Technologies, Intelligent Measurement and Virtual systems for instrumentation and measurement*, Saint-Paul.
- [Petit-Renaud98b] Petit-Renaud, S., Dencœux, T. (1998) "A Fuzzy-neuro system for reconstruction of multi-sensor information", *Fuzzy-Neuro Systems'98* (Brauer, W., Ed.), pp. 322-329, Infix.
- [Picard98] Picard, J. (1998) "Modelling and combining evidence provided by documents relationships using probabilistic argumentation systems", *Proc. Conf. ACM SIG Information Retrieval*.
- [Rasmussen98] Rasmussen, P.H. (1998) "Data Fusion Demonstrator, Projektstatus med udgangen af 1997", Forsvarets forskningstjeneste, København, FOFT F-18/1998
- [Reid79] Reid, D. (1979) "An algorithm for Tracking Multiple Targets", *IEEE Trans Automatic Control*, Vol. AC-24, No. 6, Dec 1979, pp.843-854.
- [Ross00] Ross, K.N., R.D. Chaney (2000) "Hidden Markov Models for Threat Prediction Fusion", *Sensor Fusion: Architectures, Algorithms and Applications IV*, Dasarathy, B.V (ed.) SPIE Vol.4051, pp.300-311.
- [RTP99] URL: <http://public.logica.com/~grace/> (October 2000)
- [Russell99] Russell, S. (1999) "Expressive probability models in science", *Proc. 2nd Int'l Conf. on Discovery Science*, Springer.
- [Saffiotti91a] Saffiotti, A., Umkehrer, E. (1991), "PULCINELLA: A General Tool for Propagating Uncertainty in Valuation Networks", *Proc. 7th Conf. Uncertainty in AI*, pp. 323-331, Los Angeles.
- [Saffiotti91b] Saffiotti, A., Umkehrer, E. (1991) "PULCINELLA User's Manual", Technical Note TR/IRIDIA/91-5, IRIDIA, Univ. Libre de Bruxelles.
- [Sandewall94] Sandewall, E. (1994). *Features and Fluents. The Representation of Knowledge about Dynamical Systems*. Volume I. Oxford University Press.
- [Sarunic95] Sarunic, P.W. (1995) "Adaptive Variable Update Rate Target Tracking for a Phased Array Radar", *Proc. IEEE Int. Radar Conf.*, pp. 317-322.
- [Schmaedeke98] Schmaedeke, W., K. Kastella (1998) "Information Based Sensor Management and IMMKF", Signal and Data Processing of Small Targets 1998, *Proc. SPIE*, **3373**, pp. 390-401.
- [Schubert95] Schubert, J. (1995) "Cluster-based Specification Techniques in Dempster-Shafer Theory", *Proc. European Conf. Symbolic and Quantitative Approaches to Reasoning and Uncertainty*, pp. 395-404, Springer-Verlag, Berlin.
- [Schubert99] Schubert, J. (1999) "Fast Dempster-Shafer clustering using a neural network structure", *Information, Uncertainty and Fusion*, (Bouchon-Meunier, B., Yager, R.R., and Zadeh, L.A., Eds.), pp. 421-430, Kluwer Academic Publishers (SECS 516).

- [Schubert00] Schubert, J. (2000) "Managing Inconsistent Intelligence", *Proc. Third Int. Conf. Information Fusion (FUSION 2000)*, Paris, pp. TuB4/10-16.
- [Schwartz00] Schwartz, S.A. (2000) "Algorithm for automatic recognition of formations of moving targets", *Sensor Fusion: Architectures, Algorithms and Applications IV*, Dasarathy, B.V (ed.) *Proc. SPIE*, **4051**, pp.407-417.
- [Shafer76] Shafer, G. (1976) *A Mathematical Theory of Evidence*. Princeton, NJ: Princeton Univ. Press.
- [Simard96] Simard, M.-A., et al. (1996) "Data Fusion of Multiple Sensor Attribute Information for Target Identity Estimation Using a Dempster-Shafer Evidential Combination Algorithm", *Signal and Data Processing of Small Targets 1996, Proc. SPIE*, **2759**, pp. 577-588.
- [Sittler64] Sittler, R.W. (1964) "An Optimal Data Association Problem In Surveillance Theory", *IEEE Trans on Military Electronics*, **MIL-8**, pp.125-139.
- [Smets88] Smets, P. (1988) "Belief function", *Non Standard Logics for Automated Reasoning*, (Smets, P., Mamdani, A, Dubois, D., Prade, H., Eds.), Academic Press, London.
- [Smets90] Smets, P. (1990) "The combination of evidence in the transferable belief model", *IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence* **12**, pp. 447-458.
- [Smets93] Smets, P. (1993) "An axiomatic justification for the use of belief function to quantify beliefs", *Proc. Int. J. Conf. AI (IJCAI'93)*, Chambery, pp. 598-603.
- [Smets94] Smets, P., Kennes, R. (1994) "The transferable belief model", *Artificial Intelligence* **66**, pp. 191-234.
- [Smets95] Smets, P., Kruse, R. (1995) "The transferable belief model for belief representation", *Uncertainty Management in Information Systems: from Needs to solutions* (Smets, P., and Motro, A., Eds.) Kluwer, Boston.
- [Smets99] Smets, P. (1999) "Practical Uses of Belief Functions", *Proc. 15th Conf. Uncertainty in AI* (Laskey, K.B., and Prade, H., Eds.), pp. 612-621, Morgan Kaufmann, San Francisco.
- [Smith99] Smith, J.F., R.D. Rhyne (1999) "A Fuzzy Logic Algorithm for Optimal Allocation of Distributed Resources", *Proc. Second Int. Conf. Information Fusion (FUSION 99)*, 402-409
- [Spiegelhalter93] Spiegelhalter, D.J., Dawid, A.P., Lauritzen, S.L., Cowell, R.G. (1993) "Bayesian analysis in expert systems", *Statistical Science* **8**, 219-247.
- [SRI00] URL: <http://www.ai.sri.com/representation/> (October 2000)
- [Waltz90] Waltz, E.L, J. Llinas (1990) *Multi-Sensor Data Fusion*, Norwood, MA: Artech House.
- [Weinberg77] Weinberg, L. (1977) "Scheduling Multifunction Radar Systems", *Proc. IEEE East-Con 77 Record*, pp.10-4A-10-4I.
- [Varshney97] Varshney, P. (1997) *Distributed Detection and Data Fusion*. New York: Springer.
- [Wong95] Wong, A.K.C, H. Leung (1995) "Multiple Target Tracking Based on Constellation Matching and Kalman Filter," *AGARD Guidance and Control for Future Air-Defense Systems*, pp. 25.1-25.22.
- [Worboys98] Worboys, M. F. (1998) "Imprecision in finite resolution spatial data", *Geoinformatica* **2**(3), pp. 257-280.
- [Voorbraak97] Voorbraak, F. (1997) "Combining evidence under partial ignorance", *Qualitative and Quantitative Practical Reasoning*, D. Gabbay et al. (eds.). Berlin: Springer Verlag (LNAI 1244), pp. 574-588.
- [Xu93] Xu, H. (1993) "An Efficient Tool for Reasoning with Belief Functions", *Uncertainty in Intelligent Systems* (Bouchon-Meunier, B., Valverde, L., and Yager, R.R., Eds.), pp. 215-224, North-Holland, Amsterdam.

- [Xu94] Xu, H., Kennes, R. (1994) "Steps towards an Efficient Implementation of Dempster-Shafer Theory", *Advances in the Dempster-Shafer Theory of Evidence* (Yager, R.R., Fedrizzi, M., and Kacprzyk, J., Eds.), pp. 153-174, New York: Wiley.
- [Xu96] Xu, H., Hsia, Y-T., Smets, P. (1996) "Transferable Belief Model for Decision Making in Valuation-Based Systems", *IEEE Trans. Syst., Man and Cybern.*, **A 26**, pp. 698-707.
- [Zhang96] Zhang, Z., K.J.Hintz (1996) "OGUPSA sensor Scheduling Architecture and Algorithm", *10th Annual Int. Aerosense Symp. Proc. SPIE*, **2755**, pp. 296-303.
- [Zouhal95a] Zouhal, L.M., and Denœux, T. (1995) "An adaptive k-NN rule based on Dempster-Shafer theory", *Proc. 6th Int. Conf. Computer Analysis of Images and Patterns (CAIP'95)*, pp. 310-317. Springer Verlag.
- [Zouhal95b] Zouhal, L.M., Denœux, T. (1995) "A comparison between fuzzy and evidence-theoretic k-NN rules for pattern recognition", *Proc. EUFIT'95*, pp. 1319-1325.
- [Zouhal97] Zouhal, L.M., Denœux, T. (1997) "Generalizing the evidence-theoretic k-NN rule to fuzzy pattern recognition", *Proc. 2nd Int. Symp. Fuzzy Logic and Applications (ISFL'97)*, pp. 294-300. ICSC Academic Press.
- [Zouhal98] Zouhal, L.M., Denœux, T. (1998) "An evidence-theoretic k-NN rule with parameter optimization", *IEEE Trans. Syst., Man and Cybern. C* **28**(2), 263-271.
- [Zweig97] Zweig, G., S. Russell (1997) *Compositional Modeling with DPNs*, CSD-97-970, Computer Science Division, University of California at Berkeley.
- [Zweig98] Zweig, G., S. Russell (1998) "Speech Recognition with Dynamic Bayesian Networks.", *Proc. AAAI-98*, AAAI Press.
- [Zweig99] Zweig, G., Russell, S. (1999) "Probabilistic modeling with Bayesian networks for automatic speech recognition", *Australian J. Intell. Inf. Proc. Syst.*, **5**(4), 253-60.