

Ulrik Franke, Ronnie Johansson,
Christian Mårtenson, Pontus Svenson

Fusion av information från heterogena källor

FOI-R--3453--SE

Titel	Fusion av information från heterogena källor
Title	Fusion of information from heterogeneous sources
Rapportnr/Report no	FOI-R--3453--SE
Månad/Month	Juni
Utgivningsår/Year	2012
Antal sidor/Pages	48 p
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	FM
FoT område	Ledning och MSI
Projektnr/Project no	E36701
Godkänd av/Approved by	Lars Höstbeck
Ansvarig avdelning	Informations- och aerosystem

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk. All form av kopiering, översättning eller bearbetning utan medgivande är förbjuden

This work is protected under the Act on Copyright in Literary and Artistic Works (SFS 1960:729). Any form of reproduction, translation or modification without permission is prohibited.

Foto: Reinhold Leitner/Shutterstock

Sammanfattning

För Försvarsmakten innebär dagens konflikter och IT-intensiva miljö hantering av en stor mängd olika informationskällor av vitt skilda typer och ursprung. Den heterogena information som strömmar in har i skiftande grad olika syntaktiskt format, olika terminologi, använder olika sätt för att uttrycka osäkerhet, är olika noggrann med metadata, och är olika pålitlig. Att skapa situationsförståelse ur sådan information är utmanande, samtidigt som belöningen om man lyckas kan vara stor. Heterogena källor är oftast oberoende och bidrar med information som kompletterar varandra, vilket kan skapa mer heltäckande och robusta system. I takt med att sensor- och kommunikationssystem blir kraftfullare och mer allmänt tillgängliga ökar också mängden information som ska hanteras. Detta innebär att datorstöd för fusion av information från heterogena källor blir en viktig komponent i bearbetningssystemet.

Den här rapporten ger en översiktlig introduktion till informationsfusion, för att sedan fördjupa sig i de speciella utmaningar som det innebär att koppla samman och fusionera information från heterogena källor. Dessa utmaningar handlar till stor del om olika aspekter av dataensning: hur man ensar information som beskrivs med olika begreppsapparater och hur man ensar information som använder olika osäkerhetsrepresentationer. Rapporten behandlar också hantering av spårbarhet med hjälp av så kallad härkomst-metadata - en viktig källa när trovärdigheten av ett fusionsresultat ska värderas.

Nyckelord: Informationsfusion, dataensning, osäkerhetshantering, ontologier

Summary

For the Swedish Armed Forces, the nature of current conflicts and today's IT-intensive environment make it necessary to be able to handle a large variety of information sources of different types and origins. This heterogeneous information comes in different syntactic formats, is described using different terminologies, uses different ways to express uncertainty, has different accuracies in the metadata, and is of different reliability. Creating situation awareness from such information is challenging, but potentially rewarding. Heterogeneous sources are usually independent and contribute information that complements each other, which can lead to more comprehensive and robust systems. As sensor and communication technology becomes more powerful and ubiquitous, the amount of information that needs to be handled increases. This entails a need for computer-based tools for fusing information from heterogeneous sources.

This report gives a general introduction to information fusion, and then focuses on the specific challenges involved in linking and merging information from heterogeneous sources. These challenges are to a large extent related to different aspects of data alignment: how to align information described using different conceptualisations and how to align information using different uncertainty representations. The report also discusses the management of provenance information by means of pedigree metadata. Provenance information is a vital component when assessing the confidence in a fusion result.

Keywords: Information fusion, data alignment, uncertainty management, ontologies

Innehållsförteckning

1	Bakgrund	7
2	Introduktion	8
2.1	Exempelscenario	8
2.2	Läsanvisning	13
3	Situationsförståelse och informationsfusion	14
3.1	Situationsförståelse	14
3.2	Fusionsbegreppet	15
3.3	Fusionsmodeller	21
3.4	Utmaningar med fusion	24
4	Semantisk ensning	27
4.1	Kunskapsrepresentation	27
4.2	Två aspekter av semantiska gap	30
4.3	Ontologibaserat ramverk för semantisk interoperabilitet	31
4.4	Common ground för fusion	34
5	Osäkerhetshantering	37
6	Spårbarhet och tilltro	40
7	Sammanfattning och diskussion	43
8	Litteraturförteckning	45

1 Bakgrund

Denna rapport riktar sig till personer inom försvarsmyndigheter och industri med intresse för informationshantering och systemintegration inom underrättelsesdomänen. Syftet är att ge läsaren en förståelse för de fördelar och utmaningar som fusion av information från heterogena källor innebär. Rapporten ger en översiktlig introduktion till begreppen situationsförståelse och informationsfusion, för att sedan fördjupa sig i de speciella utmaningar som det innebär att koppla samman och fusionera information från heterogena källor. Dessa utmaningar handlar till stor del om olika aspekter av *dataensning* (eng. data alignment); hur man ensar information som beskrivs med olika begreppsapparater och hur man ensar information som använder olika osäkerhetsrepresentationer. Rapporten behandlar också hantering av spårbarhet och s.k. härkomst-metadata (eng. pedigree metadata); en viktig källa när trovärdigheten av ett fusionsresultat ska värderas.

FOI har en lång forskningstradition inom området informationsfusion. Den här rapporten är en leverans inom FoT-projektet Verktyg för informationshantering och analys (VIA), men kompetensen inom området har även byggts upp under lång tid inom ett antal relaterade projekt och samarbeten. Värdefull praktisk erfarenhet av fusion av heterogen information har erhållits inom EU-projektet SUPPORT, som utvecklar nya metoder och tekniker för hamnsäkerhet. Under våren 2012 har arbete utförts med att integrera och fusionera data från olika typer av sensorer, administrativa system och underrättelseinformation på ett generiskt sätt med hjälp av s.k. semantiska tekniker. Slutdemonstration är planerad till 2014. FOI deltar också i NATO-forskningsgruppen "Information Filtering and Multi Source Information Fusion", IST 106 / RTG-051. Målet för gruppen är att ta ett konkret steg mot att förena lägre nivåers fusion (målföljning av enskilda objekt) med högre nivåers fusion (situations- och hotanalys), genom att undersöka vilken information som är av intresse att utbyta och hur denna ska struktureras för att kunna hantera heterogena informationskällor. Ytterligare kunskaper kommer från Transferprojektet Semantisk interoperabilitet (SI), där FOI i samarbete med NATO utvecklar ett generellt ramverk för att översätta meddelanden mellan informationssystem som använder olika begreppsapparater. NATO-samarbetet görs inom NATO-forskningsgruppen, "Framework for Semantic Interoperability", IST-094 / RTG-044. Resultaten håller i skrivande stund på att implementeras i en prototypdemonstration som kommer att slutredovisas under hösten 2012.

2 Introduktion

Dagens konflikter ställer stora krav på Försvarsmaktens förmåga att hantera och analysera information. Karaktären i uppdrag och operationsmiljöer blir alltmer komplexa, delvis till följd av ökad internationell samverkan. Samtidigt höjs kraven på precision i utförandet. Ett minsta felsteg kan få stora konsekvenser, inte enbart för den enskilde soldaten utan även på politisk nivå. Vikten av korrekta underrättelser för att möta dessa utmaningar går knappast att underskatta. En förutsättning för korrekta underrättelser är ett bra informationsunderlag. Volymen av egenproducerad data ökar, både på grund av ökad prestanda hos avancerade sensor- och plattformssystem och på grund av ökad tillgång till enklare spaningsutrustning såsom GPS:er och digitalkameror. Av samma orsaker ökar datatillgången hos FM:s allierade. Även media, icke-statliga organisationer (NGO:er) och allmänhet har ökad tillgång till sensorer i form av vardagsteknik såsom smartphones, och gör i ökad utsträckning sin information tillgänglig via internet.

I centrum av all denna information sitter underrättelseanalytikern med uppdrag att skapa situationsförståelse för att kunna bistå beslutsfattare med kvalitativt beslutsunderlag. Utmaningarna är många, men den mest uppenbara är hur man ska mäta med att bearbeta all information. Här kommer datorstöd naturligt in i bilden. Datorns styrka är att oförtröttligt göra noggranna beräkningar på massiva datamängder, vilket redan utnyttjas vid signalbehandling och fusion i många sensorsystem. Begränsningen ligger i datorns absoluta krav på en väldefinierad uppgift. I de fall information är *homogen*, d.v.s. kommer från en ensam sensor, från sensorer av samma typ, eller följer en gemensam standard, är detta inte ett avgörande problem. I situationer som den som beskrivits ovan däremot, med en stor mängd olika informationskällor av vitt skilda typer och ursprung, blir det en viktig begränsande faktor. Den *heterogena information* som då strömmar in har i skiftande grad olika syntaktiskt format, olika terminologi, använder olika sätt för att uttrycka osäkerhet, är olika noggrann med metadata, och är olika pålitlig. Att väga samman information genom fusion under sådana förhållanden är utmanande, men belöningen kan vara stor. Heterogena källor är oftast oberoende och bidrar med information som kompletterar varandra, vilket skapar ett mer heltäckande och robustare system. Det är därför önskvärt att hitta effektiva metoder för att fusion av information från heterogena källor.

2.1 Exempelscenario

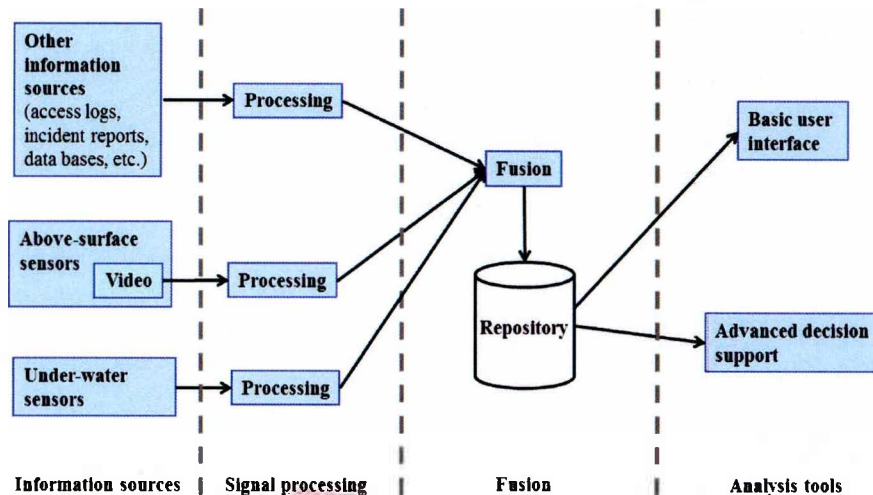
För att illustrera utmaningarna med fusion av information från heterogena källor målar vi upp ett scenario inom hamnsäkerhetsdomänen. Anta att FM får ansvaret för säkerheten i och kring en hamn kallad Hamn H. Hamn H omfattar tre kajer, en för passagerartrafik och två för containertrafik. För att skydda verksamheten

delas hamnområdet in i olika zoner som är fysiskt avgränsade med stängsel och där tillträdestillstånd krävs. Ett antal sensorer finns redan utplacerade på området för att underlätta bevakningen. Dessa består av ett antal videokameror utplacerade på respektive kaj samt vid hamnens in- och utfarter/-gångar. För att detektera eventuella inkräktare från havet installeras ytterligare ett antal videosensorer och en radar som spejar över hamninloppet, samt ett undervattens-sensorsystem som kan detektera dykare och undervattensfarkoster.

För att inte exempelscenariot ska växa sig för stort begränsar vi oss till att studera uppgiften att i realtid upptäcka och slå larm om hot mot fartyg och terminalbyggnader. Målet är att med hjälp av de sensorresurser vi förfogar över, sätta upp ett system som hjälper en operatör att skapa och bibehålla situationsförståelse över skeendena i hamnen. Detta inkluderar att då är möjligt bistå med automatiska larm för att rikta operatörens uppmärksamhet till potentiellt farliga situationer.

En viktig aspekt vid design av ett övervakningssystem som det i Hamn H är att sensorsystemen generellt sett skapar mer data än en ensam operatör klarar att hantera. Utöver ren sensordata tillkommer dessutom en stor mängd information från andra typer av system. Detta kan röra sig om loggar från tillträdesövervakningssystem, AIS¹-data, administrativ data om fartyg, information om laster och passagerare, information från tullen, väderinformation och underrättelser från både öppna och slutna källor. För att stödja operatören vid hanteringen av all denna information behöver först och främst samtliga källor kopplas samman i ett gemensamt informationssystem. Därutöver behöver en viss maskinintelligens byggas in för att automatiskt kunna utföra informationsbehandling av rutinemässig karaktär. Denna automatisering består främst av signalbehandling av olika typer av sensordata, t.ex. algoritmer som automatiskt kan detektera avvikande beteende hos personer eller fordon i videoströmmar. För att uppnå högre kvalitet på informationsbehandlingen och ett robustare system, mindre känsligt för störningar och med färre falsklarm, bör också information från olika källor fusioneras. Detta görs i ett eller flera lager av fusionstjänster, vilka matar sina resultat till ett beslutsstödssystem som är själva gränsytan mot operatören.

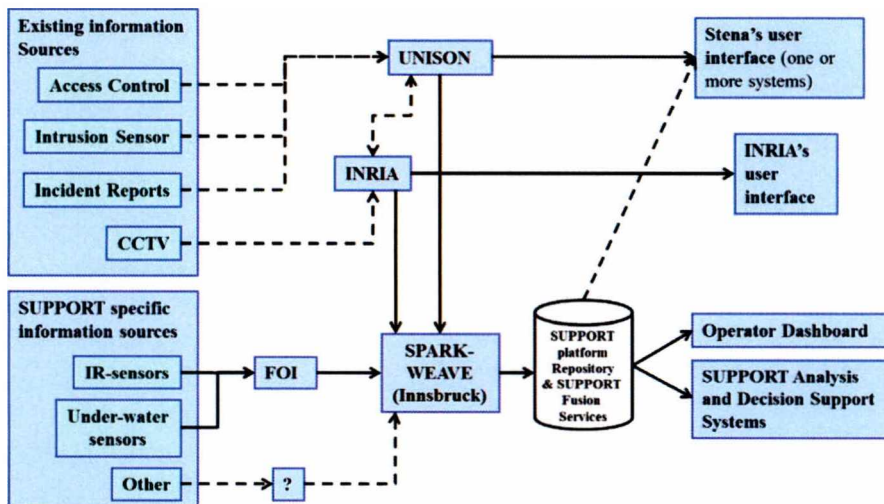
¹ AIS = Automatic Identification System, som används för att identifiera alla större fartyg. Se www.marinetraffic.com/ais/.



Figur 1. Principskiss över hur sensorer och andra informationskällor i en hamn kan kopplas ihop, fusioneras och ge underlag för beslutsstöd.

Figur 1 ovan visar en principskiss över hur olika informationskällor kan kopplas ihop med fusionssystem som ger underlag för beslutsstödssystem. I Figur 2 nedan visas en något mer detaljerad design av hur flera olika informationskällor och bearbetningssystem kopplas ihop inom EU-projektet SUPPORT, för att illustrera hur ett övervakningssystem för hamnsäkerhet kan konstrueras.

Det är inte särskilt svårt att föreställa sig nyttan av att konstruera ett system som integrerar flera källor av olika typ. Det är heller inte särskilt svårt att rita upp en schematisk bild som den ovan, men när man gräver under ytan uppenbarar sig ett flertal svårigheter. Följande händelsebeskrivning belyser tre centrala problemområden vid fusion av heterogen information: semantisk interoperabilitet, osäkerhetshantering och spårbarhet.



Figur 2. Mer detaljerad designskiss över hur olika informationskällor och system kan kopplas ihop i ett övervakningssystem för en hamn (bilden lånat från EU-projektet SUPPORT). Tack vare användningen av semantiska tekniker och en gemensam informationsmodell kan sensorer och andra källor från de olika konsortiemedlemmarna användas ihop.

En viktig uppgift för att skapa en lägesförståelse över situationen i och utanför hamnen är att hålla reda på vilka fartyg som är i området och vad de har för sig. Anta att det är begränsad sikt på grund av mörker och dåligt väder. För att identifiera och positionera fartyg är då videokamerorna av begränsad nytta, och vi är istället hänvisade till att lita på radar och undervattenssensorer. Radarn i hamnen är bra på att positionera mål som rör sig och kan också avslöja något om storleken på målet. Undervattenssensorerna kan bara ge en grov uppskattning av position men kan också klassificera fartyg utifrån motorljud. Genom att fusionera information från radarn och undervattenssensorer finns potential att förbättra positionsuppskattning och klassificering. Sensorerna är av olika typ och utgör exempel på heterogena källor där informationen oftast är representerad på olika sätt. Innan sammanvägning av heterogen information kan göras måste informationen ensas så att den blir jämförbar.

Det första steget i ensningen är att få informationen på samma syntaktiska format, så att man kan utläsa de olika informationselementen och deras relationer ur de data som skickas från respektive sensor. Från radardata vill man till exempel kunna extrahera mätdata bestående av två tal (bäring och avstånd), samt ett tal för målstorleken i form av en uppskattad radarmålyta. Den typ av databehandling som krävs för att utläsa denna information är som regel

rutinmässig. Ett enkelt och vanligt sätt att kommunicera data med standardiserad och flexibel syntax är att använda XML².

Ett mer utmanande problem är att tolka innebörden av de data som extraherats och överföra den till en representation där innebörden av information från heterogena källor är jämförbara. Säg att UV-sensorsystemet precis som radarn ger ifrån sig måldata i form av en position bestämd av två tal, men att dessa istället för bäring och avstånd representerar absolut position i longitud och latitud. För att fusionera positionerna från radarn och UV-sensorn måste dessa tal först ensas. Detta kan göras genom en koordinattransformation av ettdera systemets koordinater till det andra, alternativt av båda systemens koordinater till ett gemensamt tredje koordinatsystem. Därefter kan sammanvägningen utföras, exempelvis genom att ta medelvärdet av talen i det valda koordinatsystemet.

Den typ av interoperabilitet som uppnås när innebörden av information bevaras vid översättning mellan system kallas *semantisk interoperabilitet* och är en grundförutsättning för fusion av heterogen information.

Syftet med koordinattransformationen var att kunna göra en bättre positionsbestämning genom att väga samman data från två oberoende källor. Information kring ett objekts position, hastighet och acceleration kallas *kinematisk information*. Översättning av kinematisk information från ett system till ett annat är i regel ganska enkelt och kan som i exemplet ofta lösas med en koordinattransformation. Om vi istället vill väga samman information i syftet att klassificera eller identifiera ett objekt, behöver vi istället jämföra olika typer av särdrag, så kallad *attributinformation*. Attributinformation kan vara nästan vad som helst som beskriver ett objekt eller en situation: färgen på en bil, personnummer och skostorlek hos en person, eller antalet personer med röda plakat i en demonstration.

En speciell sorts attributinformation handlar om osäkerheten eller onoggrannheten i data. Alla mätningar som görs är behäftade med osäkerheter. För t.ex. en hastighetsmätare kan osäkerheten modelleras genom en sannolikhetstetsfördelning över hastigheten som kommer vara centrerad kring det värde mätaren visar. För en klassificering av en radarsignatur finns det en osäkerhet i vilken typ av farkost som egentligen observerades. Det finns en mängd olika sätt att representera osäkerhet på och som passar olika bra för olika ändamål.

För att möjliggöra kontroll av fusionsresultaten och undvika det s.k. dubbelräknings- eller dataincestproblemet är det viktigt att ha spårbarhet i all information. Dubbelräkning uppstår då man har tilltro till en utsaga eftersom den bekräftas av två källor som i själva verket är beroende – d.v.s. det finns i själva

² Extensible Markup Language, <http://www.w3.org/XML/>

verket bara en källa. För att undvika detta är det viktigt att lagra spårbarhetsinformation i all data.

Vi har ovan och i resten av rapporten valt att framförallt exemplifiera med hamnsäkerhetsproblematik. Fusion av heterogen data är dock ett mycket relevant problem även inom andra områden. Hamnsäkerhetsexemplen kan enkelt översättas till det allmännare problemet att övervaka en anläggning. För en flygförare är det viktigt att kunna fusionera information från radarer med t.ex. underrättelserapporter om vilka fientliga flygförband som kan förväntas finnas i området och vilka förmågor dessa har. Samma problem finns för flygstridsledning, men i större skala. För ledning av andra typer av förband finns det också ett behov av att sammanställa information från heterogena källor till relevant, uppdaterad och gemensam lägesinformation.

2.2 Läsanvisning

Återstoden av den här rapporten är strukturerad som följer. Kapitel 3 ger en översiktlig introduktion till begreppen situationsförståelse och informationsfusion. Därefter följer ett antal kapitel som beskriver olika utmaningar som är specifikt kopplade till fusion av heterogen information. Kapitel 4 ger en inblick i hur man kan ensa information som ska fusioneras och som beskrivs med olika begreppsapparater, och kapitel 5 ger en introduktion till olika typer av osäkerhetsrepresentationer. Spårbarhetsinformation en viktig källa när trovärdigheten av fusionsresultat ska bedömas och kapitel 6 diskuterar hur detta kan hanteras med hjälp av härkomstmetadata. Rapporten avslutas med en sammanfattning och diskussion i kapitel 7.

3 Situationsförståelse och informationsfusion

Införandet av tekniker för informationsfusion är inte ett självändamål utan ett verktyg för att förbättra ett systems möjlighet att stödja en beslutsfattare genom att nyttiggöra information från ett flertal olika källor. Informationsfusion kan inte ses som ett självständigt ämne utan samlar metoder för kombination av information exempelvis signalbehandling, reglerteknik, statistisk slutledning, och artificiell intelligens. Till informationsfusionsområdet brukar dessutom räknas stödfunktioner som behövs för att man ska kunna sätta fusionslösningar i drift på ett effektivt sätt, exempelvis förbearbetning av insamlad data, inhämtningsstyrning, och presentation av fusionsresultat för beslutsfattare.

I detta kapitel går vi igenom grunderna i informationsfusion. Efter en kort introduktion till begreppet situationsförståelse går vi igenom fusionsbegreppet och visar med exempel på nyttan av fusion för att stödja situationsförståelse. Det finns en stor uppsättning fusionsmodeller, och i sektion 3.3 introducerar vi några av dessa. Slutligen beskriver vi några av utmaningarna inom fusionsområdet.

3.1 Situationsförståelse

Situationsförståelse (*eng.* situation awareness) brukar definieras som förmågan att uppfatta omgivningens beståndsdelar, förstå deras betydelse och förutse hur de förändras då någon oberoende variabel (t.ex. tiden) ändras³. Situationsförståelse kan inte skapas enbart genom datorbearbetning av information, utan är ett kognitivt tillstånd som uppstår hos människan. Datorbaserade stödverktyg för att underhålla och presentera insamlad och behandlad lägesinformation kan dock bidra till att öka människans situationsförståelse. Informationsfusion är en viktig komponent i sådana verktyg.

Definitionen av situationsförståelse innehåller andra begrepp som i sin tur behöver definieras. Vad som är den relevanta omgivningen skiljer sig beroende på användningssituation. För en bilförare består omgivningen av den närmaste trafiken, för en plutonchef kan det vara närliggande terräng, medan det för en underrättelseanalytiker kan vara allt som har att göra med ett visst land som utgör omgivningen. Det är viktigt att inte låta användningen av begreppet omgivning förleda tanken till att situationsförståelse enbart handlar om fysiska objekt. Som

³ Eng. "the perception of environmental elements with respect to time and/or space, the comprehension of their meaning, and the projection of their status after some variable has changed, such as time"

underrättelseexemplet antyder så kan omgivningen lika gärna bestå av mer abstrakta företeelser.

Karaktären hos beståndsdelarna bestäms naturligtvis av vilken omgivningen är. För en flygförare är det övriga flygplan samt mål och luftvärn på marken som är de viktiga beståndsdelarna. För underrättelseanalytikern är det å andra sidan t.ex. de aktörer som är verksamma i en region tillsammans med deras mål och agendor som är beståndsdelarna i omgivningen. På så sätt skiljer sig också betydelsen av beståndsdelarna beroende på situation.

Den beroende variabeln som ändras är nästan alltid tiden, direkt eller indirekt. I begreppet situationsförståelse ingår också att kunna göra enkla "what if"-analyser, för att t.ex. förstå vad som skulle hända om förhållandena mellan några av beståndsdelarna i omgivningen ändras.

Att mäta situationsförståelse är ett separat forskningsproblem inom vilket det finns en hel del litteratur [1]. Oftast använder man någon form av enkät som beslutsfattare får svara på. Enkäterna granskas sedan av experter och en jämförelse med en ideal situationsförståelse görs. För att utvärdera om ett verktyg (analogt eller datorbaserat) hjälpt till att öka beslutsfattarens situationsförståelse måste en jämförelse mellan två fall göras. Det är oftast inte meningsfullt att prata om fullständig situationsförståelse, utan det är i de flesta praktiska fall alltid en fråga om att ha mer eller mindre förståelse för situationen.

3.2 Fusionsbegreppet

Precis som situationsförståelse är fusion ett begrepp som behöver definieras. Till skillnad från situationsförståelse används ordet på olika sätt i vardagsspråk för att beskriva sammanslagning av olika slag. I näringslivet betyder det normalt en process där två eller flera företag slås samman till ett, varigenom totala kostnader för exempelvis personal och lager kan minskas. Inom fysik handlar fusionsprocessen om att lättare atomkärnor slås samman till tyngre, varvid energi frigörs. Detta är en del av vår sols funktion men något som ännu inte finns återskapat i något kraftverk.

Närmare relaterat till det tekniska fusionsbegrepp som avhandlas i den här rapporten är biologisk fusion. Vi människor använder våra sinnen för att skapa en förståelse för situationen i den omgivning där vi befinner oss. Genom att exempelvis använda båda våra öron kan vi få en uppfattning om riktningen till en ljudkälla och genom våra två ögon kan vi få en känsla av avstånd. Forskning på ormar, vilkas hjärnor är lättare att studera än den mänskliga, indikerar hur den biologiska hjärnan kan fusionera sinnesintryck. Man har till exempel funnit att vissa av skallerormens neuroner reagerar på heterogen information i form av visuell och infraröd stimulans och man tror att ormen kan använda denna förmåga för att skilja mellan olika byten. Den biologiska fusionen kan tveklöst

tjäna som inspirationskälla för design av konstgjorda system [2]. Dasarathy presenterar biologisk fusion som:

"Perhaps the best, all-encompassing fusion paradigm conceivable for information processing in a multisensor environment is the human brain. It typically fuses five different types of signals (sight, hearing, smell, taste and touch) received from the five basic human sensors (eyes, ears, nose, tongue and skin) and comes up with nearly optimal decision in real time. Emulation of this paradigm from nature remains an elusive goal of researchers from a variety of fields including multisensor-based processor design." [3]

Naturen tjänar alltså som en stor inspirationskälla, men dess prestanda är svår att uppnå.

Den tekniska form av fusion som vi behandlar i den här rapporten rör inte atomer eller företag utan information. I förekommande fall talar man också om fusion av data. I den här rapporten gör vi dock ingen distinktion mellan begreppen data och information. Syftet är normalt att med hjälp av flera informationskällor skapa en så korrekt uppfattning om det som sker i världen som möjligt. Ett enkelt sätt att betrakta informationsfusion är som ett optimeringsförfarande med syfte att hitta den världsbeskrivning som bäst stämmer in med data från informationskällorna. Behovet av fusionstekniker har uppstått inom olika vetenskapsområden, exempelvis biometri [4], datorseende [5], maskininlärning [6], robotik [7] och försvar [8]. Ofta är tillämpningarna system som måste förlita sig på kontinuerliga flöden av realtids-observationer av en dynamisk och bara delvis observerbar omgivning.

3.2.1 Enkla exempel på homogen och heterogen fusion

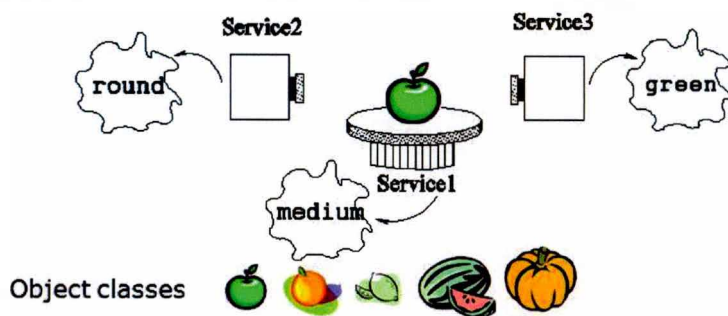
För att illustrera nyttan med att fusionera information börjar vi med att betrakta ett leksaksexempel där vi vill bestämma vikten av olika föremål. Vi har för detta tillgång till två vågar. Varje våg har ett *måtfel* som är karaktäristiskt för just den vågen. Detta kan modelleras matematiskt som att den uppmätta vikten är den rätta vikten hos föremålet plus ett slumpmässigt fel draget från t.ex. en normalfördelning. Genom kalibrering av vågen kan vi beskriva mätfelet statistiskt. Anta att mätfelen för de två vågarna kan beskrivas som en standardavvikelse på 1 respektive 2. Detta betyder alltså att om vi väger föremålet på vågen så är mätvärdet normalfördelat med standardavvikelse 1 respektive 2.

Vi är nu nyfikna på om vi kan förbättra uppskattningen av ett föremåls vikt genom att fusionera de två mätresultaten. En enkel uträkning visar att om vi tar medelvärdet av de två mätningarna så får vi en standardavvikelse på 1,1. Vi har alltså fått *ökad* osäkerhet i resultatet genom att fusionera!

Hittills kan detta exempel alltså användas som ett argument *mot* fusion. Är det alltid bäst att använda den bästa (minst osäkra) sensorn för att göra en mätning? Svaret på denna fråga är nej. Om vi istället för medelvärde bildar ett viktat medelvärde, där vi sätter vikten 0,8 på vågen med standardavvikelse 1 och 0,2 på den andra, så kommer fusionsresultatet att ha en standardavvikelse på 0,89.

Detta exempel visar att det inte är nog att bara lägga samman mätvärden, man måste göra det på ett väl valt sätt. Efter detta enkla exempel på fusion av homogen data går vi nu över till ett exempel på fusion av information från heterogena källor.

I Figur 3 visas ett hypotetiskt system för automatisk igenkänning av frukt. Frukten anländer till systemet på ett löpande band och sorteras vidare baserat på systemets bedömning av vilken typ av frukt det rör sig om. De tre heterogena informationskällorna i systemet kan avgöra fruktens form och färg med hjälp av kamerabilder och vikt med hjälp av en våg.



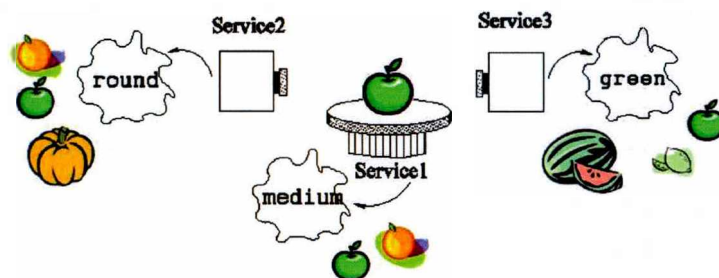
Figur 3. Ett enkelt fusionsexempel som handlar om att klassificera en frukt. Tre olika informationskällor (två kamerasensorer och en våg) ger tre olika typer av information. Systemet ska kunna skilja på fem olika typer av frukter: äpple, apelsin, lime, melon och pumpa.

I exemplet stämmer färgen "green" in på äpple, lime och melon; formen "round" stämmer in på äpple, apelsin; och slutligen stämmer vikten "medium" in på både äpple och apelsin. Följaktligen kan ingen av sensorerna på egen hand avgöra vilken frukt det rör sig om.

Ett enkelt sätt att fusionera utdata från de olika sensorerna skulle kunna vara att se vilka frukter som mätningarna stämmer in på och sedan välja den frukt (förhoppningsvis bara en) som samtliga mätningar stämmer överens med, d.v.s. äpple.

Figur 4 visar mätningarna uttryckta i passande frukter samt resultatet av att fusionera dessa delresultat. Trots att exemplet är tillrättalagt så tjänar det till att illustrera en generell fusionsprocess med ett antal olika sensorer, där ingen av de

självständigt kan ge ett entydigt svar. I det aktuella systemet är det troligt att man ibland kan få flera frukter som svar, ifall sensorerna inte är tillräckligt känsliga, eller ingen frukt alls, ifall mätningen störts på något sätt.



Figur 4. En enkel fusionsmetod baserat på *snittet* av de tre sensorernas bedömningar. I det här fallet är det bara en typ av frukt som alla mätningarna stämmer in på: det gröna äpplet.

Målet i vårt tidigare hamnsäkerhetsexempel kan på liknande sätt som med fruktklassificeringen vara att klassificera olika typer av fartyg som anlöper hamnen. Olika källor som undervattenssensorer och kameror över vattnet kan bidra med förslag på klassificeringar som fusioneras.

3.2.2 En definition

Informationsfusionsområdet är fortfarande förhållandevis nytt, samtidigt som resultat inom området har upptäckts inom ett antal olika tillämpningsområden. Därför har olika begreppsbildningar för fusionsområdet dykt upp. En enkel definition, som inte är för anpassad till ett visst tillämpningsområde, är följande:

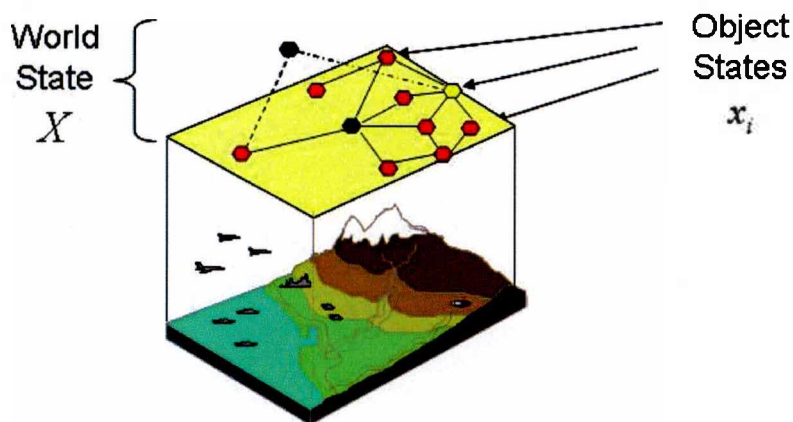
"Informationsfusion handlar om att nyttja flera informationselement (ex.vis data som sensormätningar och underrättelserapporter) för att skaffa en bättre förståelse eller skattning av en uppdragsrelevant omgivning." [9]

Några av orden i definitionen förtjänar en närmare förklaring. Fusionsprocessen arbetar med *flera informationselement*. Ibland handlar det om mätningar från en och samma sensor vid olika mättillfällen, men oftare handlar det om data från flera olika sensorer vid samma eller olika tidpunkter och ibland, som när vi talar om fusion av heterogen information, från sensorer och datagenereringsprocesser av olika typ.

Att erhålla en *bättre förståelse* av det man observerar kan t.ex. betyda att kunna använda flera attribut för att beskriva dess egenskaper eller att minska osäkerheten om vad attributen har för värden.

I vissa tillämpningar av fusionslösningar är det ett automatiskt system som ska få en bättre "förståelse" eller beslutsunderlag som i fruktigenkänningsfallet ovan, i andra fall kan det vara en mänsklig beslutsfattare som ska stödjas. Både ett automatiskt system och en mänsklig beslutsfattare har nytta av att mängder av information från olika källor sammanfattas i en "bästa" uppskattning av situationen. En relaterad förbättring är också att man genom fusion normalt reducerar den totala mängden information som behöver hanteras, då överflödiga ursprungsinformation kan kasseras.

Allting som kan observeras i världen är normalt inte av intresse. Den del av världen som är av vikt för beslutsfattaren kallar vi den *uppdragsrelevanta omgivningen*. I Figur 5 nedan illustreras en del av verkligheten med fordon och terräng, men endast en del av informationen är relevant för beslutsfattaren. Det som är relevant är i det här fallet fordon och deras relationer, vilket illustreras som fusionssystemets interna lägesinformation i den övre delen av bilden. Observera att relationerna, exempelvis koordinering via radiokontakt eller rörelser, inte är direkt skönjbara utan måste uppskattas med hjälp av flera observationer över tid.



Figur 5. Den nedre delen av bilden visar en verklig värld i en militär operation omfattandes bland annat terräng och fordon. Den övre delen visar en intern systembeskrivning av den uppdragsrelevanta omgivningen. Bilden är lånad från [10].

3.2.3 Varianter av fusion

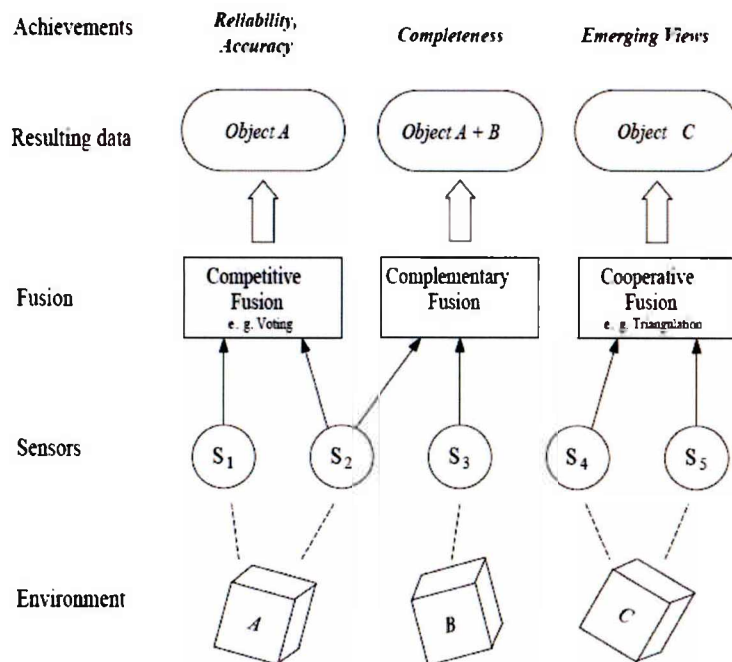
Figur 6 visar tre olika sätt som informationskällor kan stödja varandra genom fusion [11].

- Kompletterande – fusion av data som rör olika egenskaper eller företeelser i omgivningen som tillsammans skapar en helhet eller en mer

komplett förståelse, d.v.s. färre egenskaper hos miljön förblir okända. Ibland ifrågasätts det om detta verkligen är ett exempel på fusion, då information inte samspelar på något vis utan varje data läggs in i systemet utan att påverkas av andra data. Ett exempel på kompletterande *homogen* fusion är när två objekt extraherade från bildsekvenser från två kameror (utan överlappande synfält) upptäcks och presenteras i samma lägesbild. Kompletterande *heterogen* fusion kan förstås resultera i en rikare lägesuppfattning då olika typer av sensorer (med olika förmågor) kan nyttjas.

- Konkurrerande – fusion av data som rör samma egenskap i omgivningen. Med hjälp av olika mätningar av samma egenskap kan man ofta minska osäkerheten kring egenskapens egentliga tillstånd. Informationen behöver inte vara av samma typ; fruktklassificerings-systemet ovan är ett exempel på konkurrerande fusion: varje sensorsystem, vare sig det är kamera- eller vågbaserat, uttalar sig om fruktens klass, d.v.s. konkurrerar i en omröstning vilken klass som är den rätta. Ett homogent exempel från hamnsäkerhetsscenarioet är när man beräknar medelvärdet av flera avståndsmätningar till ett fartyg för att minska osäkerheten i skattningen av avståndet.
- Samarbetande – informationen som fusioneras kan användas för att skapa ny typ av information, som inte kunde erhållas med enbart en informationskälla. Man får som resultat en mer förfinad förståelse för omgivningen. Exempelvis kan två kameror med olika position och orientering ta var sin tvådimensionell bild, men tillsammans kan de skapa en tredimensionell beskrivning av omgivningen. Ett heterogent exempel från hamnsäkerhetsscenarioet kan vara att man baserat på mottagen AIS information om exempelvis last och uppmätt information om position och hastighet vill upptäcka ifall ett fartyg verkar anlöpa avsedd avlastnings- eller serviceplats i hamnen.

De tre olika sätten är inte ömsesidigt uteslutande utan flera sätt kan finnas i samma system.



Figur 6. En illustration som visar tre olika sätt som information kan fusioneras: kompletterande, konkurrerande och samarbetande (*eng.* complementary, competitive resp. cooperative). Bilden är hämtad från [11] med tillstånd från Wilfried Elmenreich.

3.3 Fusionsmodeller

Det finns ett antal modeller för att beskriva informationsfusionsprocessen. De beskriver olika aspekter av fusionsområdet, lyfter upp delbegrepp och visar på deras relationer. Här presenterar vi tre modeller: JDL-modellen som beskriver olika nivåer av informationstyper och återkoppling, den generiska fusionsnoden som är ett sätt att bryta ner en komplex fusionsprocess i mindre delar, och slutligen en modell som fokuserar på att klassificera fusionsprocesser beroende på deras in- och utdata.

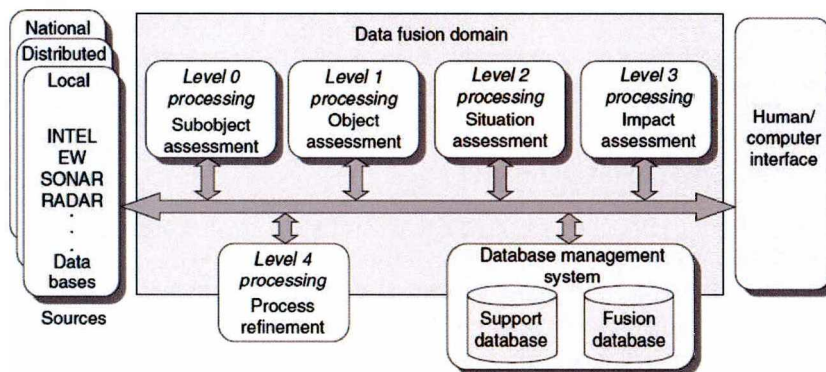
3.3.1 JDL

Den så kallade JDL-modellen togs fram i en första version 1985 av en grupp som kallas U.S. Joint Directors of Laboratories (JDL) Data Fusion Group och är kanske den mest kända fusionsmodellen. Den syftar till att beskriva olika funktioner hos en fusionsprocess och erbjuda ett ramverk för diskussioner kring fusionsproblem och -lösningar. JDL-modellens upphovsmän brukar understryka

att den inte ska ses som en anvisning om hur ett fusionssystem ska designas och implementeras. Det är däremot den efterföljande modellen, den generiska fusionsnoden, ett exempel på.

JDL-modellen, illustrerad i Figur 7, delas upp i ett antal nivåer, nivå 0 till och med 4 [12].

- Nivå 0: signal- och särdragsvärdering. Signaler och särdrag kan ses som mönster som extraheras från mätningar.
- Nivå 1: entitetsvärdering. Skattning av egenskaper hos entiteter i omgivning, exempelvis fordon eller individer.
- Nivå 2: situationsvärdering. Skattning av strukturer/mönster i en del av omgivningen (exempelvis relationer mellan entiteter).
- Nivå 3: konsekvensvärdering. Skattning av nytta/kostnad för signal-, entitets- och situationstillstånd.
- Nivå 4: processvärdering. Fusionssystemets egen bedömning av dess prestanda. Det involverar bland annat justeringar av fusionsprocesserna i de övriga nivåerna samt styrning av informationskällor där så är möjligt.



Figur 7. Den så kallade JDL-modellen för informationsfusion. Bilden är hämtad från [12] med tillåtelse av Alan Steinberg

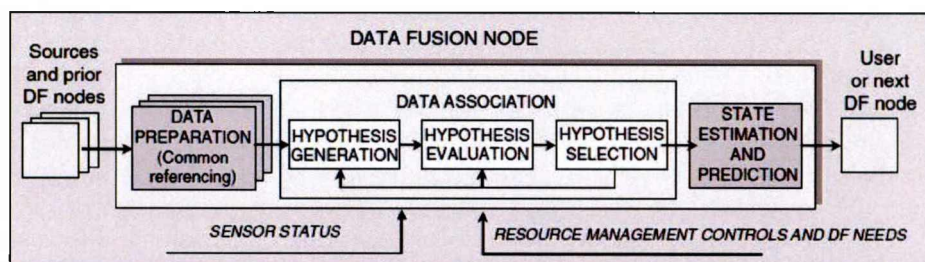
I vissa versioner av JDL-modellen finns även en nivå 5 som symboliserar beslutsfattarens relation till och del av fusionsprocessen.

Den nära kopplingen mellan informationsfusion och situationsförståelse syns tydligt genom att jämföra med definitionen på situationsförståelse: *att uppfatta omgivningens beståndsdelar, förstå deras betydelse och förutse hur de förändras då någon oberoende variabel ändras. Att uppfatta omgivningens beståndsdelar*

kan jämföras med nivå 1-fusion, d.v.s. att förstå mer om de objekt som finns genom att kombinera all tillgänglig information om dem. Att *förstå betydelsen* av beståndsdelarna är som JDL nivå 2, i det att betydelsen oftast ges av att upptäcka relationerna mellan de olika beståndsdelarna i omgivningen. Slutligen så handlar nivå 3 i JDL-modellen just om att förutsäga hur situationen ska utvecklas i framtiden.

3.3.2 Generisk fusionsnod

Ett förslag på hur man designar och bygger fusionssystem är DF&RM-arkitekturen [13], där DF&RM står för *data fusion and resource management*. I DF&RM bryts fusionsprocessen ner i ett trädformat nätverk av sammanlänkade generiska fusionsnoder, där varje nod har vissa grundläggande funktioner, se Figur 8.



Figur 8. Den generiska fusionsnoden med de tre generella funktionerna förberedelse, association och entitetsskattning (*eng.* data preparation, data association resp. state estimation). Bilden är hämtad från [13] med tillåtelse av Alan Steinberg.

Enligt DF&RM-arkitekturen består alla fusionsprocesser av tre grundläggande funktioner: förberedelse, association och entitetsskattning. Hur funktionerna implementeras och vilken information som flödar genom dem skiljer sig dock från nod till nod.

Den första funktionen, dataförberedelse, tar indata från informationskällor eller andra fusionsnoder och har i uppdrag att lägga grunden för nästkommande funktioner genom att ensa format, semantiska beskrivningar och osäkerhetsformalismer. Dataförberedelsefunktionen är extra viktig vid fusion av information från heterogena källor.

Den andra funktionen är associationsproblemet, som här bryts ner i tre delfunktioner:

- Hypotesgenerering – möjliga associationer mellan nya observationer och befintliga entiteter i lägesinformationen tas fram.

- Hypotesutvärdering – de framtagna förslagen på associationer rangordnas med avseende på något mått.
- Hypotesval – avgör vilka associationer som bör behållas och användas för fusion för att uppdatera lägesinformationen.

Den tredje funktionen är entitetsskattning som handlar om att uppdatera den del av lägesinformationen som noden har ansvar för och göra den tillgänglig för andra fusionsnoder. Ett exempel på detta är att bestämma position och positionsosäkerhet för en viss entitet.

3.3.3 In- och utdataklassificering

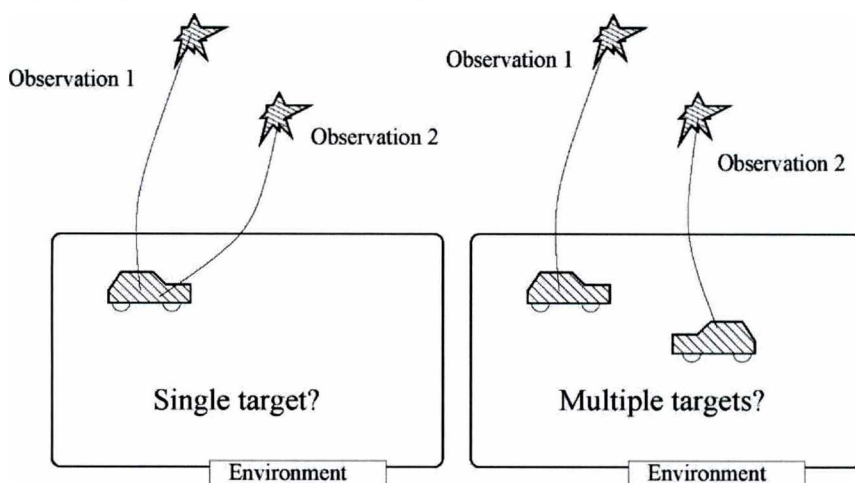
En del fusionsmodeller fokuserar på vilken typ av in- och utdata som en fusionsprocess hanterar [14, 2]. Typiska kategorier är signal/data, särdrag/attribut (*eng. features*), och symbol/beslut (*eng. decision*). Signal/data-nivån innebär att fusion görs direkt på rådata från olika källor, och en vanlig fusionsmetod är medelvärdesbildning. På särdrag/attribut-nivån fusioneras extraherade egenskaper, exempelvis färg eller form av en entitet. På beslutsnivån fusioneras exempelvis klassificeringar av entiteter. I fruktklassificerings-exemplet extraheras särdrag från bilder och väg, men fusionen görs inte på särdragsnivå utan på beslutsnivå, d.v.s. vi jämför färdiga klassificeringar av frukterna och inte frukternas egenskaper. I jämförelse med diskussionen om generiska fusionsnoder ovan så kan en nod som utför fusion på signalnivå med syftet att hitta särdrag vara kopplad till en nod som hanterar särdrag som indata. För fusion av information från heterogena källor passar ofta särdragsfusion eller symbolfusion bäst. Mer bearbetad information är nämligen ofta på en högre abstraktionsnivå, vilket gör den mer generell och därför lättare att översätta mellan olika representationer.

3.4 Utmaningar med fusion

Informationsfusion innebär möjligheter att skapa bättre lägesinformations och situationsförståelse, men med fusionsmetoderna följer också en del utmaningar: informationen som ska fusioneras måste vara ensad för att kunna *associeras*, *informationskonflikter* måste kunna lösas och i vissa fall, när informationskällor kan styras, måste informationskällorna *koordineras*.

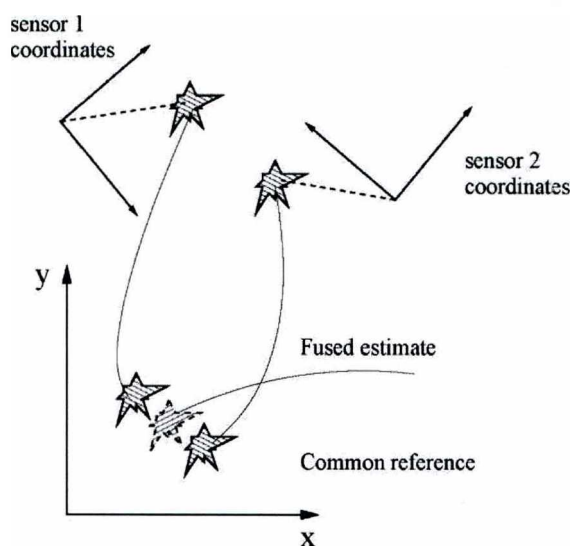
Som framgår av modellen för den generiska fusionsnoden är associering ett centralt steg i fusionsprocessen. Figur 9 ger ett exempel. Till vänster i figuren kan de två sensorobservationerna associeras då de härrör från samma objekt, medan observationerna i det högra fallet härrör från två olika objekt och alltså inte kan användas för att skaffa en bättre förståelse för ettdera objektet. Däremot

är kompletterande fusion möjlig då information om de båda bilarna kan föras till lägesinformationen oberoende av varandra.



Figur 9. I den vänstra bilden görs två observationer av samma objekt i omgivningen. Konkurrerande eller samarbetande fusion är då möjliga. I den högra bilden görs två observationer av två olika objekt. Endast kompletterande fusion är möjlig.

Även om två informationselement hör ihop så kan det ändå finnas hinder för att automatiskt associera dem. Om båda informationselementen rör avståndsmätningar och den ena är uttryckt i enheten meter och den andra uttryckt i enheten fot så måste de ensas genom att en av dem transformeras till den andras enhet innan de kan associeras. Ett annat exempel på behov av ensning visas i Figur 10. Här har två positionsobservationer gjorts av sensorer placerade på olika platser och orienterade i olika riktningar. Men positionsobservationerna är uttryckta i förhållande till den sensor som har gjort observationen och det finns alltså ett behov av att sammanföra de till en gemensam referensram. Mätningar görs dessutom i allmänhet inte vid exakt samma tillfälle och behov finns att ensa data som inhämtats vid olika tillfällen. Som vi kommer att se i följande kapitel, är det inte enbart kinematiska aspekter som tid och rum som behöver ensas för att möjliggöra fusion, utan även semantisk attributinformation och olika osäkerhetsrepresentationer.



Figur 10. Två observationer av två olika sensorer representeras relativt respektive sensor. För att kunna associera och fusionera värdena måste de överföras till ett gemensamt koordinatsystem.

Ett fusionssystem har ofta tillgång till flera informationskällor och i förekommande fall kan de störa varandra om man inte hanterar de på ett välplanerat *koordinerat* sätt. Det kan exempelvis handla om kamerautrustade mobila robotar som riskerar att skymma varandra eller sonarsensorer som bara får vara aktiva en åt gången. Koordinering innebär tvåvägskommunikation och även här blir ensning av semantik och osäkerhetsrepresentationer viktig för att garantera att informationen uppfattas korrekt av motparten.

Informationselement som ska fusioneras kan slutligen vara motstridiga. Detta kan bero på mätstörningar, otillräckliga sensormodeller, eller trasiga sensorer. Fusionsprocessen måste kunna hantera detta. I vissa fall kan en källas påverkan på det fusionerade slutresultatet minskas och i vissa fall kan den uteslutas helt. För att kunna göra sådana bedömningar är det centralt att ha god kontroll på hur kvalitet och trovärdighet hos källor och fusionstjänster varierar över tiden och beroende på situation.

4 Semantisk ensning

Som vi sett i föregående kapitel är ensade format en förutsättning för fusion. I hamnövervakningsexemplet från introduktionen ger radarn ifrån sig attributinformation i form av en uppskattad radarmålärea av ett fartyg och UV-systemet ger attributinformation i form av en klassificering av motorljud. Hur ska man gå tillväga för att väga samman dessa attribut? Först måste vi fråga oss om det överhuvudtaget går att vinna något på att fusionera motorljud med radarmålärea. Frågan är huruvida "motorljud" och "radarmålärea" är *kompatibla* ur ett fusionsperspektiv. Detta kompatibilitetstest kan formaliseras som en funktion $C_{i,j}()$ som tar ett attributpar (i,j) som indata och som utdata ger en etta om attributen är kompatibla, annars en nolla [15]. I exemplet är syftet att klassificera huruvida det detekterade målet är ett stort eller litet fartyg. För det kan både radarmålarean och motorljudet ge ledtrådar, vilket antyder att de borde ses som kompatibla även om det inte är uppenbart hur begreppen beror av varandra. Givet att två attribut är kompatibla, behövs en formel för hur just dessa två attribut ska vägas samman. Detta kan beskrivas av en fusionsfunktion $F_{i,j}()$, där indata är ett par av kompatibla attribut och deras respektive värden, och utdata är ett resulterande attribut med ett nytt värde. I exemplet vill vi kunna ange attributet "motorljud" med värdet "motortyp A" och attributet "radarmålärea" med värdet "X kvm" som indata, och till exempel få ett resulterande attribut "fartygsstorlek" med värdet "stort". En sådan funktion är långt ifrån trivial att utforma. För en intressant ansats och ett vidare resonemang kring begreppet attributfusion, se [15]. Såväl $C_{i,j}()$ som $F_{i,j}()$ beror på användningssituationen.

För att åstadkomma generella och återanvändningsbara kompatibilitets- och fusionsfunktioner i system med heterogena källor ställs stora krav på hur informationen är representerad. Om radarn och UV-systemet från början använt en gemensam representationsmodell, eller automatiskt kunnat göra en översättning till en sådan, skulle mycket vara vunnet. Processen att göra innebörden av information jämförbar genom att överföra den till en gemensam referensram kallas *semantisk ensning*. Det här kapitlet beskriver problemet kring denna process i mer detalj och vilka ansatser som finns för att hantera det.

4.1 Kunskapsrepresentation

En människa som ska väga samman information från heterogena källor måste också först genomföra en semantisk ensning. Denna ensning görs dock oftast omedvetet och baseras på den rådande situationen och den kunskap om världen som personen byggt upp erfarenhetsmässigt över tiden. En människa kan intuitivt och ur kontexten avgöra när ordet "leopard" syftar på ett djur, en stridsvagnsmodell eller en version av operativsystemet Mac OS X. På samma sätt

kan hon snabbt räkna ut att om en person sett en "stor båt med en massa människor" och en annan ett "passagerarfartyg" vid ungefär samma tid och plats så är det troligt att det handlar om samma objekt. En dator saknar generellt den enorma och komplexa kunskapsbank och inläring som krävs för att kunna tolka naturligt språk på detta sätt, även om IBM:s Jeopardy-vinnande superdator Watson visat att stora resurser inom en begränsad tillämpning kan ge häpnadsväckande bra resultat [16].

För att kompensera för datorernas begränsningar att hantera det naturliga språkets komplexitet och mångtydighet, krävs att den nödvändiga kunskapen representeras explicit. Om man vill att en dator ska kunna dra slutsatsen att "en stor båt som transporterar människor" har samma betydelse som "färja" kan det uttryckas i en s.k. *ontologi*, en informationsmodell uttryckt i ett formellt språk där de grammatiska reglerna och innebörden av symboler är entydiga. Ordet ontologi härstammar från filosofin där det innebär en systematisk förklaring av varandet. Inom området kunskapsrepresentation definieras ontologi mer formellt som:

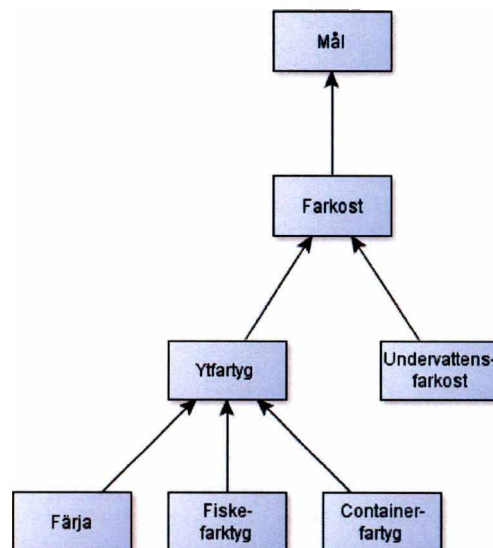
"En explicit, formell specifikation av en gemensam begreppsbildning"

Denna definition, som först föreslogs av Grubber i [17] och som ytterligare förfinades i [18], är den mest citerade i litteraturen. Med *begreppsbildning* (eller "konceptualisering") avses skapande av en begreppsmodell rörande ett fenomen i omvärlden. *Explicit* betyder att de begrepp som används, samt begränsningar för deras användning, är uttryckligen definierade. *Formell* hänvisar till det faktum att ontologin ska vara maskinläsbar. Slutligen återspeglar *gemensam* att en ontologi fångar konsensus beträffande ett specifikt kunskapsområde, det vill säga kunskap som accepteras av en grupp.

En ontologi representerar en form av en formell överenskommelse. Varje term som används i naturligt språk har vanligtvis flera betydelser. I en ontologi måste den semantiska tolkningen av dessa termer begränsas och ges en formell definition. Således kan överenskommelsen ses som en slags mappning mellan ontologins termer och deras avsedda betydelse. Den huvudsakliga uppgiften i sammanhanget är att exakt bestämma vilken mening termerna har.

Rent praktiskt består en ontologi ofta av en samling entiteter, attribut, relationer och logiska regler. Ett exempel på en väldigt enkel ontologi är *taxonomin*, där entiteter ordnas som specialiseringar respektive generaliseringar av varandra. Redan en så enkel ontologi som en taxonomi kan vara till hjälp vid sammanvägning av information.

Anta att UV-systemet och radarn i exemplet ovan definierat sina måltyper i en gemensam taxonomi enligt Figur 11.



Figur 11. Exempel på enkel taxonomi av objekt relevanta för målklassificering i hamnsäkerhetsdomänen.

När UV-systemet detekterar en akustisk signal kan den inte utan vidare skilja på om målet är ovan eller under vatten, d.v.s. den klassificerar sitt mål som Farkost. Radarn kan enbart detektera farkoster ovan vatten och klassificerar sina mål som Ytfartyg. Om båda systemen ger detektion samtidigt kan vi tack vare taxonomin logiskt sluta oss till att det måste röra sig om ett Ytfartyg. Om enbart UV-systemet ger detektion kan vi istället sluta oss till att det måste röra sig om en Undervattensfarkost, något som inget av systemen självt skulle klara att avgöra. (Om enbart radarn ger detektion kan vi misstänka att ettdera systemet inte fungerar som det ska.)

Mer uttrycksfulla ontologier kan specificera mer detaljerade logiska regler vilket ökar möjligheten för att maskinellt räkna ut när information är kompatibel eller inte. En regel i en ontologi skulle till exempel kunna se ut som följande:

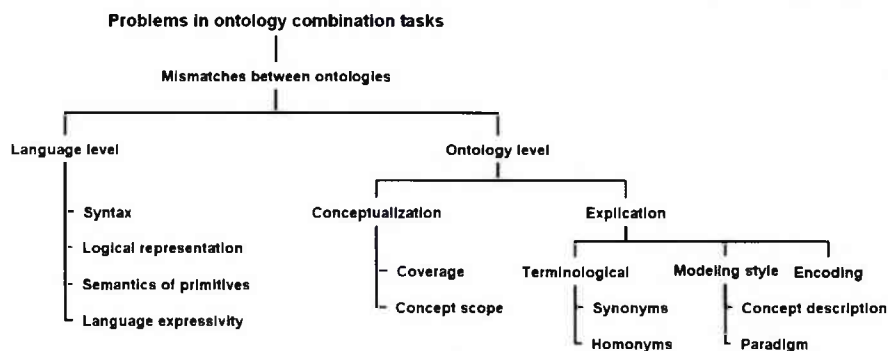
```
(x av_typ Ytfartyg) OCH (x transporterar Personer) => (x av_typ Färja)
```

Med den typen av logiska regler kan information som uttryckts på förhållandevis skilda sätt ändå kompatibilitetstestas och eventuellt också fusioneras maskinellt.

4.2 Två aspekter av semantiska gap

Som vi sett kan en gemensam ontologi vara till stor nytta när man försöker definiera kompatibilitets- och fusionsfunktioner. Oftast kan man dock inte räkna med att man befinner sig i en sådan gynnsam situation. Sensor- och informationssystem är ofta utformade i sammanhang som inte tagit höjd för framtida interoperabilitetskrav och där man därför har nöjt sig med att utforma ett rudimentärt databasschema som är optimerat enbart för en specifik tillämpning.

Detta innebär att även om man lyckas skapa ontologier för de system från vilka man vill fusionera information, så kommer dessa att skilja sig åt. Vi skiljer här på två typer av semantiska "gap" vilka försvårar skapandet av kompatibilitets- respektive fusionsfunktioner. Det första handlar om konsekvensen av *skilda begreppsbildningar*. Samma domän kan av olika aktörer uppfattas och modelleras ur delvis eller helt olika perspektiv. Ett fartyg kan till exempel klassificeras ur ett funktionellt perspektiv, d.v.s. om det är ett passagerar-, fiske- eller containerfartyg, och ur ett framdrivningsperspektiv, d.v.s. om det drivs av segel, ånga eller motor. Styrkan hos heterogena källor är att de använder skilda begreppsbildningar vilka kompletterar varandra, men vid fusion medför det svårare utmaningar ur ett ensningsperspektiv. Klein har i form av en taxonomi listat faktorer som påverkar inkompatibiliteten hos två ontologier, se Figur 12, vilket får tjäna som en illustration av hur komplext semantisk ensning kan vara [19].

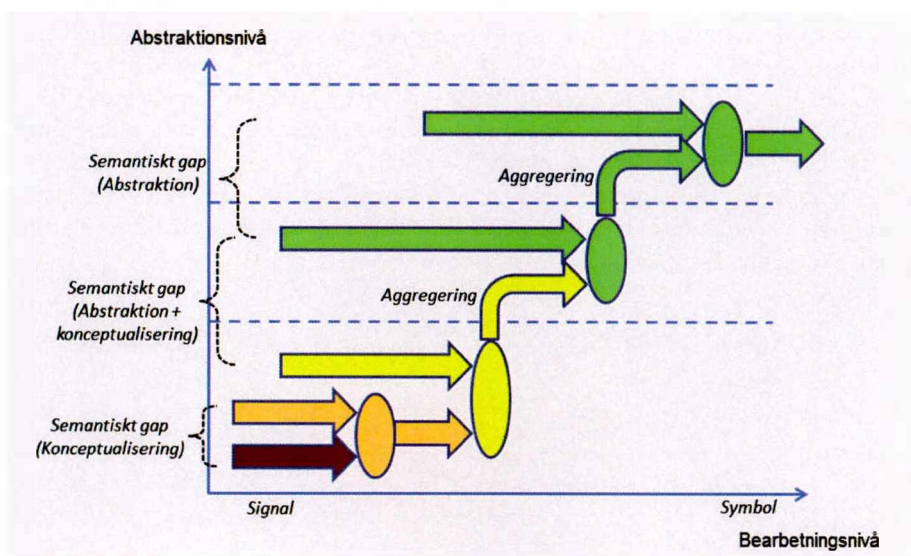


Figur 12. En taxonomi över olika faktorer som kan behöva ensas vid ontologi-harmonisering.

Den andra typen av semantiskt gap är *skillnad i abstraktionsnivå*. Två informationskällor kan använda samma begreppsbildning, t.ex. en gemensam taxonomi, men uttala sig på helt olika abstraktionsnivåer. Ett exempel kan vara en sensor som detekterar enskilda människor och en mänsklig källa, säg en

journalist, som detekterar ett upplopp. I en sådan situation krävs en avancerad ontologi för att kunna göra en generisk kompatibilitetsfunktion. Fusionsfunktionen kommer i detta fall först vara tvungen att göra en *aggregering*, d.v.s. lyfta den semantiska abstraktionsnivån från enskilda personer till en grupp av människor, innan en "vanlig" fusionering kan utföras (alternativt vice versa, göra en disaggregering).

Figur 13 ger en illustration över sambandet mellan de två typerna av semantiska gap, abstraktion och begreppsbildning. Respektive pil utgör en källa, antingen en sensor, mänsklig källa eller utdata från en fusionstjänst (ellipserna). Respektive färg representerar en specifik begreppsbildning. Generellt ökar abstraktionsnivån med nivån av bearbetning, från signal via särdrag till symbol. Fusion kan göras vid såväl olika bearbetningsnivå som olika abstraktionsnivå och båda typer av semantiska gap kan förekomma på alla nivåer.



Figur 13. Illustration av sambandet mellan två typer av semantiska gap, abstraktion och begreppsbildning.

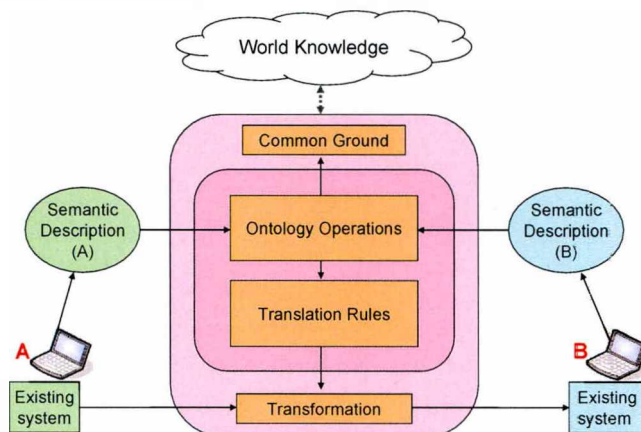
4.3 Ontologibaserat ramverk för semantisk interoperabilitet

En förutsättning för meningsfull fusion av attributinformation är alltså att informationen från respektive källa (t.ex. radarn och UV-systemet) kan ensas. Vi visade ovan att detta kan åstadkommas med hjälp av ontologier som beskriver de begreppsvärldar som respektive sensorssystem använder sig av, så låt oss anta att vi har semantiska beskrivningar för radar- respektive UV-sensorer. Låt oss också

anta att radarn och UV-systemet är korrekt anslutna till en lägescentral där informationen ska fusioneras (konnektivitet eller fysisk interoperabilitet är etablerad) och att de kan skicka data på känt format (syntaktisk interoperabilitet råder). Det som återstår då är att ensa semantiken.

Just det här problemet har utförligt behandlats inom ramen för FOI-projektet Semantisk interoperabilitet [20] samt i två NATO-arbetsgrupper där FOI har medverkat. Resultaten håller i skrivande stund på att implementeras i en prototypdemonstration som kommer att slutredovisas under hösten 2012. Lösningen består av två delar: en *lösningsarkitektur* i form av en *semantisk middleware* och en *processbeskrivning* som förklarar tidsdimensionen av problemlösningen i form av aktiviteter.

Lösningsarkitekturen benämns SILF, *Semantic Interoperability Logical Framework*, och illustreras översiktligt i Figur 14. Den intresserade läsaren hänvisas till slutrapporten från NATO-gruppen IST-075 för mer detaljer [21]. Systemen A och B i figuren kan i vårt sammanhang tolkas som radarn och UV-systemet. De har varsin semantisk beskrivning, vilket är nyckeln till att framgångsrikt fusionera den information som respektive system bidrar med. Dessa beskrivningar kan nämligen – trots att de mycket väl kan vara konstruerade vid olika tidpunkter och utan kännedom om varandra – behandlas med hjälp av semantiska tekniker som ökar chansen för att information från olika källor ska kunna fusioneras.



Figur 14. Översikt över SILF, Semantic Interoperability Logical Framework.

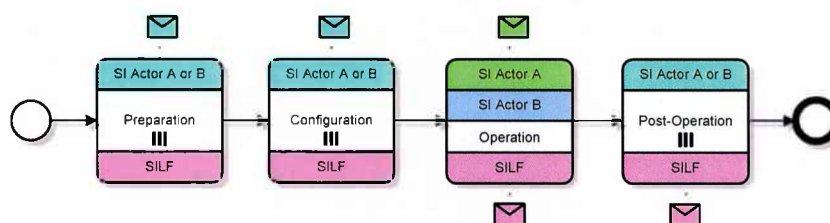
SILF innehåller en så kallad *Common Ground* (CG), vars syfte är att samla relevant bakgrundsinformation som kan underlätta informationsfusionen. Här kan det till exempel finnas information om radarband, så att oavsett vilken radar och vilken semantisk beskrivning som kopplas in är översättningsmotorn medveten om att K_u-bandet motsvarar frekvensbandet 12–18 GHz. På samma

sätt kan man lägga in information om att radar bygger på elektromagnetisk strålning, så att våglängden kan tas fram genom att ljushastigheten divideras med frekvensen. Dessutom kan man lägga in semantiska regler om hur indelningen i radarband ser ut inom olika standarder från organisationer såsom ITU, NATO och IEEE, och säkerställa att det finns konverteringsregler mellan de standarderna. På samma sätt finns det ytterligare ett stort antal befintliga ontologier som bör inkluderas i CG, vilket utvecklas vidare i nästa avsnitt.

För att ensa radarn och UV-systemet används semantiska tekniker. De finns tillgängliga i form av *operationer* som kan anropas som tjänster i SILF-arkitekturen. Sådana operationer kan vara jämförelser av strukturmässig likhet mellan begreppsvärldar, logiska slutledningar, lexikala jämförelser (mot ett godkänt lexikon i CG) eller ensning baserad på maskininläring utifrån tidigare användning av SILF. Sådana tjänster utvecklas kontinuerligt såväl kommersiellt som forskningsmässigt. Bra översikter över operationer och tekniker som kan vara lämpliga återfinns i [22] och en jämförelse av verktyg finns i [23].

CG och de semantiska operationerna ger tillsammans upphov till *översättningsregler*, som relaterar begreppen från radarn till begreppen från UV-systemet och vice versa. Dessa regler utgör förlagan till varje konkret *transformation* av data från ett format till ett annat, eller *fusion* av två sorters data. Tack vare översättningsreglerna går ingen semantisk information förlorad vid fusionen.

Processbeskrivningen benämns SIDEPE, *Semantic Interoperability Development and Execution Process*, och är löst baserad på liknande processer framtagna för att säkerställa semantisk interoperabilitet mellan de ingående noderna i distribuerade simuleringar. SIDEPE har fyra faser som illustreras i Figur 15.



Figur 15. SIDEPE-processen har fyra faser: förberedelse, konfigurering, genomförande och postoperativ.

I *förberedelsefasen* skapas de semantiska beskrivningarna av sensorerna, till exempel radarn och UV-sensorn. Detta kan göras långt innan själva sensorerna är köpta och installerade: allt som krävs är att man vet vilka sensorer som ska användas och att deras begreppsapparater kan beskrivas i maskinläsbar form (t.ex. i RDF, OWL eller något annat standardspråk [24]). Dessa beskrivningar konsistenskontrolleras och länkas därefter till CG.

I *konfigureringsfasen* definieras målet med fusionen och knyts till ett scenario. Exempel på sådana scenarier är hamnsäkerhetsfrågeställningarna som introducerades i kapitel 2. Scenarierna används sedan för att partitionera de semantiska beskrivningarna på ett sådant sätt att bara den information som faktiskt behövs används. Skälet är att ontologierna annars lätt kan visa sig bli ohanterligt stora. När de relevanta delarna av ontologierna identifierats utförs en matchning mellan dessa. Matchningen ligger sedan till grund för skapandet av översättningsregler, som används för att länka ihop de semantiska beskrivningarna med varandra och med CG, som också uppdateras med utvunnen information för framtida bruk.

I *genomförandefasen* är alla sensorer igång och den information som de genererar fusioneras med hjälp av översättningsregler som körs i realtid. Vidare övervakas och loggas informationsflödena för att möjliggöra såväl löpande uppföljning i realtid som loggbaserad analys i efterhand.

I den *postoperativa* fasen analyseras insamlad data för att möjliggöra förbättringar vid nästa genomförandefas. Det kan exempelvis handla om ett intrångsförsök i hamnen, där den inkomna sensorinformationen fusionerades och gav upphov till en mer eller mindre korrekt lägesbild för användaren. Genom att studera loggdata kan man t.ex. se vilka översättningsregler som använts och om de gav upphov till missförstånd. Dessa kan då rättas till inför framtiden. Detta kan också ske automatiserat med maskininlärningsalgoritmer som arbetar med loggdata.

4.4 Common ground för fusion

Som beskrivits ovan så underlättas semantisk ensning om de källor vars information ska fusioneras redan från början beskriver sin begreppsapparat i form av en ontologi. Ytterligare förenkling kan nås om dessa ontologier även har länkat sina begrepp till begrepp i standardiserade informationsmodeller, som samlats i en *Common Ground för fusion*.

Vilka modeller kan då tänkas utgöra en sådan Common Ground för fusion? Det finns mängder av standardformat för utbyte av sensordata och ledningsinformation, inte minst inom NATO. Dessa är dock oftast skräddarsydda för ett smalt användningsområde och sällan formaliserade som ontologier med konceptuell utgångspunkt, utan är mer fokuserade på representation ur ett databasperspektiv. Detta försvårar manuell ensning och minskar även möjligheten att använda ontologibaserade stödverktyg.

Det finns dock informationsmodeller som kan vara värdefulla även om de inte kan anses uppfylla ontologikravet fullt ut. Ett exempel inom ledningsområdet är

JC3IEDM⁴ som utvecklas och förvaltas gemensamt av ett stort antal länder och organisationer, däribland Sverige och NATO [25]. JC3IEDM innehåller en stor mängd ledningsrelaterade hierarkiskt ordnade termer som kan tjäna som gemensamma definitioner på exempelvis materiel-, förband- och händelsetyper. Detta utnyttjas exempelvis i C2LG, Command and Control Lexical Grammar, även känt som BML, Battle Management Language [26]. C2LG är ett format för att uttrycka "Commander's Intent" och vokabulären hämtas från JC3IEDM.

JC3IEDM är gjord för utbyte av ledningsinformation och beskriver objekt, deras aktiviteter och inbördes relationer, vilket motsvarar fusion på JDL-nivå 2 (situationsanalys). Även om det har gjorts försök att "ontologisera" JC3IEDM [27], så är den fortfarande inte skapad för att täcka de behov som finns för representation vid situationsanalys. Mieczyslaw Kokar och hans forskargrupp på Northeastern University i Boston har däremot försökt introducera gemensamma standarder inom området. Ett av deras bidrag är Situation Theory Ontology (STO) [28], som är ett förslag på en gemensam domänövergripande ontologi för situationer och en lämplig kandidat för att tillhöra en Common Ground för fusion.

För lägre nivåers fusion, där behov att uttrycka mer sensornära egenskaper och särdrag finns ett initiativ från Open Geospatial Consortium (OGC) kallat Sensor Web Enablement (SWE) [29]. OGC är ett konsortium av universitet, industrier och institut som gått samman för att standardisera geografisk information och sensorinformation. SWE syftar till att underlätta integrering av data från heterogena sensorer och består av en svit av standardiseringsspecifikationer. Dessa täcker bland annat hur man ska modellera sensorkonfigurationer, observationer, kommunikation och sensorstyrning. Specifikationerna består av XML-scheman, men i ett initiativ inom W3C⁵ kallat Semantic Sensor Network [30], har man gett rekommendationer för hur dessa kan utvecklas till ontologier.

Inom W3C har man även intresserat sig för ontologier för osäkerhetsrepresentation. En arbetsgrupp har tagit fram krav för hur osäkerhet bättre ska kunna hanteras med hjälp av semantiska tekniker [31]. De flesta ontologier som finns uttrycks i ontologispråket OWL, vilket bygger på s.k. "Description Logics", vilket i sin tur är en delmängd av predikatlogik. Detta innebär att "vanliga" ontologier inte kan uttrycka osäkerhet. En hel del forskning har inom olika forskningsgrupper utförts inom området probabilistiska ontologier, d.v.s. ontologier där man även kan uttrycka osäkerhet. Syftet med probabilistiska ontologier är att utförligt kunna beskriva kunskap om en domän tillsammans med osäkerheten som finns inbäddad i den kunskapen på ett strukturerat sätt, idealt på

⁴ Joint Consultation, Command and Control Information Exchange Data Model

⁵ World Wide Web Consortium, ett internationellt samarbete som utvecklar standarder för att säkerställa webbens långsiktiga tillväxt.

ett format som kan läsas och bearbetas av en dator. En av de mer kraftfullare föreslagna probabilistiska ontologierna är PR-OWL, som också utvecklats vid GMU [32].

Ovanstående är bara ett urval av de informationsmodeller och ontologier som skulle kunna utgöra komponenter i en Common Ground för fusion. Den exakta utformningen kommer att vara behovsstyrd och tanken är att CG byggs ut allteftersom nya standarder och översättningar kommer till. En viktig faktor är också hur man väljer att organisera förvaltningen av CG. Vill man att den egna organisationen har en egen CG, eller vill man dela det med några få utvalda, eller rent av ha en fullständigt öppen och global CG på webben, likt *Open Linked Data* [33].

5 Osäkerhetshantering

Att hantera osäker information är fundamentalt för alla former av mänskligt beslutsfattande. Mätningar från sensorer är alltid behäftade med en viss mätosäkerhet. Statistiska uppgifter av olika slag som ska användas för att fatta ett beslut är alltid osäkra. Och om beslutet ska grunda sig på mänskligt genererad information (HGI, human-generated information) finns det dessutom andra källor till osäkerhet: otydligheter i den språkliga formuleringen samt subjektivitet hos människan som genererar informationen.

I militära tillämpningar måste man också ta hänsyn till möjligheten att motståndaren försöker vilseleda genom felaktig information. Fusion av information från flera källor kan ibland användas för att upptäcka och korrigera för detta, se t.ex. [34].

Det finns en stor mängd matematiska modeller och teorier för att representera osäkerhet. Vi kommer här endast att ta upp några av dessa och ge en översiktlig beskrivning av dem samt diskutera när de är tillämpliga. För utförligare diskussioner hänvisar vi till [35].

Man kan definiera flera olika sorters osäkerhet. Man kan t.ex. prata om information som är tvetydig, osäker eller onoggrann, ofullständig, vag eller inkonsekvent. Med tvetydig information menas att informationen kan tolkas på två eller flera sätt. Tvetydigheter kan representeras matematiskt t.ex. genom en logisk formel "A ELLER B", där A och B representerar de två möjliga tolkningarna. Ett annat sätt att representera detta är genom Dempster-Shafer-teori, som är en utvidgning av traditionell sannolikhetslära som tillåter att förknippa logiska formler uppbygga med disjunktioner med en s.k. sannolikhetsmassa.

Den enklaste typen av osäker information är den som handlar om mätonoggrannheter, vilket enklast representeras med en vanlig sannolikhetsfördelning definierad på de värden som det man mäter på kan anta. På samma sätt kan ofullständig information representeras genom att man helt enkelt låter de värden som inte är uppmätta representeras av en fördefinierad sannolikhetsfördelning över möjliga värden. Om man inte har tillräckligt med bakgrundsinformation för att skapa en sådan fördelning kan man låta värdet förbli odefinierat.

Onoggrann information är huvudanvändningen för Dempster-Shafer-teori. Tvetydig information kan på sätt och vis ses som ett specialfall av onoggrann information: tvetydigheten översätts till onoggrannhet i utsagan. Ett exempel på onoggrann information är en mätning från en akustisk sensor som inte kan avgöra exakt vilket fordon som passerar, men kan säga klart att det är ett hjulfordon och inte en bandvagn. Sannolikhetsmassan i Dempster-Shafer läggs då på unionen av samtliga möjliga hjulfordonstyper.

Vag information som t.ex. utsagan "Gustaf är nära huset" representeras lämpligen med s.k. fuzzymängder. En fuzzymängd är en utvidgning av vanlig mängdlära där man tillåter ett element att tillhöra en viss mängd till en viss grad istället för att kräva säker kunskap om att elementer antingen tillhör eller inte tillhör mängden. Rent matematiskt är det enklast att förstå fuzzy genom att studera den karaktäristiska funktionen⁶ för mängden. Fuzzymängder fås genom att tillåta dessa att anta värden mellan 0 och 1 istället för endast 0 och 1. För att kunna tolka fuzzymängder krävs det omfattande modellering av de begrepp/mängder som man vill kunna använda. I exemplet ovan måste det t.ex. finnas en modellering av vad begreppet "nära" betyder. Man skulle t.ex. kunna använda modellen att om avståndet är mindre än 10 meter så är det nära, om det är över 20 meter så är det inte nära, och däremellan så avtar graden till vilket avståndet är nära linjärt med avståndet.

Inkonsekvent information, slutligen, betyder att något är fel. Om ett fusionsresultat är inkonsekvent så kan det t.ex. bero på att de data som fusionerats inte associerats korrekt.

Det bör noteras att det inte finns någon osäkerhetsteori som är klart bättre än de andra. Vilken som är lämpligast att använda måste avgöras från fall till fall. Det finns vissa möjligheter att generalisera de olika representationerna och hitta gemensamma drag i dem. En metodologi som möjliggör representation av alla sorters osäkerhet är s.k. osäkerhetsmängder ("random sets"), d.v.s. stokastiska variabler som är mängdvärda [36]. Ett gemensamt problem för samtliga teorier är att det oftast inte är självklart hur osäkerheten i ett informationselement ska översättas till representationen. För fuzzy måste man t.ex. modellera alla begrepp (jämför ovan), medan man för Dempster-Shafer måste beräkna hur stor sannolikhetsmassa som ska läggas på disjunktionen.

Inom underrättelseanalys finns begreppen sakriktighet och tillförlitlighet hos en källa för att ange kvalitet och tilltro till en källas utsaga. Samma bedömningsmallar som används för att bestämma dessa värden kan i vissa fall användas även för att beräkna värdena i en matematisk osäkerhetsrepresentation. Hur detta ska göras är dock i de flesta fall inte uppenbart och belyser ett av problemen med informationsfusionsforskningen idag: det ägnas inte tillräckligt med tid åt att hitta metoder för att definiera osäkerhetsstrukturer utifrån faktiska mätvärden. Den mesta forskningen handlar istället om nya algoritmer för osäkerhetsberäkningar där man antar att sensorer ger ifrån sig precis den sorts data algoritmen kräver.

Den konceptuellt kanske enklaste och samtidigt mest använda osäkerhetsrepresentationen är utan tvekan den bayesianska. För denna är det i många fall

⁶ Den karaktäristiska funktionen för en mängd tilldelar element som tillhör mängden värdet 1 och alla andra element värdet 0.

enkelt att beräkna representationen utifrån mätdata. Genom att utnyttja bayes regel (se t.ex. [35]) kan man bestämma t.ex. sannolikheten att ett förbipasserande fordon är en stridsvagn av en speciell typ. Bayes regel gör det möjligt att "vända på orsakssamband". Om man gjort ett stort antal mätningar av t.ex. vilka akustiska signaler olika fordon genererar då de passerar en bro, så kan man sedan utifrån uppmätta signaler beräkna sannolikheten att det är en viss sorts fordon som passerat.

För samtliga osäkerhetsrepresentationer kan man också prata om en andra ordningens osäkerhet. Med andra ordningen osäkerhet menar man här helt enkelt att man är osäker även på de värden som används för att bestämma den första ordningens osäkerhet. För bayesianska representationer har man t.ex. då flera sannolikhetsfunktioner istället för en och för Dempster-Shafer skulle man använda en sannolikhetsfördelning över sannolikhetsmassan för en viss mängd.

Ett exempel på heterogen information är information som ska fusioneras och använder olika osäkerhetsrepresentationer. Det är särskilt aktuellt i system sammansatta av olika delsystem som satts ihop för en viss tillämpning eller insats. Då kan man i ett förberedande steg innan fusion behöva göra en översättning mellan de olika representationerna. En utredning om hur översättningen kan gå till presenteras i Florea m.fl. [37].

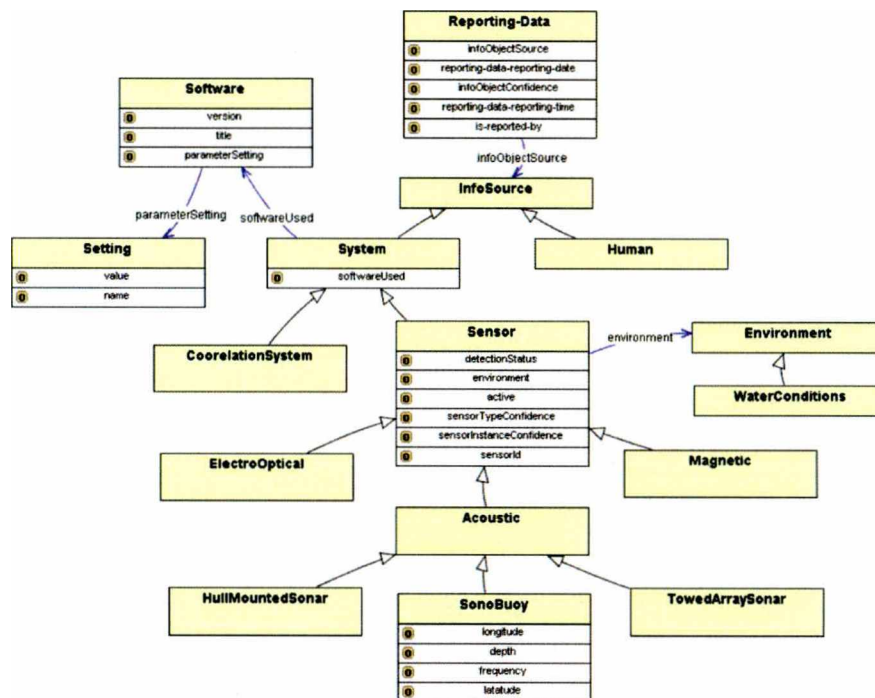
6 Spårbarhet och tilltro

I ett informationssystem med många heterogena källor och fusionstjänster i flera lager är det en utmaning att säkerställa kvaliteten av fusionsresultat. Finns det risk att samma observation kommit in i systemet på olika vägar och av misstag behandlats som oberoende (s.k. dataincest)? Hur beroende är ett resultat av en specifik källa och hur förändras det om trovärdigheten till källan förändras? Användes rätt sensorkonfiguration vid mätningen med tanke på rådande omständigheter som temperatur och sikt? För att en analytiker eller beslutsfattare ska kunna svara på denna typ av frågor och göra en bedömning av trovärdigheten av ett fusionsresultat krävs det att informationskällor och fusionsprocess är spårbar.

Härkomst-metadata (*eng.* pedigree metadata) är benämningen på uppgifter om de källor som information härrör från, men också uppgifter om hur och under vilka förhållanden den samlats in och detaljer om dess bearbetningshistorik [38]. Det främsta syftet med härkomst-metadata är att ge en grund för trovärdighetsbedömningar, men den kan som vi kommer se även användas för att upptäcka felkällor och åtgärda fel.

Matheus et al. [39] beskriver en ansats att skapa en s.k. härkomst-ontologi för nivå 1-fusion i en marin tillämpning, illustrerad i Figur 16. Ontologin har en entitet för rapportdata som innehåller information om rapporteringstid, tillförlitlighet och informationskälla. Informationskällorna delas in i mänskliga respektive systemkällor, där system kan vara antingen en sensor eller en typ av fusionstjänst. För system kan man beskriva vilken mjukvara som använts samt dess parametrar och konfiguration. Sensorerna beskrivs genom ett antal attribut och det finns även stöd för att beskriva vilken omgivning som sensorn verkat i. Värt att notera är att ontologin är konstruerad för att kunna kopplas ihop med JC3IEDM. Toppnoden i härkomst-ontologin, "Reporting-Data", är även en "lövnod" i JC3IEDM, och härkomst-ontologi kan därför sägas fungera som en utökning av JC3IEDM.

Tilltro till härkomst-metadata är av stor vikt vid beslutsfattande. Inte minst när mänskliga källor ingår i underlaget är tillgång till tillförlitlighetsbedömningar avgörande. Samtidigt får inte källskyddet hotas. Ceruti et al. [38] föreslår att härkomst-metadata bör signeras för att säkerställa att den inte är manipulerad, samt krypteras för att skydda känslig information. De föreslår också en variant där särskilt känslig källinformation ges en högre sekretessnivå än annan härkomst-metadata, lyfts ut och ersätts med pekare till en central och mer skyddad databas.



Figur 16. Exempel på en härkomst-ontologi för nivå 1-fusion i en marin tillämpning, från [39].

Vid fusion av information från heterogena källor blir hanteringen av härkomst-metadata särskilt utmanande. Härkomst-metadata representerad på olika sätt måste jämföras för att en bedömning av tilltron av det nya fusionsresultatet ska kunna göras. Tilltron för en mänsklig källa baseras till exempel oftast på en subjektiv bedömning av dess tillförlitlighet, medan en sensor däremot kan ha en objektiv beskrivning av hur osäker den är avseende sin egen förmåga (d.v.s. andra ordningens osäkerhet). För att åstadkomma en sådan skattning kan man försöka överföra all information till en gemensam representation som kan hantera andra ordningens osäkerhet, till exempel Dempster-Shafer, för att göra matematiska sammanvägningar. Alternativt kan man hantera bedömningen av tilltro manuellt vid sidan av. Båda metoderna innebär svårigheter, den första avseende metoder att automatiskt ensa olika representationer, den andra avseende metoder att presentera osäkerhet för människor [38].

En önskvärd egenskap hos ett fusionssystem som hanterar härkomst-metadata är att uppdateringar i källvärdering eller fusionskontext automatiskt ska propagera genom systemet. Om uppgifter inkommer att en källa visat sig sprida falsk information ska det räcka att ändra källans trovärdighet på ett ställe, sedan ska systemet se till att uppdatera alla slutsatser som är baserade på denna källa. På

samma sätt, om det inkommer uppgifter om att en särskild sensor presterar sämre än tidigare känt under ett visst väderförhållande, ska samtliga värderingar där mätningar från den sensorn under detta förhållande ingått automatiskt uppdateras. Detta förutsätter naturligtvis att härkomst-metadata innehåller denna typ av kontextuell information.

Med hjälp av rik härkomst-metadata kan man också öka chansen att upptäcka och åtgärda fel i fusionsprocessen. Om det över tiden visar sig att ett fusionsresultat då och då blir fel, kan man genom att analysera härkomst-data försöka sluta sig till om det är en viss källa, en viss konfiguration hos en fusionstjänst eller en viss kontext som är orsaken och sedan justera fusionsprocessen för att kompensera detta.

I förra kapitlet beskrev vi hur en sensormätning, eller mer generellt en utsaga, kan vara behäftad med osäkerhet. Även tillförlitligheten till den osäkra utsagan kan vara behäftad med osäkerhet, d.v.s. osäkerhet av andra ordningen. Bedömningen av andra ordningens osäkerhet baseras till stor del på tillgänglig härkomst-metadata. Härkomst-metadata kan naturligtvis i sin tur också vara behäftad med osäkerhet - man kan vara osäker på kvaliteten av en tillförlitlighetsbedömning. I vissa situationer kan det alltså vara relevant att beakta fusion på ytterligare en metanivå, fusion av osäker härkomst-metadata.

7 Sammanfattning och diskussion

Informationsfusion är framförallt avsett att vara ett stöd till människan. Till vilken grad processen går att automatisera är starkt avhängigt av tillämpning och användare. Ett informationsfusionssystem måste därför konstrueras utgående från konkreta beskrivningar av användningssituationen. Ofta måste systemet bygga på samspel mellan människa och dator. För detta är metoder från forskningsområdet *mixed-initiative interaction* [40] ofta användbara.

Förutom automatisering av rutinsaker är det också nödvändigt att stödja människan med metoder för att undvika olika former av kognitiva bias, d.v.s. sätt som människan resonerar på och som inte är anpassade för de uppgifter vi måste lösa. Några exempel på sådana bias är att vi ofta håller fast vid tidigare slutsatser och bortser från ny information om den talar mot dessa, att vi ofta accepterar den första tillräckligt bra lösningen istället för att leta efter den bästa och att vi har svårt att hantera osäker information. Det är viktigt att påpeka att dessa bias inte odelat är dåliga: i krissituationer är det t.ex. nödvändigt att agera snabbt hellre än att fundera ut den absolut bästa lösningen. Men i besluts- eller analysituationer, där vi har tillgång till stora mängder osäker information, leder de oss fel. Datorsystem för informationsfusion är en viktig komponent i beslutsstödsystem som hjälper oss bortse från dem.

Som denna rapport försöker visa finns det ett antal delproblem som måste lösas för att kunna genomföra framgångsrik fusion. Först och främst måste det vara möjligt att fusionera informationen – d.v.s. den måste ensas så att den beskrivs på ett gemensamt format. För att möjliggöra detta är det viktigt att använda gemensamma informationsmodeller, eller skapa översättningsmöjligheter mellan de som används. Ramverket SILF med tillhörande process SIDEPA som presenterades i avsnitt 4.3 utgör är ett lovande ramverk för att hantera semantisk ensning på ett flexibelt och över tiden effektivt sätt. Även om SILF är utvecklat med avseende på innehållsinformation så är principerna giltiga även för ensning av metadata (t.ex. härkomst-metadata), så länge dessa också beskrivs av ontologier. Det finns redan en rad standarder som kan tjäna som gemensamma referensmodeller och tendensen inom fusionsforskningsvärlden är att fler och fler ser värdet av att formalisera sina informationsmodeller i form av ontologier. Men som konstateras i [41] ligger vinsten med att utveckla ett ramverk för semantisk interoperabilitet/ensning i ett längre perspektiv:

"Det är svårt att påverka utvecklingen av de [informationssystem] som redan är under projektering, men väl sådana som blir aktuella att utveckla om några år. Framtida system måste ha förmågan att beskriva sina externa gränssnitt i termer av ontologier eller motsvarande formella former. Därför måste alla beställare av system, exempelvis handläggare på FMV, redan idag kräva sådana formella beskrivningar i samband med sina beställningar."

Ett krav på sensorsystem att leverera information enligt en ontologi skulle även sätta fingret på ett annat problem inom fusionsvärlden, nämligen det glapp som finns mellan låg-nivå-sensorsystem och hög-nivå-system för situations- och hotanalys. Alltför sällan lämnar sensorsystem ifrån sig information på en abstraktionsnivå hög nog att direkt användas i t.ex. ett generellt hotanalys-system baserat på logiska regler. Kunskapen att extrahera exempelvis händelser ur videoströmmar finns idag, men de behöver uttryckas på ett sätt som är avsett för mer än systemintern användning.

En annan viktig komponent för att kunna genomföra framgångsrik fusion är en förbättrad förmåga att representera och hantera osäkerhet. Dagens system är ofta begränsade till att hantera första ordningens osäkerhet. Vid fusion av heterogen information ökar vikten av att kunna uttrycka även andra ordningens osäkerhet explicit, då möjligheten att ha en god förståelse och överblick över ingående komponenter minskar i takt med att heterogeniteten ökar. Hur osäkerheten ska beräknas är också en svår utmaning. Det är inte alls uppenbart hur t.ex. en mätning ska omvandla till en Dempster-Shafer-massfunktion.

Samma resonemang är giltigt även för övrig härkomst-metadata. För mänskligt genererad information, som även i framtiden kan förväntas vara av stor betydelse, gäller det att utarbeta bra manuella rutiner för kvalitetsbedömning av information. Detta är viktigt inte enbart för tillförlitlighet hos en ensam källa utan även för manuell bedömning av kvaliteten hos fusionsresultat. Generellt sett är hantering av härkomst-metadata fortfarande ett relativt outforskat område och mycket arbete återstår innan användbara standarder kan förväntas dyka upp.

Slutligen behövs det också förbättrade algoritmer för fusion av information från heterogena källor. Dagens fusionsalgoritmer är oftast anpassade för förhållandevis enkla tillämpningar där mängden data som ska fusioneras är begränsad. För att möjliggöra storskalig fusion av de enorma mängder heterogen information som finns tillgängligt på t.ex. webben behövs snabbare algoritmer. En lovande möjlighet här är att anpassa moderna metoder från forskningsområdena artificiell intelligens och storskalig dataanalys. Bland de metoder som skulle kunna anpassas till fusion kan nämnas random indexing, compressive sensing och automatisk översättning baserat på statistiska metoder.

8 Litteraturförteckning

- [1] P. Berggren, J. Svensson och U. Hörberg, "Mätning av gemensam lägesbild vid ledning på stridsteknisk och taktisk nivå," FOI-R--2647--SE, 2009.
- [2] R. C. Kay and M. G. Luo, "Data fusion and sensor integration: State-of-the-art 1990s," in *Data Fusion In Robotics and Machine Intelligence*, M. A. Gonzalez and R. C. Abidi, Eds., San Diego, Academic Press, 1992, pp. 7-135.
- [3] B. Dasarathy, *Decision Fusion*, IEEE Computer Society, 1994.
- [4] A. A. Ross, K. Nandakumar och A. K. Jain, *Handbook of multi-biometrics*, Springer-Verlag, 2006.
- [5] Z. Liu och R. S. Blum, *Multi-sensor image fusion and its applications*, CRC Press, 2006.
- [6] L. I. Kuncheva, "A theoretical study on six classifier fusion strategies," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 24, nr 2, pp. 281-286, 2002.
- [7] M. A. Abidi och R. C. Gonzalez, *Data Fusion In Robotic and Machine Intelligence*, San Diego: Academic Press, 1992.
- [8] D. L. Hall och S. A. H. McMullen, *Mathematical techniques in multisensor data fusion*, 2nd red., Artech house, 2004.
- [9] R. Johansson och A. Karlsson, *Information Fusion Course Compendium*, Skövde, Sweden, 2010.
- [10] A. N. Steinberg och C. L. Bowman, "Revisions to the JDL data fusion model," i *Handbook of multisensor data fusion - Theory and practice*, 2001.
- [11] W. Elmenreich, *Sensor Fusion in Time-Triggered Systems*, Vienna: Technische Universität Wien, Institut für Technische Informatik, 2002.
- [12] A. N. Steinberg och C. Bowman, "Revision to the JDL data fusion model," i *Handbook of multisensor data fusion*, 2 red., CRC Press, 2009, p. 52.

- [13] C. L. Bowman och A. N. Steinberg, "Systems engineering approach for implementing data fusion systems," i *Handbook of multisensor data fusion*, 2 red., CRC Press, 2009.
- [14] O. Kessler och F. White, "Data fusion perspectives and its role in information processing," i *Handbook of multisensor data fusion*, 2 red., M. E. Liggins, D. L. Hall och J. Llinas, Red., CRC Press, 2009.
- [15] H. Petersson, "Sensing, management and fusion of attributes in sensor networks," FOI-R--3457--SE, 2012.
- [16] "Watson (on Wikipedia)," [Online]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Watson_\(computer\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Watson_(computer)). [Använd 06 06 2012].
- [17] T. Grubber, "Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing," i *International Workshop on Formal Ontology in Conceptual Analysis and Knowledge Representation*, Padova, Italy, 1993.
- [18] W. Borst, "Construction of Engineering Ontologies," 1997.
- [19] M. Klein, "Combining and Relating Ontologies: Problems and Solutions," i *Proceedings of the IJCAI Workshop on Ontologies and information sharin*, Seattle, WA, USA, 2001.
- [20] V. Mojtahed, M. Cohen, T. Jansson, C. Mårtenson, M. Eklöf och J. Zdravkovic, "Prototyping the Semantic Interoperability Logical Framework - SILF," FOI-R--3352--SE, 2011.
- [21] "Semantic Interoperability, Final Report of Task Group IST-075," NATO Research and Technology Organisation, RTO-TR-IST-075 AC/323(IST-075) TP/315, 2010.
- [22] D. Dou, D. McDermott och P. Qi, "Ontology translation by ontology merging and automated reasoning," i *Ontologies for agents: theory and experiences*, V. Tamma, S. Cranefield, T. Finin och S. Willmott, Red., Basel, Birkhäuser, 2005, pp. 73-94.
- [23] N. Choi, I.-Y. Song och H. Han, "A survey on ontology mapping," *ACM SIGMOD Record*, vol. 35, nr 3, pp. 34-41, September 2006.

- [24] G. Antoniou och F. van Harmelen, *A Semantic Web Primer*, 2 red., MIT Press, 2008.
- [25] "JC3IEDM (on Wikipedia)," 06 06 2012. [Online]. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/JC3IEDM>.
- [26] K. Rein och U. Schade, "Battle Management Language as a "Lingua Franca" for situation awareness," i *Cognitive Methods in Situation Awareness and Decision Support (CogSIMA), 2012 IEEE International Multi-Disciplinary Conference on*.
- [27] C. J. Matheus och B. Ulicny, "On the Automatic Generation of an OWL Ontology based on the Joint C3 Information Exchange Data Model," i *Proceedings of the 12th International Command and Control Research and Technology Symposium*, Newport, RI, USA, 2007.
- [28] M. M. Kokar, C. J. Matheus och K. Baclawski, "Ontology-based situation awareness," *Information Fusion*, vol. 10, nr 1, pp. 83-98, January 2009.
- [29] "Sensor Web Enablement DWG," 2012. [Online]. Available: <http://www.opengeospatial.org/projects/groups/sensorwebdwg>. [Använd 06 06 2012].
- [30] W3C Incubator Group, "Semantic Sensor Network XG Final Report," 2012. [Online]. Available: <http://www.w3.org/2005/Incubator/ssn/XGR-ssn-20110628/>. [Använd 06 06 2012].
- [31] W3C Incubator Group, "Uncertainty Reasoning for the World Wide Web," 2012. [Online]. Available: <http://www.w3.org/2005/Incubator/urw3/XGR-urw3-20080331/>. [Använd 06 06 2012].
- [32] K. B. Laskey, "MEBN: A Language for First-Order Bayesian Knowledge Bases," *Artificial Intelligence*, vol. 172, nr 2-3, 2008.
- [33] "Linked data (on Wikipedia)," 2012. [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Linked_data. [Använd 06 06 2012].
- [34] M. Andersson, "Situational awareness in jammed environments using track association and motion recognition," i *Proceedings of the 11th conference on Information Fusion*, 2009.

- [35] C. Mårtenson och P. Svenson, "Technology to Support Assessment of Operations," FOI-R--2871--SE, 2009.
- [36] R. P. S. Mahler, Statistical Multisource-Multitarget Information Fusion, 2007.
- [37] M. C. Florea, A.-L. Jousselme och E. Bossé, "Fusion of imperfect information in the unified framework of random sets theory," DRDC Valcartier TR 2003-319, 2007.
- [38] M. Ceruti, S. Das, A. Ashenfelder, G. Raven, R. Brooks, M. Sudit, G. Chen och E. Wright, "Pedigree Information for Enhanced Situation and Threat Assessment," i *Information Fusion, 2006 9th International Conference on*.
- [39] C. J. Matheus, D. Tribble, M. M. Kokar, M. Ceruti och S. McGirr, "Towards a Formal Pedigree Ontology for Level-One Sensor Fusion," i *Proceedings of the Tenth International Command & Control Research and Technology Symposium*, 2005.
- [40] K. Johansson och C. Mårtenson, "Mixed-interactive-interaktion för militära beslutsstödssystem," FOI Memo 1864, 2006.
- [41] V. Mojtahed, M. Eklöf och J. Zdravkovic, "Semantisk interoperabilitet - Slutrapport för projektet Semantisk interoperabilitet, 2007-2009," FOI-R--2846--SE, 2009.