

Tactical plan recognition

Citation for published version (APA):

Mulder, F. (2005). *Tactical plan recognition*. [Doctoral Thesis, Maastricht University]. Universiteit Maastricht. <https://doi.org/10.26481/dis.20050512fm>

Document status and date:

Published: 01/01/2005

DOI:

[10.26481/dis.20050512fm](https://doi.org/10.26481/dis.20050512fm)

Document Version:

Publisher's PDF, also known as Version of record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.umlib.nl/taverne-license

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

repository@maastrichtuniversity.nl

providing details and we will investigate your claim.

Summary

Plan recognition can roughly be described as the problem of finding the plan(s) underlying the observed behavior of agent(s). In the case of Tactical Plan Recognition, one wants to recognize the enemy's military plan. Information for this comes from human intelligence and sensors. These produce observations of enemy objects. An observation has information about the current position of an enemy object, its speed and direction and, possibly, its actions. With the observations, only an incomplete 'picture' of the military world can be created; one does only have limited knowledge! Because of incomplete knowledge of the military world, a plan recognizer can, at best, only generate some reasonable plan hypotheses about the situation.

Traditionally, plan recognition has been studied, formalized and implemented in areas like story understanding and user modelling. This dissertation focusses on military applications, where this task of tactical plan recognition is crucial. However, this task is relevant for every application where one has to deal with adversarial agents.

Tactical plan recognition differs from traditional plan recognition in a number of ways. An enemy will often try to avoid making his plans known. Only partial achievement of planning goals can occur here. There are multiple independent or related plans and one is faced with a multi target multi sensor data fusion problem. This work focusses on a particular consequence of the covertness of the enemy's military operation: namely that the identity of the observed enemy objects, for which plans are to be recognized, is unknown. A consequence of this is that it is typically not known which observations originate from the same objects. Moreover the kinematic state of the object can only be estimated because the position and speed measurements are uncertain and are generally modelled by stochastic variables.

Other systems for this problem consisted of a sequential correlator and plan recognition function. The correlator relates successive unidentified ob-

servations that are thought to originate from the same agent. Thus identified observations are created, which then are input for a traditional identified observation plan recognizer. Disadvantages of this approach are: 1) that not all information that is available in a plan hypothesis is actually used for correlation and 2) not all possible combinations of observations are considered by the correlator. So actually a direct handling of unidentified observations in one algorithm is preferred.

In designing algorithms, it is beneficial to be able to make statements about their correctness. In other words: one wants to discuss the soundness and completeness of the algorithm. For this a formal description of Tactical Plan Recognition is required, but this has not been stated in other work.

This work then addresses the following research question:

Can a sound, complete, optimal and feasible software system be devised for the Tactical Plan Recognition problem, that can handle unidentified observations directly?

The formalization of Tactical Plan Recognition presented here is based on classical abduction. The concepts of classical abduction can readily be applied to plan recognizers for identified observations. However, for Tactical Plan Recognition some adaptations have to be made. Here the plan recognizer will not only have to generate plan hypotheses, but also assignment hypotheses. These assignment hypotheses relate observations with hypothetical plans. A choice for an assignment is essentially a decision concerning the question which observations originate from the same objects. Now the formal description is available, it is readily applied for definitions of the soundness and the completeness of the algorithms.

For observations with stochastic variables the probability of an assignment hypothesis is calculated, rather than the probability of the plan hypotheses. The latter method is found in traditional Tactical Plan Recognizers. For this, Reid's multiple hypothesis tracking formula can be adapted to calculate the assignment hypothesis probability.

The formal definitions and the application of Reid's formula are illustrated by a large number of examples of tactical situations. They concern military settings and one civil aviation setting. The examples start with simple identified observation cases, till the difficult unidentified observations case. In the final example, one finds unidentified observations with stochastic variables for kinematic measurements.

The formal definitions give a very precise description of the input of the Tactical Plan Recognizer and relate the input to the output. The next phase in the development of an algorithm consists of the analysis of the Tactical Plan Recognition problem. This is done by proposing a Generic Task Model for the problem. A Generic Task Model describes a class of problems, rather than individual instantiations of the problem. Of course, in our case it concerns the class Tactical Plan Recognition. Instantiations of this class are specific systems developed, e.g. the Data Fusion Demonstrator that operated in the army domain. Two Generic Task Models are presented: one for the simpler problem that inputs identified observations, followed by one for the problem at hand, Tactical Plan Recognition by unidentified observations.

Once the Generic Task Model is available, algorithms can be developed. In this thesis, the algorithms are specified in the high level and purely functional Haskell language. First some suitable algorithms for the problem definition and planning functions are selected. Then a suitable model for the estimation of kinematic parameters is selected. It turns out that a straight uniform motion model does a much better speed estimation than the reverting model of Mevassvik. Then the complete plan recognition algorithms are given. As is done in the analysis phase, we start with simpler case of identified observations. For this case, a generate and test algorithm is presented. Then its soundness and completeness are discussed. Also its complexity is examined.

The identified observation algorithm was still fairly simple, but it is followed by the, rather complicated, unidentified observation Tactical Plan Recognition problem. It has some parts have already been presented in the identified observations algorithm. The discussion of soundness and completeness, is based on the conclusion of the first algorithm. With regards to the complexity of the unidentified observation algorithm, the focus is on the memory complexity. A description of the amount of assignment hypotheses that are handled is given as a function of the number of observations handled by the algorithm. The complexity is very large; in fact it is Non Polynomial. The result is that hypothesis management is required (pruning, data partitioning) and only small problem sizes can be handled.

The last part of the thesis concerns and evaluation of the algorithms. This is done by means of a Test and Evaluation software. It consists of a Java Simulator and Display program and the described Haskell implementation of a Tactical Plan Recognizer. They communicate through XML and ASCII data files. Two scenarios are used for evaluation: the first is the army example

(presented earlier), the second is a littoral scenario.

The army example is studied in detail. This example concerns two army attack helicopters that attack different enemy units. The assignment hypotheses are examined after entering each observation. Their probabilities and the best assignment hypothesis are discussed. In this example one finds an assignment hypothesis with an initially low probability, but with the maximal probability some observations further. So it makes a point for retaining a significant number, e.g. 10, assignment hypotheses after each reduction (pruning of assignment hypotheses). The performance is not very good: the two targets are not always recognized as two separate targets and the track continuity is minimally 33%.

To improve on the performance, some parameters are tuned for the scenario. The practice of tuning is always found in applications, where the models of the outside world are limited in detail. The quality of the set of correlations is improved by restricting the correlation windows. The new plan density parameter is decreased, so correlations are more readily preferred to starting new plan hypotheses. After this tuning, the separation between the two targets is improved from 33% to 17% (optimally 0% indicating an immediate correct separation) and the track continuity increases to 67%.

The second littoral example concerns a coordinated attack of two Fast Patrol Boats on a Frigate that is moored before the coast. The initial plan recognition results are quite poor and in the best assignment hypothesis, there are four Fast Patrol Boats in stead of two. Also, observation of a jamming action is not incorporated in the correlation yet, therefore the plan recognizer cannot discern the target of the attack properly.

The correlation is improved by increasing the process noise and by incorporating the observed action in the correlation. To improve the correlation, also the process noise is increased, allowing for larger correlation windows. Again, the new target density parameter is decreased, thus favoring correlations above new target plan hypotheses. As a result of the tuning, the plan recognizer achieves an immediate separation between the two patrol boats and an almost correct set of plan hypotheses and a 60% track continuity.

In the evaluation of the performance, the following statements can be made:

1. it is not really possible to recognize complete plans, but only complete parts of a plan. It concerns the parts that are currently being executed or are in the near future. It is a design decision whether to apply complete

plan hypotheses.

2. The Multiple Hypothesis Tracking model is a good model, but also a limited model given the complexity of our problem. One has to work with an initial set of parameters of the Multiple Hypothesis Tracking algorithm, and try to improve the performance by tuning these parameters. Then good performances can be achieved.
3. It is necessary to retain a significant number of assignment hypotheses after pruning. This is necessary in order to allow for sufficient assignment hypotheses, so that all objects occur as a new target in these hypotheses. Also an unlikely assignment hypotheses can become the optimal one after a few successful correlations with new observations.
4. The best hypothesis is used for the performance measures, but the operator of an automatic plan recognition system must be able to examine alternative assignment hypotheses to get a good impression of the tactical situation.

The work that is presented in this thesis are the first steps of research on the Multiple Hypothesis Tracking approach to Tactical Plan Recognition. Topics for future research is the application of k-best assignment algorithms from the field of Operations Research. Also the type of plan hypotheses is restricted to non-hierarchical, single agent plans. However, military plans and organizations often are hierarchically organized and hierarchical plans are found here. As mentioned before, in this research we utilize complete plan hypotheses, but it is not possible to make certain statements about future plan parts. It is interesting to work with partial plan hypotheses here, only elaborating plan parts when they are near to execution. Also, the framework here must be extended to handle uncertain observations. In the military a confidence is always attached to human intelligence. Finally, the set of scenarios has to be increased. A division between a learning set, to tune the algorithms, and a test set, to test the performance of the tuning, of scenarios must be made.

Samenvatting

Plan herkenning kan grofweg worden beschreven als het probleem van het vinden van plannen welke de basis zijn van menselijk gedrag. In het geval van *Tactische Plan Herkenning* wil men de een tegenstander zijn militaire plan herkennen. Informatie hierover komt van 'intelligence' en sensoren. Deze produceren observaties van de objecten en 'agents' van tegenstanders. Een observatie bevat informatie over de huidige positie van een tegenstander zijn object, zijn snelheid en richting en, mogelijk, zijn acties. Met de observaties kan alleen een incompleet beeld van de militaire wereld worden gecreëerd; men heeft dan alleen een beperkte kennis van de tegenstander!. Vanwege de beperkte kennis van de militaire wereld, kan een plan herkenner alleen een aantal redelijke plan hypothesen genereren.

Traditioneel is plan herkenning bestudeerd, geformaliseerd en geïmplementeerd in gebieden als 'story understanding' en 'user modelling'. Dit proefschrift focusteert op militaire toepassingen, waar de taak van plan herkenning cruciaal is. Echter, de taak is relevant voor alle toepassingen welke omgaan met tegenstanders.

Tactische Plan Herkenning verschilt van traditionele plan herkenning in een aantal manieren. Een tegenstander zal altijd proberen zijn plannen geheim te houden. De doelstellingen van een vijandelijk plan worden soms alleen ten dele gehaald. Op een bepaald moment zijn er meerdere onafhankelijke of afhankelijke plan en een plan herkenner wordt geconfronteerd met een multi-target multi-sensor data fusie probleem. Dit werk focusteert op een bijzonder gevolg van het verbergen van gegevens tijdens een militaire operatie: namelijk dat het over het algemeen niet bekend is welke observaties van tegenstanders eenzelfde object of agent betreffen. De observaties zijn ongeïdentificeerd. Ook kan de bewegingstoestand van een object of agent alleen geschat worden omdat de metingen van positie en snelheid van een object onzeker zijn, en in het algemeen gemodelleerd worden door stochastische variabelen.

Andere systemen voor dit probleem bestaan uit een sequentiele observatie correlator gevolgd door een plan herkenningfunctie. De correlator verbindt verschillende ongeïdentificeerde observaties met elkaar, welke gedacht worden dezelfde agent te betreffen. Op deze wijze worden de geïdentificeerde observaties gemaakt, welke dan invoer zijn van een traditionele plan herkenner voor geïdentificeerde observaties. Nadelen van deze aanpak zijn: 1) niet alle informatie, welke beschikbaar is in een plan hypothese wordt daadwerkelijk gebruikt voor correlatie, en 2) niet alle mogelijke combinaties van observaties worden beschouwd door een correlator. Daarom wordt een directe behandeling van ongeïdentificeerde observaties geprefereerd.

Tijdens de ontwikkeling van algoritmes, is het voordelig uitspraken over hun correctheid te doen. M.a.w. men wil de correctheid en compleetheid van het algoritme bespreken. Hiervoor is een formele beschrijving van Tactische Plan Herkenning nodig. Echter deze wordt niet echt gegeven in ander werk.

Dit werk behandelt de volgende onderzoeksvraag:

Kan een correct, compleet, optimaal and maakbaar ('feasible') software systeem worden ontwikkeld voor het Tactische Plan Herkenningprobleem, welke ongeïdentificeerde observaties direct kan behandelen?

De formalisatie van Tactische Plan Herkenning, welke hier wordt gepresenteerd, is gebaseerd op klassieke abductie. De concepten van klassieke abductie kunnen eenvoudig toegepast worden op plan herkenners voor geïdentificeerde observaties. Echter, voor Tactische Planherkenning moeten hierop enkele aanpassingen worden gedaan. Hier zal de plan herkenner niet alleen plan hypothesen genereren, echter ook toekenningen (assignment) hypothesen. Deze toekenningshypothesen leggen een relatie tussen observaties en hypothetische plannen. Een keuze voor toekenningshypothesen is essentieel voor een beslissing over de vraag welke observaties van eenzelfde object stammen. Hiermee is een formele beschrijving van Tactische Plan Herkenning beschikbaar en is eenvoudig toepasbaar voor definities betreffende correctheid en compleetheid van de algoritmen.

Voor observaties met stochastische variabelen, wordt de kans van een toekenningshypothese berekend, dit in plaats van de kans voor een plan hypothese zelf. Deze laatste methode wordt veel gevonden in traditionele Tactische Plan Herkenners. Voor de berekening van de kans van een toekenningshypothese kan Reid zijn multiple target tracking formule aangepast worden.

De formele definities en de toepassing van Reid's formules zijn geïllustreerd met een groot aantal voorbeelden van tactische situaties. Ze betreffen militaire scenarios en een civiele toepassing. De voorbeelden beginnen met het simpele geval van geïdentificeerde observaties tot de meer moeilijke ongeïdentificeerde observaties. In het laatste voorbeeld vindt men ongeïdentificeerde observaties met stochastische variabelen voor bewegingsmetingen.

De formele definities geven een zeer preciese beschrijving van de invoer van een Tactische Plan Herkenner en relateren deze invoer met de uitvoer. De volgende fase in de ontwikkeling van een algoritme bestaat uit de analyse van het Tactische Planherkenningsprobleem. Dit wordt gedaan door een Generiek Taakmodel voor het probleem voor te stellen. Een Generiek Taakmodel beschrijft een klasse van problemen, dit eerder dan specifieke instantiaties van het probleem. Natuurlijk, in ons geval betreft het Tactische Plan Herkenning. Instantiaties van deze klasse zijn specifieke systemen, bijv. de Data Fusion Demonstrator welke ontwikkeld werd voor het leger domein. Twee Generieke Taakmodellen worden gepresenteerd: één voor het eenvoudiger probleem met geïdentificeerde observaties, gevolgd door één voor het onderhande probleem, Tactische Plan Herkenning met ongeïdentificeerde observaties.

Als de Generieke Taakmodellen beschikbaar zijn, kunnen algoritmes worden ontwikkeld. In dit proefschrift worden algoritmes gespecificeerd in zuiver functionele Haskell programeertaal. Eerst worden geschikte algoritmes voor de probleem herkenning en planning functies besproken. Dan wordt een geschikt model voor de schatting van bewegingsvariabelen van object gekozen. Het blijkt dat een simpel model met een rechte uniforme beweging een veel betere schatting van de snelheid geeft dan het 'reverting' model van Mevassvik. Daarna worden complete plan herkenningsalgoritmen gegeven. Gelijk als in de vorige (analyse) fase, beginnen we met het simpele geval met geïdentificeerde observaties. Hiervoor wordt een 'Generate-and-test' algoritme gepresenteerd. Dan wordt zijn correctheid en compleetheid besproken. Ook wordt de complexiteit behandeld.

Het eerste algoritme is nog vrij eenvoudig, maar het wordt gevolgd door het, nogal gecompliceerde, ongeïdentificeerde observaties probleem. Het heeft enkele delen welke reeds in het geïdentificeerde observatie algoritme voorkwamen. De discussie over de correctheid en compleetheid van het tweede algoritme is gebaseerd op de conclusies van het eerste algoritme. Voor wat betreft de complexiteit van het ongeïdentificeerde observaties algoritme, is de focus op de geheugen complexiteit. Een beschrijving van het aantal toeken-

ningshypotheses wordt gegeven als een functie van het aantal observaties, welke ingevoerd zijn. De complexiteit is bijzonder groot; in feite is het Niet-Polynomiaal. Het gevolg is dat hypothese management nodig is ('pruning', data partitionering) en slechts problemen met een beperkte omvang behandeld kunnen worden.

Het laatste deel van het proefschrift betreft een evaluatie van de algoritmes. Dit wordt gedaan met Test en Evaluatie software. Het bestaat uit een Java Simulator en Display programma en de, eerder beschreven, Haskell implementatie van een Tactische Plan Herkenner. Zij communiceren middels XML en ASCII data bestanden. Twee scenarios worden gebruikt voor evaluatie: het eerste is het leger voorbeeld (welke al eerder gepresenteerd was), het tweede is een kust ('littoral') scenario.

Het leger voorbeeld wordt in detail bestudeerd. Het voorbeeld betreft twee aanvalshelicopters welke verschillende vijandelijke eenheden aanvallen. De toekenningshypotheses worden bestudeerd nadat een observatie verwerkt is door het algoritme. Hun kansen en de beste assignment hypothese worden bediscussieerd. De performance is niet erg goed: de twee doelen worden niet altijd herkend als twee gescheiden doelen en de continuïteit van de plan hypothesen van het doel is minimaal 33 %.

Om de performance te verbeteren, worden enkele parameters 'getuned' voor het scenario. Deze praktijk van 'tuning' vindt men altijd in toepassingen waar modellen van de buitenwereld beperkt in detail zijn. De kwaliteit van de verzameling van correlaties tussen plan hypothesen en observaties is verbeterd door de correlatie 'windows' te verkleinen. De 'new target density' parameter wordt vermindert, zodat observaties sneller nieuwe plan hypothesen opstarten. Na deze 'tuning', is de scheiding tussen de twee doelen verbeterd van na 33 % van de observaties tot reeds na 17 % van de observaties. De track continuïteit is verbeterd tot 67 %.

Het tweede kust scenario behandelt een gecordineerde aanval van twee 'Fast Patrol Boats' op een fregat, welke voor de kust is geankerd. De initiële performance van de plan herkenning is nogal slecht en in de beste toekenningshypothese zijn vier 'Fast Patrol Boats' i.p.v. twee. Tevens is een observatie van een storingsactie niet goed behandeld, waardoor de plan herkenner het doel van de aanval niet goed kan herkennen.

Het correlatie mechanisme is verbeterd door vergroting van de proces ruis parameter, waardoor correlatie 'windows' vergroot worden. Ook wordt weer de 'new target density' parameter vermindert, waardoor correlaties de voorkeur

krijgen boven new target hypotheses. Ten gevolge van de tuning bereikt de plan herkenner een onmiddellijke scheiding van de twee boten en 60 % continuïteit.

In de evaluatie van de performance worden de volgende uitspraken gedaan:

1. het is niet goed mogelijke complete plannen te herkennen, maar slechts complete delen van een plan. Het betreft delen welke geëxecuteerd worden of welke in de nabije toekomst liggen. Het is een ontwerpbeslissing om complete plan hypotheses te gebruiken.
2. Het Multiple Hypothesis Tracking model is een goed model, maar ook een beperkt model voor ons probleem. Als een gevolg hiervan moet met d.m.v. tuning de performance van de plan herkenner verbeteren.
3. Het is nodig om een significant aantal toekenningshypotheses te bewaren na pruning. Dit is noodzakelijk om tijdens het opstarten voor iedere observatie een aparte plan hypothese bij te houden. Tevens is gebleken dat, in het begin, onwaarschijnlijke assignment hypotheses, in een later stadium (na behandeling van meer observaties) de beste kunnen worden.
4. De beste hypothese wordt gebruikt voor performance maten, maar de operator van een automatisch plan herkenningprogramma moet ook alternatieve assignment hypotheses kunnen bestuderen om een goede indruk van alle redelijke hypotheses te krijgen.

Het, hier gepresenteerde werk, bevatten de eerste stappen op het gebied van de Multiple Target Tracking aanpak voor Tactische Plan Herkenning. Mogelijke onderwerpen voor toekomstig onderzoek zijn: de toepassing van k-beste toekenningsalgoritmen van het veld van Operations Research. Ook zijn nu de plan hypotheses beperkt tot niet hiërarchische welke slechts door één agent worden geëxecuteerd. Echter, militaire plannen en organisaties zijn vaak hiërarchisch georganiseerd en hiërarchische plannen vindt men hier. Zoals al eerder vermeld, werkten we in dit onderzoek met complete plan hypotheses. Het is interessant om met partiele plan hypotheses te werken. Ook moet het raamwerk uitgebreid worden zodat onzekere observaties behandeld kunnen worden. In de militaire wereld is altijd een mate van vertrouwen (confidence) verbonden aan intelligence rapporten. Ten slotte, betreffende de tuning moeten 'leerverzamelingen' worden gebruikt voor tuning, waar de kwaliteit dan wordt bepaald door 'testverzamelingen'.