

# Een op kennis gebaseerde domeinonafhankelijke hybride planner

*De voor- en nadelen van complete versus gedeeltelijke ordeningen blijken vrijwel complementair te zijn. Onderzoek bij het FEL-TNO heeft zich toegespitst op het integreren van beide concepten teneinde maximaal van de voordelen van de beide ordeningen te profiteren. Gedurende het onderzoek is getracht het resulterende planningsysteem min of meer onafhankelijk te houden van het toepassingsdomein en is gekeken naar de mogelijkheden tot automatische herplanning.*

Planning vormt een groot, populair en snel groeiend onderzoeksgebied in het AI-onderzoek. In het algemeen verstaat men onder planning het formuleren van doelstellingen die men in een meer of minder ver verwijderde toekomst wil verwezenlijken, het bestuderen van de mogelijkheden tot deze verwezenlijking en het vaststellen en systematisch groeperen van maatregelen (acties) die tot deze verwezenlijking moeten leiden. Meer specifiek houdt het geautomatiseerd plannen zich bezig met het zoeken en aan elkaar rijgen van acties die de wereld waarover geredeneerd wordt kunnen transformeren van een gegeven initiële toestand naar een gegeven gewenste toestand, zonder dat zich problemen voordoen.

Het is zinvol om het bovenstaande tegenover planning in de zin van bijvoorbeeld 'productieplanning' te stellen, hetgeen beter met de term scheduling kan worden aangeduid. Scheduling gaat uit van een gegeven, gedeeltelijk geordende verzameling van acties en probeert elke actie een tijd en een lijst van te gebruiken middelen te geven. Het is duidelijk dat planning en scheduling min of meer in elkaar overvloeien.

## PLANNINGSONDERZOEK

Het planningsonderzoek resulteerde begin jaren '70 in systemen als General Problem Solver (GPS) en de Stanford Research Institute Problem Solver (STRIPS). GPS introduceerde de zogenaamde means-ends analysis, waarin gebruik gemaakt werd van zogenaamde planningsoperatoren. Een gewenste toestand (goal) plannen betekent een operator toepassen, die het goal als resultaat heeft. De precondities die de toepassing van de operator moeten rechtvaardigen, verfijnen (en vervangen) het oude goal en worden nieuwe (sub)goals. STRIPS, de opvolger van GPS, relateerde

*Drs.ing. C.W. d'Huy  
researchgroep CCIS/KBS,  
Fysisch en Elektronisch Laboratorium  
TNO Den Haag*

operatoren aan acties uit de 'werkelijke' wereld. De wijzigingen die acties aanbrengen in de wereld worden gerepresenteerd door het toevoegen en weglaten van feiten uit het wereldmodel. Vanuit deze basisconcepten evolueerde het planningsonderzoek uiteindelijk in 1975 tot Sacerdoti's Nets Of Action Hierarchies (NOAH). Alle ontwikkelde planners voor NOAH gingen uit van een complete ordening van acties in de tijd. Wanneer er een nieuwe actie toegevoegd moest worden, dan wist de planner exact welke acties daarvoor en daarna moesten komen. NOAH verzwakte deze aanname en liet toe dat sommige acties ten opzichte van elkaar ongeordend bleven. Uiteindelijke volledige ordening werd uitgesteld tot het punt waarop deze noodzakelijk werd. Het werken met deze gedeeltelijke ordening gaf NOAH de flexibiliteit die nodig was om veel van de onverwachte interacties, die optreden gedurende het planningsproces, te vermijden door ter plekke te kiezen voor een bepaalde ordening van acties die de ongewenste interactie van de geplande acties vermijdt.

Sinds NOAH heeft het onderzoek ten aanzien van planning zich vooral gericht op het representeren van en redeneren met gedeeltelijk geordende acties. Het gedeeltelijk ordenen van acties genereerde echter ook twee problemen:

1. Het consistent houden van de taakordening wordt moeilijker en
2. Het rekening houden met en detectie

van de schending van context-onafhankelijke beperkingen wordt moeilijker.

Een contextafhankelijke beperking is een beperking (constraint) waarvan de toepasbaarheid afhangt van de context waarin men zich bevindt. Voorbeelden hiervan zijn:

- a. beperkingen op incrementeel veranderende middelen (Wanneer voor een bankrekening geldt dat een cliënt nimmer rood mag staan, dan heeft dit invloed op het aantal mogelijke ordeningen van stortingen en opnames van die rekening.);
- b. beperkingen die afhangen van de volgorde waarin acties geordend zijn (Wanneer voor de twee acties 'boen vloer' en 'loop naar deur' geldt dat na het boenen van de vloer er eerst vijf minuten gewacht moet worden voordat men er over heen mag lopen, dan heeft dit invloed op de starttijd van de tweede actie. Wordt deze als eerste uitgevoerd dan kunnen beide acties direct achter elkaar uitgevoerd worden.).

## INTEGRATIE

Opmerkelijk is nu dat wanneer er een complete ordening van acties op nagehouden wordt, de hierboven geschetste problemen niet spelen. De voordelen en nadelen van complete versus gedeeltelijke ordeningen blijken vrijwel complementair te zijn. Onderzoek bij het FEL-TNO heeft zich nu toegespitst op het integreren van beide concepten teneinde maximaal van de voordelen van de beide ordeningen te profiteren en de nadelen te elimineren. Gedurende het onderzoek is getracht het resulterende planningsysteem min of meer onafhankelijk te houden van het toepassingsdomein en is gekeken naar de mogelijkheden tot automatische herplanning die het systeem biedt.

Om het gedrag en de toepasbaarheid van

een dergelijk hybride planningsysteem te demonstreren zijn twee representanten gekozen voor de beide planningsconcepten waarna getracht is deze te integreren. Als representant voor het redeneren met een complete ordening is gekozen voor de Heuristic Task Scheduler (HTS). Voor het redeneren in een gedeeltelijke ordening is gekozen voor de Time Map Manager (TMM).

De HTS werd in 1985 gepresenteerd door David Miller en is ontworpen om contextafhankelijk te kunnen redeneren over een verzameling taken in een geheel geordend netwerk. Op de specifieke in's en out's van het plannen met behulp van de HTS zal hier niet verder ingegaan worden. Globaal gezien kan het HTS-planningsproces omschreven worden als het door middel van breadth-first-search zoeken in een boom van prefixen, waarbij een prefix een geheel geordende verzameling acties is, die het begin zou kunnen vormen van een rooster (schedule) van acties die bij uitvoering de gewenste toestand opleveren.

Om de combinatorische explosie bij het breadth-first-search zoeken enigszins in de hand te houden worden heuristieken gebruikt om minder belovende takken (tijdelijk) uit te schakelen (heuristics guided beam search). Verder is het zo dat wanneer tot de conclusie gekomen wordt dat een bepaalde tak (prefix) niet uitbreidbaar is, dit meestal symptomatisch is voor de uitschakeling van meerdere takken.

Eveneens in 1985 is de TMM gepresenteerd door Thomas Dean. De TMM is geschoeid op de temporele logica van McDermott waarin aangenomen wordt dat de tijd te verdelen is in een dichte lineaire ordening van instanties (tijdstipjes). Een tijdsinterval wordt dan ook gerepresenteerd als een geordend paar van twee tijdstippen. Door acties uit en feiten over de wereld nu te koppelen aan deze tijdstippen en vervolgens de tijdstippen gedeeltelijk te ordenen, ontstaat een krachtige basis (time map) voor het (eventueel niet-monotoon) redeneren over gedeeltelijk geordende acties. Daadwerkelijk plannen met behulp van de TMM bestaat uit het stapsgewijs verfijnen van min of meer abstracte doelstellingen (goals) in primitieve acties. Per verfijningsstap wordt het TMM-mechanisme gebruikt om te ontdekken of op bepaalde momenten in het plan aan de specifieke precondities van de verfijning wordt voldaan.

Hierna wordt hetzelfde mechanisme gebruikt om de resultaten van de verfijning (acties en sub-goals) te noteren.

Er zijn nu drie benaderingswijzen die tot integratie van de TMM en de HTS leiden.

Ten eerste kan men de TMM de initiële doelstelling geheel laten verfijnen tot een verzameling gedeeltelijk geordende primitieve acties om vervolgens de HTS in te schakelen om te kijken of er hieruit een rooster te vormen is dat aan elke gestelde beperking voldoet. Deze benadering levert een krachtige planner op die in staat is om contextafhankelijke conflicten te detecteren en op te lossen. Echter wanneer de schending van een context afhankelijke beperking in een reeds vroeg stadium optreedt, dan wordt deze pas aan het einde van het planningsproces ontdekt. Een hoop werk kan dan voor niets geweest zijn.

Een tweede mogelijkheid is om de HTS na iedere verfijningsstap van de TMM de gevonden taak verzameling te laten controleren op context afhankelijke conflicten. Dit 'degradeert' de HTS tot een soort consistentie-check op de TMM. Een groot nadeel van deze aanpak is dat de door de HTS gevonden complete ordening telkens weggegooid moet worden teneinde de flexibiliteit van een gedeeltelijke ordening te behouden. Bovendien zal deze benadering uit prestatie-overwegingen meestal niet wenselijk zijn.

Als derde mogelijkheid benadering kan men de HTS, pas na het bereiken van een bepaalde verfijningsgraad van de aan de TMM gestelde doelstellingen, de gevonden taakverzameling laten controleren. Deze benadering pleit voor het gebruik van heuristieken die het overstappunt aangeven. Het vinden van dergelijke heuristieken blijkt in de praktijk echter niet eenvoudig te zijn, men zou hierbij kunnen denken aan de door ervaring opgedane kennis van kritische verfijningspunten. In het door ons ontwikkelde prototype is uitgegaan van deze laatste benadering waarbij als basisheuristiek de eerste benadering genomen is. Een dergelijk gebruik van de HTS maakt het mogelijk om contextafhankelijke conflicten te detecteren en toch de flexibiliteit van een gedeeltelijke ordening te behouden.

#### **PARTITIE VAN KENNIS IN HET PLANNINGSPROCES**

In het planningsproces kan een partitie op de te gebruiken domeinkennis aange-

bracht worden. Deze partitie is min of meer generiek voor planning en scheduling en kan gebruikt worden om de parameters aan te geven van een domeinonafhankelijk planningsysteem. De drie te onderscheiden typen kennis zijn:

##### **1. Strategische domeinkennis**

Deze kennis houdt zich bezig met de vraag: hoe is een gegeven situatie te verfijnen tot een gewenste situatie? Hierin zijn twee sub-typen te onderscheiden, verfijningskennis en selectieheuristieken: *a. verfijningskennis* (Hierin worden oplossingsmethoden om bepaalde doelen te bereiken aangegeven. Bijvoorbeeld het bereiken van het doel 'Bouw huis' kan verfijnd worden door de opeenvolging: koop grond, maak grond bouwrijp, leg fundering, metsel muren, plaats dak, et cetera.);

*b. selectieheuristieken* (Wanneer er meerdere doelstellingen zijn, moet de planner over heuristieken beschikken die aangeven welke doelstelling eerst 'gepland' dient te worden (goal-selectie). Vaak betekent het oplossen van de ene doelstelling eveneens een (deel-)oplossing van een andere doelstelling. Het verstandig kiezen van de oplossingsvolgorde kan dan belangrijk zijn.).

Vaak is het ook mogelijk dat er meerdere methodieken (expansies) zijn om hetzelfde doel te bereiken. Een verstandige selectie (expansieselectieheuristiek) kan in belangrijke mate bijdragen in de kwaliteit van het plan.

##### **2. Causale domeinkennis**

Wanneer de strategie een bepaalde (geordende) verzameling acties schetst om een gestelde doelstelling te bereiken, wat zijn dan de exacte gevolgen voor de wereld waarin die acties geëxecuteerd worden?

##### **3. Wereldkennis**

Wat weet het planningsysteem over de wereld op een bepaald tijdstip? Deze kennis bevat o.a. beweringen over de wereld, acties die uitgevoerd kunnen worden en de doelen die (nog) vervuld moeten worden en de manier waarop al deze gerelateerd zijn.

#### **HERPLANNING**

Wanneer tijdens het planningsproces iets verandert in de invoergegevens moet een herplanning gemaakt worden. Zeker in complexe domeinen lijkt het zinvol te

zijn delen van het reeds gegenereerde plan te hergebruiken in plaats van alles opnieuw te plannen. In de Command & Control (C2) wereld wordt zelfs vaak doelbewust gepland ondanks dat men weet dat het plan gewijzigd gaat worden. Een aantal redenen waarom een plan herzien en/of gerepareerd moet worden kunnen zijn:

- de benodigde middelen (resources) wijzigen of blijken niet (meer) beschikbaar te zijn;
- gedurende de plangeneratie moest de planner open ruimtes in het plan toelaten, of moesten aannames gedaan worden omdat de planner met incomplete of onzekere informatie werkt. Gedurende de uitvoering van het plan of na verloop van tijd kunnen meer gedetailleerde of nieuwe gegevens beschikbaar zijn gekomen;
- de wereld reageert niet als verwacht op het uitvoeren van de geplande acties;
- er wordt een doelstelling toegevoegd of verwijderd;
- een nieuwe of veranderde strategie c.q. nieuwe verfijningskennis is beschikbaar gekomen.

Om herplanning te ondersteunen is het nodig om te redeneren over de keuzes die de planner gemaakt heeft bij de generatie van het plan. Een belangrijk onderdeel hieruit vormt de historie van het planproces. Tijdens het onderzoek is gekozen voor de notie van contexten. Een context is een verzameling asserties die de planner kan beschouwen op een bepaald punt in de generatie van het plan. Een dergelijke context zal dus informatie bevatten over:

- welke (abstracte of sub-) doelstellingen zijn bereikt en/of verfijnd;
- welke (abstracte of sub-) doelstellingen nog bereikt en/of verfijnd moeten worden;
- welke activiteiten tot nu toe gepland zijn en hoe deze t.o.v. elkaar geordend zijn;
- hoe de wereld zich gedraagt en er uit zal zien na uitvoering van elk van de acties (projectie).

Wanneer de generatie van een plan gezien wordt als het stapsgewijs verfijnen van min of meer abstracte doelstellingen in subdoelstellingen en primitieve acties, dan is de verzameling asserties waarover de planner beschikt alvorens een verfijningsstap uit te voeren de context van de

verfijning. Een dergelijke context zal dus ook de precondities die een verfijning rechtvaardigen, moeten waarmaken. De historie van de generatie van een plan zal dus bestaan uit een aaneenschakeling van contexten als gevolg van verfijningskeuzes van de planner.

Herplannen uitgaande van een verandering in de parameters van het planningsproces bestaat nu uit het 'top-down' zoeken naar de juiste context waar deze verandering effect heeft, om vervolgens vanaf dat punt een herplanning uit te voeren met de gewijzigde parameters. De complexiteit van het vinden van de juiste context is overigens afhankelijk van de reden waarom een herplanning plaats moet vinden. Wanneer bijvoorbeeld een doelstelling komt te vervallen is het vrij eenvoudig de context te zoeken waar deze doelstelling werd verwijderd. Echter een wijziging in de te gebruiken resources zal vragen om een intelligent mechanisme dat de context vaststelt waar de wijziging voor het eerst van invloed wordt.

## RESULTATEN EN CONCLUSIES

Uit het onderzoek en de bouw van een prototype zijn de onderstaande conclusies en resultaten naar voren gekomen.

1. Integratie van planners die werken met een complete en een gedeeltelijke ordening maakt het mogelijk om de schending van contextafhankelijke beperkingen te detecteren en tegelijkertijd de flexibiliteit van een gedeeltelijke ordening te behouden.
2. Het gebruik van contexten levert een basis voor het geautomatiseerd herplannen. Daarnaast vormt het ook een 'truth-maintenance' mechanisme gezien het feit dat het intrekken van een verfijning resulteert in het terugkeren naar de context waaruit de verfijning ontstaan is.
3. Ook het zoeken naar alternatieve plannen wordt in belangrijke mate ondersteund door contexten. Generatie van een alternatief plan bestaat dan namelijk uit het kiezen van een andere verfijning gegeven een bepaalde context.
4. Het gebruik van de beschreven partitie van kennis levert een handvat om het planningsalgoritme domeinonafhankelijk te maken. Dit impliceert echter niet dat de toepassing van een dergelijke planner in een bepaald domein slechts bestaat uit het invullen van een aantal parameters. Het is gebleken dat met

name de verfijningskennis zich goed laat beschrijven door een generieke specificatietaal. Echter de implementatie van de verschillende heuristieken vereist vaak een codering op programmeertaal niveau.

5. De kwaliteit van een plan hangt niet alleen af van de kwaliteit van de verfijningen maar ook van de manier waarop en volgorde waarin doelstellingen ter verfijning worden geselecteerd. Het 'slordig' selecteren kan eenvoudig leiden tot een correct doch niet optimaal plan.

6. Interfaces voor het invoeren van gegevens en het presenteren van een plan zullen in de meeste gevallen domeinafhankelijk zijn. Maar een tool voor het configureren van een planner voor een bepaald domein kan grotendeels generiek zijn. Verder zou men kunnen denken aan een generieke interface tussen de gebruiker en het redeneermechanisme, zodat de gebruiker kan participeren in het plancreatie- en planreparatieproces.

## VERDER ONDERZOEK

Het hierboven beschreven begrip 'context' leent zich bij uitstek als basis voor het parallel laten genereren van een plan of van planalternatieven. In een multiprocessor architectuur kan een dergelijke implementatie van een planningsysteem leiden tot een belangrijke performanceverbetering. Daarnaast kan het ook voor een verhoogde flexibiliteit zorgen gezien het feit dat meerdere alternatieven min of meer direct beschikbaar zijn.

De literatuur wijst op het feit dat in de huidige planningsystemen de natuurlijke hiërarchie in het begrip tijd niet of nauwelijks wordt gebruikt. Men kan hierbij denken aan hiërarchische organisaties op basis van de kalender (jaren, maanden, weken, dagen, uren, et cetera) die een eenvoudige doch doeltreffende verdeling suggereren. Het is vaak mogelijk conclusies te trekken op basis van gegevens met weinig detail en zo de overhead van het beschouwen van alle details te vermijden. Welke gevolgen het beschouwen van gegevens van verschillende granulariteit op het redeneermechanisme heeft, vergt nog aanvullend onderzoek.

Momenteel loopt op het FEL-TNO het project PRACTICAL hetgeen een acroniem is voor: 'Planning en Resource Allocation in C2-domains with Time Critical Algorithms'. In dit project wordt getracht een raamwerk te definiëren voor

het specificeren van planningsprocessen in de Command & Control wereld. Het C2-planproces kenmerkt zich bij uitstek als een dynamisch en cyclisch proces waarin onder andere de volgende onderdelen een rol spelen:

- het inschatten en vaststellen van de huidige situatie waarin 'de wereld' zich bevindt;
- een vergelijking van de huidige situatie met de gewenste situatie;
- een vergelijking van de beoogde resultaten van het huidige plan met de gewenste situatie;
- het maken van een selectie van maatregelen (eventueel met behulp van het huidige plan) om de gewenste situatie te bewerkstelligen.

In het raamwerk zal een onderscheid gemaakt worden tussen de kennis die

nodig is om een plan te genereren en de kennis die nodig is om een plan te herzien en te repareren. Uitgaande van het feit dat een (menselijke) expert inderdaad deze specifieke soort kennis gebruikt om te redeneren over zijn reeds in een eerder stadium gecreëerde plan, zal het raamwerk ruimte bieden om expliciet te kunnen redeneren over het gegenereerde plan. Het begrip context speelt in dit raamwerk een centrale rol.

Een ander aspect van het C2-planningsproces vormt de onzekerheid omtrent het gedrag van het domein. Met name in militaire toepassingen zal niet altijd volledig duidelijk zijn hoe de omgeving reageert op de acties die uitgevoerd worden. Dit heeft niet alleen zijn weerslag op de mogelijkheid tot het (geautomatiseerd) herplannen, maar met name de onvoorspelbaarheid van het domein

maakt een volledig autonoom opereren van een dergelijk systeem tot een onmogelijkheid. Het raamwerk zal dus ook ruimte moeten bieden voor participatie van de gebruiker in het redeneerproces. Dit alles zal moeten leiden tot planningssystemen, gebaseerd op een specificatie volgens het PRACTICAL-raamwerk, die in hun karakter variëren van een volledig autonoom systeem tot een beslissingsondersteunend systeem waarin de gebruiker over een volledige controle beschikt.

K

## Nederlandstalige Artificiële Intelligentie Conferentie NAIC'92

Van 18 tot 20 november aanstaande zal in Delft de vijfde Nederlandstalige Artificiële Intelligentie Conferentie worden gehouden. Deze conferentie staat zoals immer onder auspiciën van de NVKI, tevens gastheer van de in 1994 in Nederland te houden ECAI. De voorbereidingen voor deze NAIC'92 zijn inmiddels in volle gang.

Bij oppervlakkige beschouwing lijkt de NAIC'92 op de conferentie 'Kennistechnologie in Nederland', die een maand eerder wordt gehouden. Immers, in beide gevallen zijn er voordrachten over soortgelijke toepassingsgebieden, nota bene voor dezelfde branches, en in beide gevallen is er een markt. Daar houdt de overeenkomst echter op.

De NAIC onderscheidt zich van de eerder genoemde conferentie door zich te richten op fundamenteel AI onderzoek. Daarnaast is er ook aandacht voor AI-toepassingen, opdat een brug kan worden geslagen tussen de vertegenwoordigers van beide gebieden: de universiteiten en het bedrijfsleven.

De NVKI stelt te mikken op de state-of-

the-art in AI. Om deze ambitie te kunnen realiseren zijn de ingezonden artikelen aan een strenge selectie onderworpen, uitgevoerd door in totaal 56 referenten, allen gerenommeerde AI-deskundigen. Uit de 58 inzendingen werden er 20 van fundamentele aard en 13 van toegepaste aard gekozen.

### BEURS

Ook de beurs heeft een enigszins afwijkend karakter: het gaat niet zozeer om verkoop als wel om het stimuleren van overleg tussen onderzoekers, toolbouwers en gebruikers, om zo tot verbetering van de producten te komen. Een tiental kandidaten heeft zich reeds gemeld voor de op de beurs te plaatsen stands, die overigens vrij toegankelijk is.

Als extra biedt de NAIC een zestal tutorials, enerzijds gericht op juristen en overheidsfunctionarissen, bank- en verzekeringswezen en de landbouw, anderzijds voor meer technisch geïnteresseerden. In voorgaande jaren werden soortgelijke tutorials telkens als zeer waardevol beschouwd en druk bezocht.

De voordrachten zullen onder andere

handelen over juridische toepassingen, modelgebaseerde diagnose en medische toepassingen. Verwerking van natuurlijke taal - vorig jaar niet aanwezig op de NAIC/AIT'91 - vinden we zowel bij de lezingen over fundamentele studies als over toepassingen. En de NAIC zou haar naam niet waardig zijn als er geen plaatsje was ingeruimd voor een voordracht over een computerspel dat definitief is opgelost (i.c. Go-Moku). Bovendien is een van de gastsprekers dr. Jonathan Schaeffer, die onlangs met zijn programma Chinook een match tegen de wereldkampioen checkers nipt heeft verloren. Voor meer informatie over de NAIC'92 zij verwezen naar de brochure elders in dit nummer van Kennissystemen.

Ir. Ruud van der Pol

K