

De behavior-based robotica heeft een reeks van robots en architecturen opgeleverd die succesvol zijn in de echte wereld. Inmiddels is deze stroming niet meer weg te denken uit de robotica. De BDI-architectuur is een architectuur waarmee op basis van beliefs en desires wordt gedelibereerd over de intenties, aan de hand waarvan acties en plannen worden geconstrueerd. De BDI-modellen zijn inmiddels volledig omarmd door de AI en hebben hun nut bewezen in tal van toepassingen. Toch hebben de modellen nog steeds problemen met het opereren in de echte wereld. De grootste problemen zijn de computationele complexiteit van de modellen en het verwaarlozen van perceptie en actie. Bovendien ligt het gevaar van reïficatie op de loer. In dit artikel bespreekt Gert Kootstra de problemen van BDI-modellen.

## DRS. GERT KOOTSTRA

## ROBOTICA & BDI KUNNEN NIET DOOR EEN DEUR



AI in de jaren vijftig maakt Grey Walter zijn elektronische robotjes Elmer en Elsie (Walter, 1953). Elmer en Elsie bestonden uit een tweetal motoren, een lichtsensoren en wat simpele elektronica die de verbinding tussen sensor en motoren maakte. Ondanks het simpele mechanisme vertoonden de robots gevarieerd en dierlijk uitzienend gedrag, waarbij op afstand naar de lichtbron werd gereden om daar, dichterbij gekomen, weer vanaf te draaien.

Begin jaren zeventig werd een van de eerste digitale robots, Shakey, ontworpen (Nilsson, 1984). Wat voornamelijk opviel aan Shakey was dat deze niet in staat was om real-time te opereren. De robot stond minutenlang stil voordat de volgende actie werd uitgevoerd. Het construeren van een symbolisch wereldmodel en het logisch redeneren en plannen maken op basis van dit model kostte simpelweg teveel tijd.

Door het mislukken van deze poging om de klassieke manier van representeren, redeneren en plannen toe te passen op een robot in de echte wereld, door het goed functioneren van de robots van Walter en door het succes van de latere gedachte-experimenten van Valentino Braitenberg (1984) ontstond een nieuwe stroming binnen de Kunstmatige Intelligentie: De behavior-based robotica. Binnen deze stroming wordt gesteld dat de AI zich moet richten op situated en embodied systemen. Dit zijn systemen die in interactie met de echte wereld opereren (Brooks, 1991a). Gedragingen moeten zo veel mogelijk reactief zijn, met een directe koppeling tussen sensoren en actuatoren en het totale gedrag moet worden opgesplitst in meerdere simpele parallelle gedragingen (Brooks, 1986). Verder is het advies om zo min mogelijk symbolische representaties en wereldmodellen te gebruiken (Brooks, 1991b). De wereld zelf is namelijk het beste model. Dit heeft een reeks van robots en architecturen opgeleverd die succesvol zijn in de echte wereld en inmiddels is de behavior-based stroming niet meer weg te denken uit de robotica (zie, Arkin, 1998).

De BDI-architectuur (Bratman, 1987) is een voorbeeld van een architectuur waarmee symbolisch en logisch wordt geredeneerd. Op basis van beliefs en desires wordt gedelibereerd over de intenties, aan de hand waarvan, meestal door means-end analyse, acties en plannen worden geconstrueerd. De BDI-modellen zijn inmiddels volledig omarmd door de AI en hebben hun nut bewezen in tal van toepassingen. Toch hebben de modellen nog steeds problemen met het opereren in de echte wereld, ondanks dat er sinds de ervaring met Shakey veel onderzoek is gedaan om BDI-modellen te laten functioneren met onvolledige en onjuiste informatie evenals met bounded rationality. De grootste problemen zijn de computationele complexiteit van de modellen en het verwaarlozen van perceptie en actie. Laten we eens nader gaan kijken

## “In het algemeen kan worden gezegd dat de BDI architectuur door de computationele complexiteit niet geschikt is om reactieve gedragingen te modelleren.”

naar deze twee problemen.

Zoals Shakey illustreerde is het heel belangrijk voor een robot om in real-time op de echte wereld te kunnen reageren. Een robot die minutenlang nadenkt over zijn acties is simpelweg niet bruikbaar. Zeker niet bij basisgedragingen zoals het ontwijken van obstakels en navigatie. Het proces van deliberatie en het plannen van acties via means-end analyse binnen de BDI-architectuur vergt echter veel rekenkracht en is daardoor in veel gevallen niet geschikt om op een robot te gebruiken.

Neem bijvoorbeeld een Braitenberg vehicle zoals gegeven in figuur 1 (Braitenberg, 1984). Het systeem vertoont gedrag waarbij het naar een lichtbron draait en versnelt naarmate het dichterbij de lichtbron komt. Dit gedrag is te implementeren met een directe koppeling tussen sensoren en motoren, waarbij de snelheid van de linker motor wordt bepaald aan de hand van de output van de rechter lichtsensor vermenigvuldigd met een constante en vice versa. Een bijzonder simpele berekening, waardoor het gedrag efficiënt kan worden uitgevoerd.

Als we hetzelfde gedrag zouden willen implementeren in een BDI-model, zou dit veel meer rekenwerk vergen. Ten eerste zouden we de sensorische input moet indelen in een discreet aantal beliefs (b.v., {lamp links dichtbij, lamp links ver weg, ...}) evenals de output in een discreet aantal acties (b.v., {draai scherp naar rechts met hoge voorwaartse snelheid, draai flauw naar rechts met lage voorwaartse snelheid, ...}). Dit zorgt al voor een groot aantal vergelijkingen. Daarnaast zorgt het systeem van deliberatie en planning nog voor veel extra overhead. Dit BDI-model zal niet alleen veel minder efficiënt zijn, het gedrag zal ook nog eens veel minder vloeiend zijn, omdat, in tegenstelling tot de Braitenberg implementatie, de invoer en de acties gediscrètiseerd zijn. In het algemeen kan worden gezegd dat de BDI architectuur door de computationele complexiteit niet geschikt is om reactieve gedragingen te modelleren.

Naast de computationele complexiteit is er vanuit de robotica kritiek op het verwaarlozen van perceptie en actie binnen de BDI-modellen. Perceptie en actie zijn noodzakelijk voor een embodied en gesitueerd systeem. Perceptie moet het gat dichten tussen sensorische input en de beliefs van het model, terwijl een motorisch systeem de acties op hoog niveau (b.v., zet blok A op blok B) moet omzetten naar motorcommando's. Aangenomen wordt dat hiernaar onderzoek wordt gedaan op onderzoeksgedieden als computer vision en motor control en dat deze twee componenten, eenmaal ontwikkeld, als geïsoleerde systemen

kunnen worden toegevoegd aan het BDI-model. Perceptie en actie kunnen echter niet worden gezien als geïsoleerde systemen, maar zijn nauw met elkaar verbonden. Dit wordt het principe van sensori-motor coördinatie genoemd (Pfeifer and Scheier, 1999).

Aan de ene kant worden acties continu gecontroleerd vanuit de perceptie. Om bijvoorbeeld een blokje op een ander blokje te zetten is in de echte wereld, met onbetrouwbare actuatoren, constante feedback nodig. Via de sensoren moet worden gekeken waar het blokje zich bevindt om aan de hand van die informatie de beweging te controleren.

Aan de andere kant is het motorisch systeem juist nodig om de perceptie te sturen. Door deze actieve perceptie kan meer informatie uit de wereld worden verkregen dan een passief systeem kan verkrijgen. Een voorbeeld hiervan is de diepte perceptie van sprinkhanen (Sobel, 1990). Doordat de ogen van een sprinkhaan erg dicht bij elkaar staan en maar weinig overlap hebben, kunnen zij niet door middel van stereovisie afstanden tot objecten schatten. Om dit probleem op te lossen hanteren sprinkhanen een actieve methode. Door hun hoofd zijwaarts te bewegen terwijl het dezelfde oriëntatie houdt, beweegt de wereld over hun netvlies. Dit veroorzaakt motion parallax: objecten dichtbij bewegen sneller over het netvlies dan objecten verder weg. Ook bij de mens is er volop sprake van sensori-motor coördinatie. Ons oog is bijvoorbeeld omgeven door spieren die een belangrijke rol bij de perceptie spelen. Maar denk ook eens aan een klein kind dat objecten vast pakt en ronddraait om ze goed te kunnen bekijken.

Het negeren van de interactie met de wereld door middel van perceptie en actie, en bovenal de coördinatie hiertussen, is een belangrijke reden waarom BDI-modellen niet in de echte wereld functioneren.

Tenslotte dreigt er nog een ander probleem met het negeren van de interactie met de wereld. Zoals Herbert Simon (1969) aangaf met zijn metafoer van een mier op het strand, komt een groot deel van de complexiteit van het gedrag uit de interactie met de wereld en niet per definitie uit de complexiteit van het systeem an sich. Hierdoor lopen BDI-modellen het risico om een nodeloos complex model te maken van het systeem.

Beide benaderingen, de reactieve en deliberatieve, hebben hun sterke en zwakke punten. De zwakke punten van de deliberatieve benadering zijn al uitvoerig aan de orde gekomen. Het zwakke punt van de reactieve benadering is natuurlijk juist dat

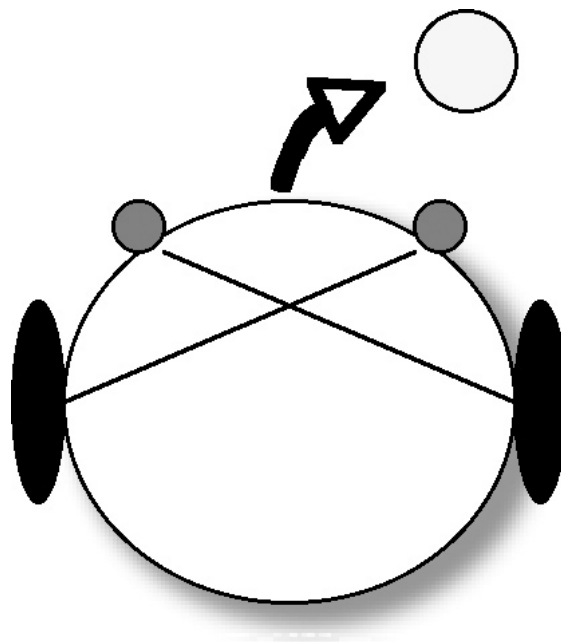
Arkin, R.C. (1998). Behavior-based Robotics. Cambridge MA: MIT Press.  
 Braitenberg, V. (1984) Vehicles: Experiments in Synthetic Psychology. Cambridge, MA: MIT Press  
 Bratman, M.E. (1987). Intention, Plans and Practical Reasoning. Cambridge, MA: Harvard University Press  
 Brooks, R. (1986). A Robust Layered Control System for a Mobile Robot. IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-2, No. 1, pp. 14-23.  
 Brooks, R. (1991a). New Approaches to Robotics. Science, Vol. 253, September, pp. 1227-1232.  
 Brooks, R. (1991b). Intelligence Without Representation. Artificial Intelligence, Vol. 47, pp. 139-159.  
 Dennett, D.C. (1978). Brainstorms. Cambridge, MA: MIT Press.  
 Nilsson, N.J. (1984) Shakey the Robot. Tech. Note 323, AI Center, SRI International  
 Pfeifer, R. and Scheier, C. (1999). Understanding Intelligence. Cambridge, MA.: MIT Press.  
 Simon, H.A. (1969). The Sciences of the Artificial. Cambridge, MA: MIT Press.  
 Walter, W.G. (1953). The Living Brain.

het niet in staat is om te redeneren over het verleden en plannen te maken voor de toekomst. De zwakke punten van de ene benadering zijn de sterke punten van de andere. Daarom wordt er veel onderzoek gedaan om hybride architecturen te ontwikkelen waarbij het beste van beide werelden wordt samengevoegd. Behavior-based gedragingen voor de real-time interactie met de wereld draaien parallel aan symbolische redeneermodellen voor het ontwikkelen van plannen voor de langere termijn. Deze plannen kunnen vervolgens door de reactieve gedragingen worden uitgevoerd (zie voor een overzicht, Arkin, 1998, hfdst. 6).

Veel van deze architecturen werken goed, maar richten zich op navigatietaken waarbij bijvoorbeeld een A\* planner wordt gebruikt voor het plannen van de route. Pogingen om BDI-modellen te integreren in hybride systemen zijn nog niet succesvol. Persoonlijk denk ik dat het gat tussen high-level symbolisch redeneren en de low-level gedragingen nog te groot is om optimaal gebruik te kunnen maken van de beliefs, desires en intentions op een robot. Het verkrijgen van beliefs uit sensordata en het vertalen van acties op hoog niveau naar motor commando's zijn nog onopgeloste problemen.

Een laatste probleem is de relatie tussen modellen en de werking van het brein. Het is verleidelijk om aan te nemen dat het brein net zo werkt als je model (dit wordt reïficatie genoemd). Maar zoals Dennett (1978, hfdst. 1) aangeeft is de intensional stance (modelleren van een systeem in termen van beliefs, desires en intentions) puur een pragmatische aanpak en mogen hieruit geen aannames over de daadwerkelijke processen in het brein worden gedaan. Hetzelfde geldt natuurlijk voor de behavior-based modellen. Bij beiden ligt het gevaar van reïficatie op de loer. Gebruikers moeten er attent op zijn dat de modellen niet leiden tot foute aannames over de onderliggende processen in het brein.

Samengevat kunnen we zeggen dat robotica en BDI-modellen (nog) niet door een deur kunnen. De symbolische redeneermodellen zoals het BDI-model hebben een tweetal grote problemen waardoor ze niet functioneren in de echte wereld. Ten eerste is de computationele complexiteit te groot voor real-time gedrag. Ten tweede is er te weinig aandacht voor de interactie met de echte wereld via perceptie, actie en sensori-motor control.  $\emptyset$



FIGUUR 1: EEN BRAITENBERG VEHICLE