

SAMENVATTING

In de toekomst —misschien al over 50 jaar— zullen robots niet meer uit ons dagelijkse bestaan weg te denken zijn. Zo zullen ze tal van huishoudelijke taken, overheidsdiensten en industriële operaties gaan uitvoeren. Ook kunnen ze gevaarlijke taken tijdens reddingsoperaties uit handen nemen.

De robots van nu zijn nog lang niet in staat om dit soort complexe taken autonoom uit te voeren. Veel taken lijken eenvoudig voor mensen, zoals het serveren van koffie, omdat we in ons leven intensief getraind zijn om interactie met de omgeving te hebben. Echter, robots moeten nog vele uitdagingen overwinnen: ze moeten een taak begrijpen en in deeltaken opdelen, de omgeving waarin ze werkzaam zijn interpreteren en in kaart brengen, de obstakels ontwijken terwijl ze navigeren, objecten verplaatsen en manipuleren, en ze dienen sociale interacties met hun omgeving te kunnen hebben.

Hedendaagse robots voeren taken uit die te monotoon, smerig of gevaarlijk voor ons zijn. Denk maar eens aan het verwijderen van giftig afval of het uitvoeren van onderhoudswerkzaamheden in de ruimte. Ook in de industrie zijn robots met succes ingezet voor het doen van repeterende en gevaarlijke taken. Naast de industrie heeft ook de consument de robot ontdekt. Erg populair is de speelgoed-robothond, *Aibo*, die door Sony op de markt is gebracht. Hij is in staat om zich voort te bewegen, de omgeving te 'zien' en op gesproken commando's te reageren. Andere veelverkochte huishoudelijke robots zijn stofzuigers en grasmaaiers die op eigen houtje hun taak volbrengen.

Eén van de fundamentele taken voor robots is het plannen van hun bewegingen terwijl ze botsingen met obstakels in hun omgeving voorkomen. Deze taak vormt het centrale thema van dit proefschrift. Hierin wordt met name bewegingsplanning voor rigide en aaneengeschakelde robots in statische en tevens bekende virtuele omgevingen besproken.

Het proefschrift is opgesplitst in twee delen. In het eerste deel worden sampling-gebaseerde bewegingsplanningstechnieken vergeleken en geanalyseerd. Er zal dieper worden ingegaan op de *probabilistische wegenkaartmethode* ('Probabilistic Roadmap Method'). Het doel van de methode is het maken van een

wegenkaart van de omgeving die de robot kan gebruiken om een pad van A naar B te plannen. Omdat deze omgeving bekend wordt geacht, kan voor elke mogelijke positie van de robot getest worden of hij al dan niet een obstakel raakt. De specificatie van een dergelijke positie wordt ook wel een *sample* genoemd. De methode genereert een willekeurige verzameling van botsingsvrije samples. Zij vormen de knooppunten van de wegenkaart. Voor bepaalde zorgvuldig gekozen paren uit deze verzameling probeert de methode de twee betreffende samples met elkaar te verbinden met een lokaal pad. Zo'n pad is meestal een eenvoudige rechtlijnige verbinding tussen de samples. Als het pad botsingsvrij is, dan wordt het als een verbinding in de wegenkaart opgenomen. Een pad tussen een bepaalde start- en eindpositie kan de robot vervolgens in twee stappen vinden: eerst moeten deze posities als samples toegevoegd worden aan en verbonden worden met de wegenkaart. Dan kan de robot simpelweg de wegenkaart gebruiken om tussen deze posities te navigeren.

De methode is succesvol toegepast in een grote verscheidenheid aan applicaties waaronder CAD/CAD applicaties, computersimulatie, computeranimatie, biologie, en medische en interactieve applicaties. Het succes kan toegerekend worden aan het feit dat de methode geen expliciete representatie van de vrije bewegingsruimte hoeft uit te rekenen. De belangrijkste operatie is namelijk het testen of een plaatsing van de robot botst met een obstakel. Deze operatie kan tegenwoordig efficiënt uitgevoerd worden. De tweede reden van het succes is dat problemen die 'redelijk' zijn positieve bereikbaarheidseigenschappen hebben. Zo kan de vrije bewegingsruimte van een redelijk probleem vaak gerepresenteerd worden door een kleine verzameling samples waarbij elke sample verbonden kan worden met andere samples die 'ver weg' liggen. Hierdoor vindt de methode vaak snel een pad, zelfs als er veel obstakels zijn of als de robot veel verschillende typen bewegingen kan maken.

De afgelopen vijftien jaar hebben veel onderzoekers aan deze methode gewerkt. Dit leidde tot vele varianten van de methode met elk zijn eigen verdiensten. Het is lastig om deze varianten te vergelijken aangezien ze door verschillende mensen getest werden op verschillende typen virtuele omgevingen met verschillende computers en programma's.

In het eerste deel van dit proefschrift zal een vergelijkende studie worden verricht van gangbare varianten, geïmplementeerd op één systeem en getest op dezelfde problemen en dezelfde computer. In het bijzonder worden de verschillende manieren die bepalen of een lokaal pad botsingsvrij is, en technieken die bepalen hoe de samples gekozen en met elkaar verbonden worden bestudeerd. De resultaten zijn verrassend in de zin dat de technieken vaak anders presteren dan wordt geclaimd door de ontwerpers.

Naast het vergelijken op basis van het vinden van één vooraf gespecificeerde *query* (specificatie van het begin- en eindpunt van een pad), zal er een analyse worden gemaakt op basis van het kunnen oplossen van elk mogelijke *query*. De experimenten laten zien —in tegenstelling tot de algemene overtuiging— dat het verbonden krijgen van de samples in het algemeen veel lastiger is dan het met de samples overdekt krijgen van de botsingsvrije ruimte. Het verschil wordt groter naarmate er nauwere passages in de omgeving aanwezig zijn. Deze kennis kan men gebruiken om problemen adequater op te lossen. Zo wordt er een nieuwe krachtigere methode gecreëerd die de samples verbindt. Ook een hybride samplingmethode en een beter begrip van de parameters leiden tot een effectieve aanpak van het bewegingsplanningprobleem.

Het tweede deel van het proefschrift gaat over de kwaliteitsaspecten van paden en wegenkaarten. Omdat het soms lastig kan zijn om een pad te creëren, richten algoritmen zich slechts op het vinden van een enkele oplossing. Echter, voor de meeste toepassingen is het van belang dat er genoeg speling is tussen het pad en de obstakels, want het is vaak lastig om de precieze positie van de robot te meten en te controleren. Het bewegen langs een pad dat een bepaalde minimale hoeveelheid speling heeft, reduceert de kans op botsingen die veroorzaakt kunnen worden door deze onzekerheden. Ook dient het pad geen overbodige bewegingen te bevatten, want deze zullen langer duren om uit te voeren. Ten slotte dient een dergelijk pad snel berekend te kunnen worden.

Er worden twee algoritmen voorgesteld die de speling tussen het pad en de obstakels vergroten. De eerste is snel, maar de methode is beperkt tot rigide, schuivende robots. De tweede is langzamer, maar de methode kan omgaan met een breed perspectief aan robots zoals vrij-bewegende en aaneengeschaakte robots. Een groot voordeel van deze algoritmen is dat de speling langs paden nu efficiënt vergroot kan worden zonder dat complexe datastructuren en algoritmen nodig zijn.

Verder worden er algoritmen bestudeerd die de lengte van een pad kunnen verkleinen. Na observatie blijkt dat bestaande algoritmen lang niet altijd overvloedige (rotationele) bewegingen van een robot kunnen wegnemen. Een nieuw algoritme wordt voorgesteld dat deze succesvol verwijderd.

Daarna zal de *Reachability Roadmap Method* (RRM) worden geïntroduceerd welke kleine wegenkaarten creëert voor twee- en driedimensionale problemen. Zo'n kleine wegenkaart verzekert het vinden van een pad binnen een kort tijdsbestek en een minimaal gebruik van de hoeveelheid geheugen voor het opslaan van de wegenkaart. Ten slotte garandeert de methode dat een pad altijd gevonden wordt (indien hij bestaat) bij een gegeven opdeling in cellen van de vrije bewegingsruimte.

De genoemde technieken zullen worden verenigd met enkele nieuwe technieken om wegenkaarten te maken die in het bijzonder geschikt zijn voor interactieve virtuele omgevingen. Hierbij wordt de RRM als uitgangspunt gebruikt. Om te beschikken over alternatieve routes en korte paden worden nuttige keuzes aan de wegenkaart toegevoegd. Vervolgens wordt speling aan de wegenkaart toegevoegd, wat men in staat stelt om zonder vertraging paden met hoge kwaliteit te verkrijgen.

Ten slotte wordt aangegeven dat het nuttig is om in de nabije toekomst een bibliotheek van bewegingsplanningstechnieken te bouwen die men als 'black box' kan gebruiken. Zodoende hoeven gebruikers niet na te denken over parameterkeuzes die meestal weinig zinnig voor ze zijn. In dit proefschrift wordt geprobeerd om deze keuzes zo veel mogelijk te automatiseren. Ook wordt inzicht verschaft in het effect van alle parameters op de besproken methoden. Hoewel de software, algoritmen en resultaten een basis voor de bibliotheek verschaffen, zal verder onderzoek nodig zijn de black box mogelijk te maken.

Het creëren van een dergelijke bibliotheek zal essentieel zijn voor de ontwikkeling van autonome robots.