

Fuzzy Logic

Jaap Verkerk

Mensen kunnen sommige besturingsproblemen, die moeilijk te automatiseren zijn, uitstekend oplossen. Ook wanneer het met een PID-regelaar niet lukt, lukt het met fuzzy logic vaak wel een goede besturing te maken. Fuzzy logic (vage logica) is een nieuwe regelstrategie waarmee regelproblemen van complexe aard op relatief eenvoudige wijze zijn op te lossen. Het wordt tegenwoordig toegepast in wasmachines, fotocamera's, bij de regeling van verkeerslichten en procesbesturing. Ook wordt het toegepast voor servo-regelingen.

Om een beter inzicht te krijgen in de mogelijkheden en de kwaliteit van een fuzzy-regelaar hebben de Fijnmechanische studenten Dennis Dunne en René Jansen een opstelling gebouwd die de kwaliteit van de fuzzy-regelaar demonstreert. Daarvoor werd een lastig te regelen instabiel proces gekozen: het dynamisch regelen van de positie van een kogel die op een wip balanceert, zie figuur 1.

Geschiedenis

De klassieke (booleaanse) logica is gebaseerd op waarheden en onwaarheden. Zij is genoemd naar de Engelse wiskundige Boole die rekenregels ontwikkelde waardoor een wiskundige benadering van de logica mogelijk werd. In 1923 werd door B. Russell (psycholoog) in een artikel onder de titel "Vagueness" uiteengezet dat de klas-

sieke logica gebaseerd is op het concept van een heldere en eenduidige vraagstelling waarop maar één antwoord mogelijk is. In de praktijk van het dagelijkse leven komen deze zwart-wit situaties nauwelijks voor maar zijn vraagstellingen en antwoorden veel genuanceerder en vager.

Russell constateerde dat de menselijke logica zeer effectief met vage ideeën en probleemstellingen kan omgaan en conclusies kan produceren op basis van vage uitgangspunten. Op basis van de klassieke logica bleken wiskundigen echter niet in staat beslissingsstrategieën te modelleren die met betrekkelijke zekerheden kunnen omgaan.

Pas in 1965 werd voor het eerst een bruikbare wiskundige benadering van vage regels voorgesteld door L.A. Zadeh (psycholoog aan de Universiteit van Californië). Met vaste rekenregels konden vage problemen worden opgelost met eenzelfde effectiviteit als mensen dit doen. Kort daarna definieerde Zadeh logische termen als waarheidsgehalte, en vage rekenregels (fuzzy sets).

Er was nog een aantal problemen die om oplossing vroegen:

- de definitie van het waarheidsgehalte bleef zeer subjectief,
- er werden verschillende soorten waarheden gebruikt, zodat een meerdimensionale waarheidsruimte gevormd werd,
- er was geen specifieke set logische regels, maar ze waren aangepast aan het specifieke probleem.

In 1978 werd door Baldwin (Universi-

ty of Bristol) een methode geïntroduceerd die uitgaat van waarheidsgehalten (truth values) in een en dezelfde waarheidsruimte. Met deze aanpak bleken de resultaten van het menselijk redeneren goed te evenaren.

Vage logica en de wiskundige benadering ervan speelt een grote rol in de psychologie. Internationale uitwisseling vindt onder andere plaats in de International Fuzzy Systems Association ISFA.

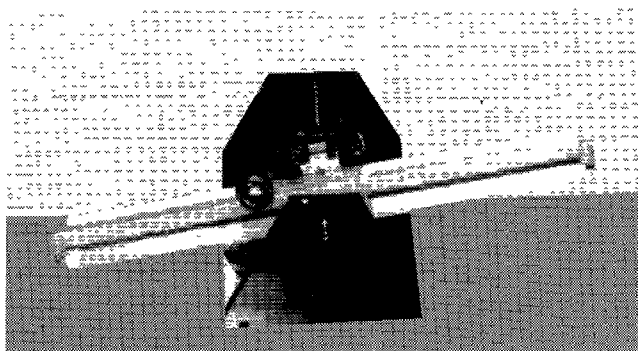
Fuzzy logic

Met de mens als regelaar worden veel besturingsproblemen opgelost door een gedoseerde actie die op ervaring berust. Gevoelsmatig worden de regelacties met "een beetje meer" of "een beetje minder" bijgestuurd. Dit in tegenstelling tot de technisch logische begrippen die alleen ja of nee, of 0 of 1 kunnen zijn.

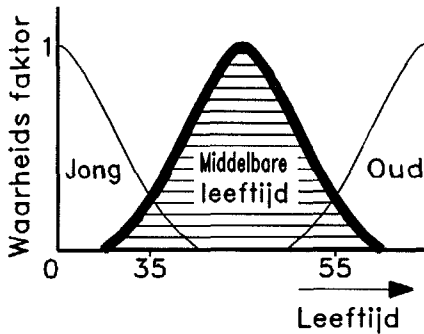
Het verschil in benadering bij vage logica en de traditionele - booleaanse - logica is het beste uitleggen aan de hand van een eenvoudig voorbeeld:

Iedereen heeft een bepaalde voorstelling van het begrip 'middelbare leeftijd'. Laten we ervan uitgaan dat de middelbare leeftijd 45 is. Toch kan van mensen tussen de 35 en 55 jaar niet gezegd worden dat ze beslist niet van middelbare leeftijd zijn. Er zijn geen scherp gedefinieerde grenzen, maar voor het gevoel is het waarheidsgehalte van de bewering afhankelijk van de leeftijd zelf. In figuur 2a wordt een vage verzameling weergegeven met een waarheidsgehalte dat varieert tussen 0 en 1. De verzameling wordt begrensd door een zogenaamde *lidmaatschapsfunctie*. Deze geeft aan hoe het waarheidsgehalte afneemt wanneer de leeftijd verder van de middelbare leeftijd verwijderd is.

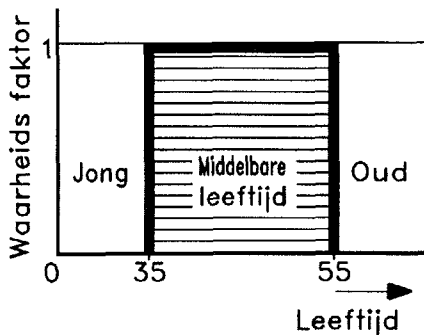
In dezelfde figuur staan ook de verzamelingen 'jong' en 'oud' afgebeeld. Doordat de gebieden elkaar overlappen kan de ene vage verzameling geleidelijk overgaan in een andere, waardoor het mogelijk wordt een waarde te geven aan een subjectief begrip. Voor iemand jonger



Figuur 1 De kogel die dynamisch balanceert op de wip. In dit geval wordt een bepaald bewegingspatroon opgelegd, zodat de kogel heen en weer rolt.



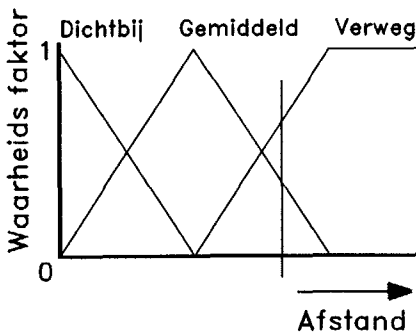
Figuur 2a Vage verzameling



Figuur 2b Concrete verzameling

dan 45 jaar bestaat dus een waarheidsgehalte zowel voor bewering "jong" als voor de bewering "middelbaar".

Gewone, concrete verzamelingen, zoals in figuur 2b, kennen scherp afgebakende grenzen. Volgens deze figuur is iemand van 34 jaar pas na zijn verjaardag van middelbare leeftijd. Deze onnatuurlijke overgang ontstaat doordat het waarheidsgehalte alleen 0 of 1 kan zijn. Door de vorm van de verzameling in fi-



Figuur 3a Opdeling van een traject in drie verzamelingen dichtbij, op gemiddelde afstand, verweg. Wanneer een auto van rechts naar links rijdt zal hij alle drie de verzamelingen doorlopen

afstand	dichtbij	gemiddeld	ver weg
snelheid		remkracht	
laag		niet	niet
gemiddeld	middelmatig	middelmatig	niet
hoog	hard	hard b)	middelmatig a)

Tabel 1 Kennisregels. In de tabel kunnen nu de intuïtief te kiezen waarden worden ingevuld voor het afremmen. In dit voorbeeld kan worden gekozen uit hard, middelmatig en niet remmen. a) en b) zijn gerelateerd aan de kennisregels A en B in figuur 4.

guur 2a te vereenvoudigen tot een driehoek blijft het nog steeds een vage verzameling, maar het waarheidsgehalte is nu rekentechnisch eenvoudiger te bepalen. Deze vereenvoudiging mag worden toegepast omdat door onderzoek bekend is dat een vage regelaar vrij ongevoelig is voor de exacte vorm van de verzameling. Van belang is dat de lidmaatschapsfunctie continu is en geleidelijk verloopt.

Fuzzy logic als regelaar

Hoe fuzzy logic als regelaar werkt is het beste uit te leggen aan de hand van een ander voorbeeld: een auto die met enige snelheid op een obstakel af rijdt en tijdig tot stilstand moet komen. Daarvoor zijn drie stappen noodzakelijk:

- het bepalen van de afstand tot het obstakel en de snelheid van de auto in (menselijke) vage termen, de *fuzzificatie* (vervaging);
- het toevoegen van kennisregels om de gewenste acties en het waarheidsgehalte ervan te bepalen;
- het samenvoegen van de gewenste acties op basis van hun waarheidsgehalte tot een eenduidig stuursignaal, de *defuzzificatie* ('ontvaging', *verduidelijking*).

Fuzzificatie

Om te bepalen hoe hard er geremd moet worden, moeten we weten of de auto al dichtbij, op gemiddelde afstand of op grote afstand is en wat het waarheidsgehalte is.

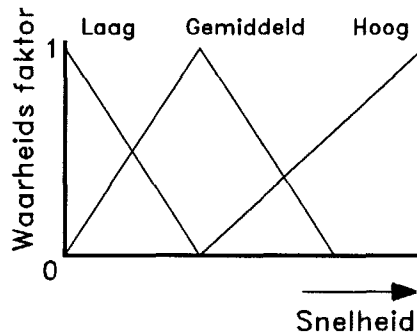
Dit wordt als volgt aangepakt. Het tot het obstakel af te leggen traject kan in drie vage verzamelingen worden opgedeeld, zoals afgebeeld in figuur 3a: dichtbij, op gemiddelde afstand, verweg. Wanneer een auto op het obstakel af rijdt zal hij alle drie de verzamelingen doorlopen.

Het waarheidsgehalte van de positie die de auto op elk moment heeft wordt nu bepaald door naar het waarheidsgehalte van de overlappende verzamelingen te kijken. Hetzelfde kan met de snelheid gedaan worden. Deze omzetting van de invoergegevens afstand en snelheid naar vage waarden wordt *fuzzificatie* (vervaging) genoemd.

Kennisregels

Wanneer we nu zowel naar de afstand tot het obstakel als naar de snelheid van de auto kijken, dan kunnen we aangeven hoe hard we moeten remmen om een botsing met de muur te voorkomen. Een makkelijk hulpmiddel is het invullen van de matrix van tabel 1 door te kiezen voor hard, middelmatig of zacht remmen. Hier komt dus onze kennis van het proces, het autorijden om de hoek kijken, door het formuleren van zogenaamde *kennisregels*. Bijvoorbeeld: als de auto vlakbij de muur is en de snelheid is middelmatig, dan moeten we *hard* remmen.

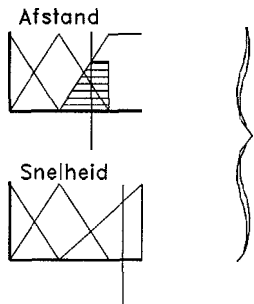
In een drie bij drie matrix, zoals in dit eenvoudige geval, zijn negen kennisregels opgeslagen. Het uiteindelijke aantal kennisregels valt echter mee omdat we hier maar drie regelacties onderscheiden. We zullen dus waarschijnlijk een aantal kennisregels kunnen combineren.



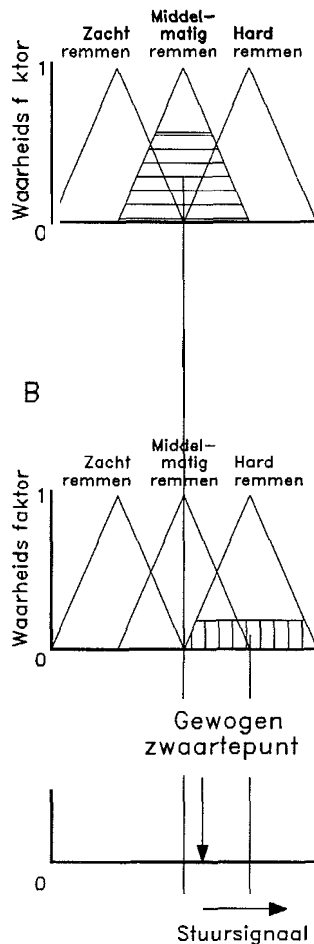
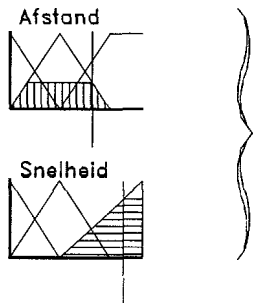
Figuur 3b Het stuursignaal bestaat ook uit een drietal lidmaatschapsfuncties. De met de kennisregels uit de afgelegde weg en snelheid berekende waarheidsgehalten worden in de figuur ingevoerd

Fuzzy Logic

Kennisregel A



Kennisregel B



Figuur 4 Defuzzificatie Afstand en snelheid leveren met de kennisregel A en B waarheidsgehalten voor middelmatig en hard remmen. Het gewogen zwaartepunt van beide is bepaald voor de grootte van het stuursignaal naar de remmen.

Defuzzificatie

Het omzetten van vage waarden naar concrete waarden voor een stuursignaal gebeurt op omgekeerde wijze en wordt *defuzzificatie (verduidelijking)* genoemd.

Het stuursignaal kent de gekozen drie

lidmaatschapsfuncties: niet remmen, zacht remmen, hard remmen. De grootte van het stuursignaal wordt berekend met de kennisregels berekende en het waarheidsgehalte van snelheid en afgelegde weg voor elk van de drie functies.

In de grafiek van figuur 4 wordt dit als

trapeziumvormige oppervlakken afgebakend die het waarheidsgehalte weergeven. Hieruit kan een waarde voor het stuursignaal bepaald worden door bijvoorbeeld de ligging van het gezamenlijke zwaartepunt te berekenen. De ligging van het zwaartepunt langs de horizontale as bepaalt nu eenduidig de grootte van het stuursignaal dat naar de remmen gaat.

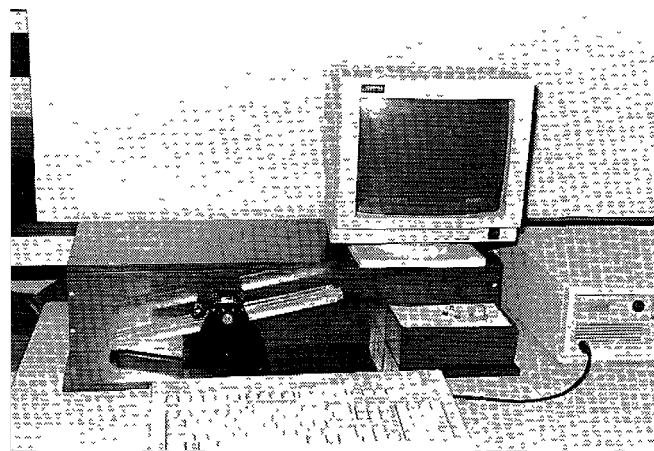
De proefopstelling

René en Dennis bouwden de proefopstelling, figuur 5, met de kogel die op de wip moet balanceren door de wip in het midden aan te drijven. Voor het besturen van het proces moesten eerst enkele sensoren worden aangebracht om de positie en snelheid van de kogel, en de stand van de wip te detecteren.

Positiesensor

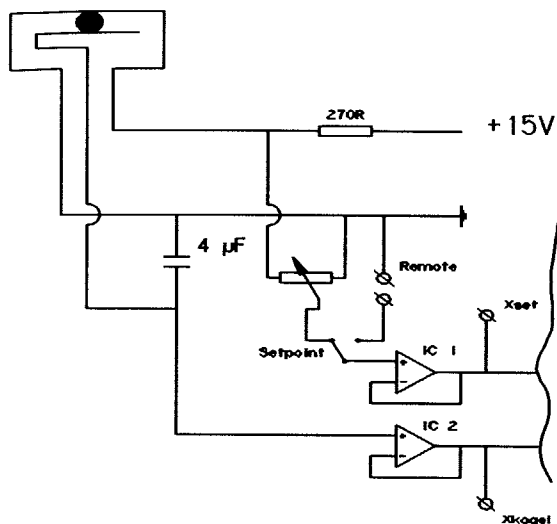
Voor het regelen van de positie van de kogel op de wip is het zaak op elk moment de positie van de kogel te kennen. Dennis en René lieten de kogel daarvoor over twee draden rollen, een weerstanddraad en een meetdraad die in de lengterichting van de wip gespannen waren. Over de weerstanddraad werd een spanning van 15 Volt aangebracht. Tijdens het rollen van de kogel over de draad was er nog al wat ruis in het signaal doordat de kogel niet overal even goed contact maakte. Er kwamen zelfs pieken voor die op korte onderbrekingen van het signaal wezen.

Dit zou voor de regeling van het servosysteem een behoorlijk probleem kunnen opleveren doordat niet alleen de positie maar ook de snelheid van de kogel (door differentiatie) van het meet-signaal worden afgeleid.



Figuur 5 Proefopstelling met een PC, waarin een fuzzy besturingskaart zit, voor de besturing

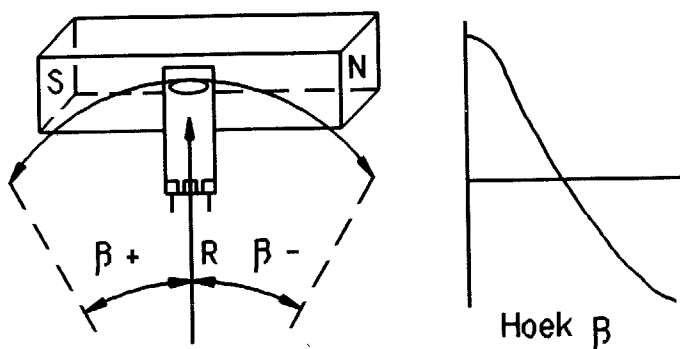
Een oplossing werd gevonden door een elektronische schakeling te maken die het signaal vasthield wanneer het onderbroken werd. Dit werd bereikt door het signaal via een kleine condensator ($4 \mu\text{F}$) op een versterker met een zeer hoge ingangsimpedantie (10^{10} ohm) aan te sluiten, zie figuur 5. Hiervoor werd een Opamp (Operational Amplifier) van het type CA3160 toegepast, die een FET (Field Effect Transistor) ingang heeft. De benodigde stroom ligt in het pico-ampèregebied (10^{-12} A)



Figuur 6 Meting van de positie en vasthouden wanneer het signaal onderbroken wordt

Aan de uitgang leverde de controller een spanning van ± 10 volt voor het aansturen van de versterker van de servomotor die de wip laat roteren.

Op het beeldscherm kunnen de ingangssignalen en het uitgangssignaal zichtbaar worden, zodat snel een indruk ontstaat van de kwaliteit van de gekozen lidmaatschapsfuncties en de waarden voor de gekozen kennisregels. Bij iedere responsie was de bijdrage van elke kennisregel zichtbaar te maken. Zo kon bij een foute responsie achterhaald worden welke kennisregel niet krachtig genoeg reageerde. Door het aanpassen van de lidmaatschapsfuncties kon dit eenvoudig worden aangepast. Het verfijnen van de regeling was daarmee betrekkelijk eenvoudig te realiseren.



Figuur 7 Hall-opnemer voor het meten van de rotatiehoek

Wanneer de kogel nu geen contact zou maken wordt de waarde van het meetsignaal vastgehouden doordat via de Opamp nauwelijks lading uit de condensator weglekt. Zodra de kogel de draden weer goed doorverbindt zal als gevolg van de lage weerstand van de meetdraad de juiste meetspanning snel ($< 0,25$ ms) bereikt zijn. Vergelijken met een aantal andere mogelijkheden gaf deze oplossing het beste resultaat, omdat het positie signaal de veranderingen van de verplaatsing van de kogel voldoende snel volgt. Ook vertoont het geen pieken of sprongen meer waardoor het goed te differentiëren is. Figuur 6 geeft het schema van de schakeling weer.

Hoekopnemer

De voorkeur ging uit naar een contactloze hoekopnemer die direct, dus zonder overbrengingsfouten, de stand van de wip weergeeft. Dennis en René ko-

zen uit een aantal mogelijkheden voor een Hall-element, zie figuur 7. Bij een afstandverandering ten opzichte van een permanente magneet geeft dit element een signaal dat evenredig is aan de verandering in magnetische veldsterkte. Doordat er reeds een versterker in het element is geïntegreerd, is de aansluiting eenvoudiger dan bijvoorbeeld van capacitieve opnemers. Dit heeft bij de keuze van het meetelement een belangrijke rol gespeeld.

Fuzzy controller

De meetsignalen van de positie en snelheid van de kogel en hoekverandering van de wip werden via een A/D-converter toegevoerd aan een vage controller, die als insteekkaart in een personal computer werd geplaatst. Met de bijgeleverde software werd de gewenste regelstrategie ingesteld. Daarbij zijn zeven lidmaatschapsfuncties verdeeld over de lengte van de wip.

Noot

De hier beschreven opstelling was onderdeel van de afstudeeropdracht van Dennis en René bij de afdeling Fijnmechanische Techniek van de Hogeschool Utrecht. Met het onderzoek dat op school werd uitgevoerd wilde de docent A. Honders een bijdrage aan de vernieuwing van de onderwijskennis realiseren.

Voordat Dennis en René met de bouw van deze experimentele opstelling begonnen hebben ze met TUTSIM een uitvoerige analyse gemaakt om de prestatie van een PID-regelaar en de vage regelaar te vergelijken. Een echte winnaar was niet aan te wijzen, maar de voorkeur ging toch uit naar de vage regelaar vanwege de grote eenvoud van het instellen. Met name de aansluiting bij de logische begrippen die in het dagelijkse leven gebruikt worden geeft meer gevoel voor wat er gebeurt.

Daartegenover staat dat het niet eenvoudig te bewijzen is dat de vage regelaar met de gekozen instellingen onder alle omstandigheden het gewenste regelgedrag zal laten zien.

Met het verslag van hun werk wonnen M&R begin 1993 de Fuzzy Logic prijs, die bestond uit een oorkonde en een bedrag van f 10 000 omdat het op inzichtelijke wijze de toepassingsmogelijkheden van de vage regelaar demonstreerde.