

Ekspertski sistemi

Lekcija 8: RASPLINUTA LOGIKA (FUZZY LOGIC)

Rasplinuta logika

- Eksperti se često oslanjaju na zdrav razum pri rešavanju problema - neodređene i dvosmislene izraze. Na primer, kada motor postane **stvarno vreo**, treba smanjiti **malo** brzinu.
- Rasplinuta logika se pojavila negde oko 1920. god., kada ju je predložio Lukasiewicz, da bi je 1965 proširio Zadel.
- Rasplinuta logika je grana logike koja koristi stepen članstva u skupovima, a ne striktno true/false članstvo.
- Rasplinuta logika se prvenstveno odnosi na kvantifikaciju i zaključivanje i neodređenim ili rasplinitim izrazima, koji se pojavljuju u prirodnom jeziku. Ovi neodređeni izrazi se najčešće nazivaju lingvističke promenljive.

Lingvističke promenljive

tipične vrednosti

temperatura

vrelo, hladno

visina

nizak, srednjeg rasta, visok

starost

mlad, star

- U rasplinitim ekspertskim sistemima koriste se lingvistička produkciona pravila:

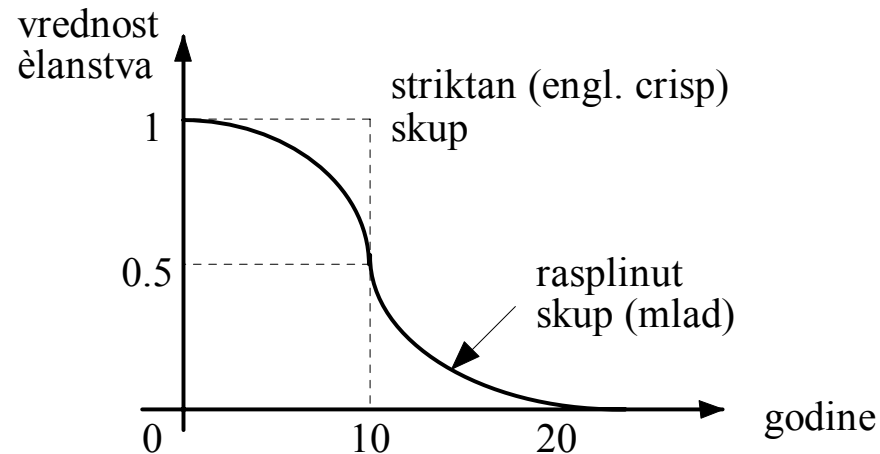
Pravilo 1: IF brzina je mala

THEN učiniti veliko ubrzanje

Rasplinuti skup

- Rasplinuti skup dodeljuje vrednost članstva između 0 i 1 koji odražava prirodnije pripadnost člana skupu.
- Neka se razmatra skup koji se sastoji od dece. Ako je osoba starosti 5 godina, može joj se dodeliti vrednost članstva 0.9, a ako je starosti 13 godina 0.1. U ovom primeru starost je lingvistička promenljiva, a mlad jedan od njenih rasplnutih skupova. Drugi skupovi koji se mogu razmotriti su star, sredovečan, ...

Rasplinuti skup



Funkcija članstva se definiše sa

$$\mu_A(x): x \longrightarrow [0, 1]$$

gde su: x - događaj ili element, μ - funkcija članstva i A - raspliniti skup, odnosno

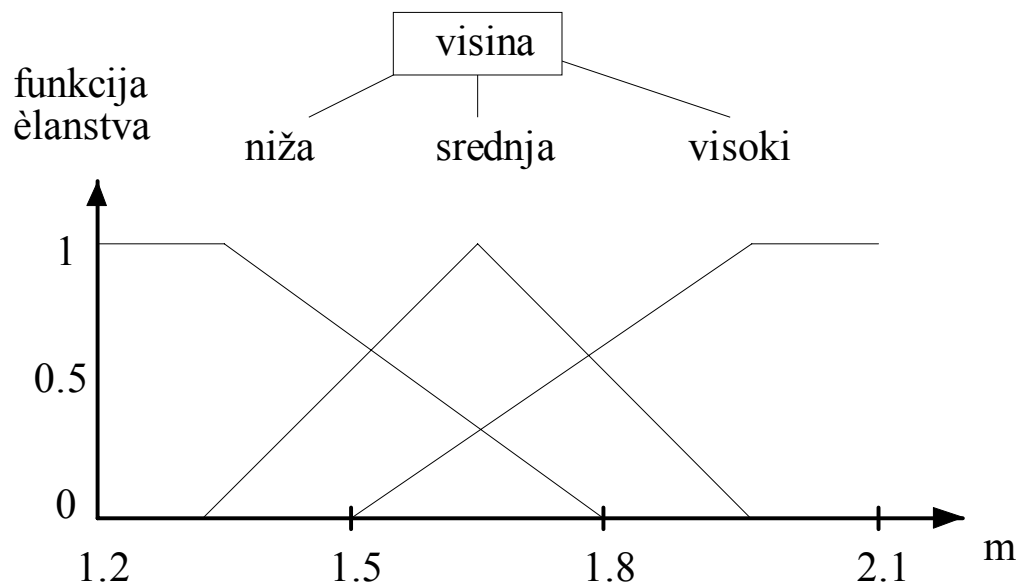
$$\mu_A(x) = Degree(x \in A)$$

$$0 \leq \mu_A(x) \leq 1$$

Formiranje rasplinutih skupova

- Da bi se predstavio raspliniti skup, potrebno je definisati funkciju članstva.
- Jedan pristup koji se može koristiti je da se propita grupa ljudi u pogledu njihovog shvatanja izraza koji želimo da prikažemo rasplinutim skupom.
- Koncept visine osobe: možemo pitati svakog pojedinca u grupi da kaže šta on podrazumeva pod visokom osobom. Posle dobijanja odgovora za opseg visina, možemo izvršiti jednostavno usrednjavanje da bi dobili raspliniti skup za visoke ljude.
- Ovu funkciju možemo koristiti da opišemo naše verovanje da neka osoba pripada skupu visokih ljudi. Slično možemo uraditi za slučajeve niskih i srednje visokih ljudi.

Formiranje rasplnutih skupova



Kada definišemo više rasplnutih skupova nad jednim pojmom (visina), onda se takvi skupovi nazivaju rasplnuti podskupovi.

Drugi pristup u opisu rasplnutih skupova se zasniva na neuralnim mrežama.

Predstavljanje rasplinutih skupova

Ako je:

X - pojam koji se sastoji od diskretnih elemenata $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$

A - rasplnut skup definisan za X,
tada imamo

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_n) \text{ gde je } a_i = \mu_A(x_i)$$

$$\text{ili } A = (a_1 / x_1, a_2 / x_2, \dots, a_n / x_n)$$

Na primer,

$$\text{VISOK} = (0/1.2, 0.25/1.5, 0.7/1.8, 1/2.1)$$

Standardna notacija je:

$$A = \mu_1 / x_1 + \mu_2 / x_2 + \dots + \mu_n / x_n = \sum_{i=1}^n \mu_i / x_i$$

Predstavljjanje rasplinutih skupova

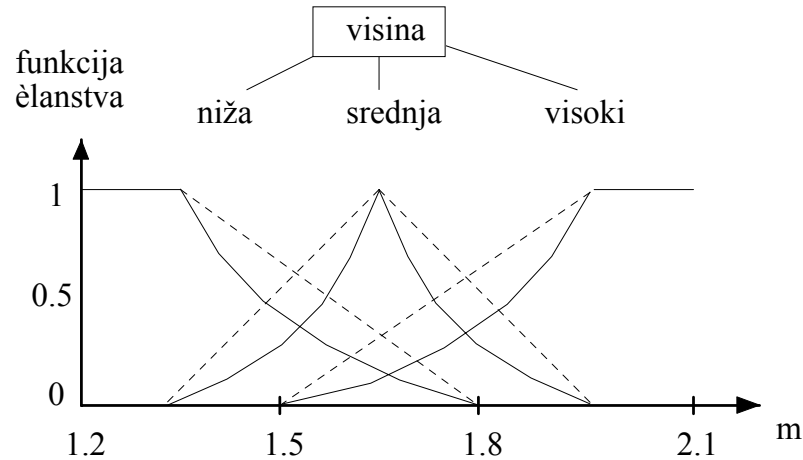
- Ako je X kontinualna funkcija:

$$A = \int \mu_A(x) / x$$

- Za kontinualan skup elemenata potrebna nam je funkcija koja preslikava elemente u njihove vrednosti funkcije članstva (sigmoid, gaussian,...). Međutim, najčešće se to radi preko razlomljene linearne funkcije.

Hedges

U normalnoj komunikaciji, ljudi dodaju još više neodređenosti upotrebom priloga vrlo, neznatno i sl. Na primer, vrlo visok.



Hedges

Koncentracija (vrlo)

Operacija koncentracije ima za posledicu dalje smanjivanje vrednosti članstva za one elemente koji imaju manje vrednosti.

$$\mu_{CON(A)}(x) = (\mu_A(x))^2$$

Dilatacija (nešto)

Ovom operacijom se povećava vrednost članstva za one elemente sa manjom vrednošću članstva.

$$\mu_{DIL(A)}(x) = (\mu_A(x))^{1/2}$$

Na primer, osobe srednjeg rasta postaju osobe manje ili više srednjeg rasta.

Hedges

Intenzifikacija (zaista)

Ova operacija ima za posledicu povećanje vrednosti članstva za elemente sa vrednošću iznad 0.5 i smanjenje vrednosti članstva za one sa vrednošću ispod 0.5.

$$\mu_{INT(A)}(x) = \begin{cases} 2(\mu_A(x))^2 & 0 \leq \mu_A(x) \leq 0.5 \\ 1 - 2(1 - \mu_A(x))^2 & 0.5 \leq \mu_A(x) \leq 1 \end{cases}$$

Na primer, za osobe srednje visine dobija se skup osoba zaista srednje visine.

Stepen (vrlo vrlo)

Ova operacija je proširenje operacije koncentracije

$$\mu_{POW(A)}(x) = (\mu_A(x))^n$$

Na primer, skup visokih osoba prelazi u skup vrlo vrlo visokih osoba za $n = 3$.

Operacije nad skupovima

Presek

Vrednost članstva elementa preseku dva rasplinuta skupa A i B predstavlja minimum vrednosti članstva toga elementa u svakom od skupova A i B:

$$\mu_{A \wedge B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad \text{za svako } x \in X$$

$$= \mu_A(x) \cap \mu_B(x)$$

Na primer,

$$\text{VISOK} = (0/1.2, 0.2/1.5, 0.5/1.7, 0.8/1.9, 1/2.1)$$

$$\text{NIZAK} = (1/1.2, 0.8/1.5, 0.5/1.7, 0.2/1.9, 0/2.1)$$

$$\text{VISOK} \wedge \text{NIZAK} = (0/1.2, 0.2/1.5, 0.5/1.7, 0.2/1.9, 0/2.1)$$

gde visok i nizak interpretiramo kao srednje visine.

Operacije nad skupovima

Unija

Vrednost članstva elementa uniji dva rasplinuta skupa A i B predstavlja maksimum vrednosti članstva toga elementa u svakom od skupova A i B :

$$\begin{aligned}\mu_{A \vee B}(x) &= \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad \text{za svako } x \in X \\ &= \mu_A(x) \cup \mu_B(x)\end{aligned}$$

Za prethodni primer dobija se:

$$\text{VISOK} \vee \text{NIZAK} = (1/1.2, 0.8/1.5, 0.5/1.7, 0.8/1.9, 1/2.1)$$

gde visok ili nizak interpretiramo kao nije srednje visine.

Operacije nad skupovima

Komplementiranje

Vrednost članstva elementa komplementu skupa A u oznaci $\sim A$ računa se kao:

$$\mu_{\sim A}(x) = 1 - \mu_A(x) \text{ za svako } x \in X$$

Za prethodnu definiciju osobine visok, dobija se:

$$\sim \text{VISOK} = (1/1.2, 0.8/1.5, 0.5/1.7, 0.2/1.9, 0/2.1)$$

Operacije nad skupovima

Dobijanje dodatnih rasplinutih skupova

Na primer, ako želimo da izvedemo skup B: nije vrlo visoka osoba, primenićemo sledeću formulu:

$$\mu_B(x) = 1 - (\mu_{VISOK}(x))^2$$

Ili, ako hoćemo da dobijemo skup C: nije vrlo visoka osoba i nije vrlo niska osoba, onda primenjujemo formulu:

$$\mu_C(x) = \min[1 - (\mu_{VISOK}(x))^2, 1 - (\mu_{NIZAK}(x))^2]$$

Rasplinuto zaključivanje

- Rasplinuta logika posmatra rasplinite skupove kao rasplintu propozicionu logiku. U rasplintoj propozicionoj logici iskazi tvrde da neka lingvistička promenljiva ima određenu vrednost. Na primer, propozicija: rast je visok, predstavlja se sa
 - $X \text{ is } A$
 - gde je A raspliniti skup nad objektom X .
- Rasplinuto pravilo povezuje dve propozicije u oblik:
 - $\text{IF } X \text{ is } A \text{ THEN } Y \text{ is } B.$
- Ovo pravilo uspostavlja relaciju (asocijaciju) između dve propozicije.

Rasplinuto zaključivanje

- Raspliniti ekspertski sistem smešta pravila kao rasplinite asocijacije, to jest, za pravilo
- IF A THEN B
- gde su A i B raspliniti skupovi, sistem smešta asocijaciju (A, B) u matricu N. Rasplinuta asocijativna matrica N preslikava raspliniti skup A u raspliniti skup B. Ova rasplinuta asocijacija se još naziva rasplinuta asocijativna memorija.
- S obzirom da su propozicije u rasplinitim pravilima raspliniti skupovi, rasplinuta logika mora da preslika skup informacija iz premise u skup informacija u zaključku. Da bi se ovo ostvarilo, rasplinuto zaključivanje uspostavlja indukovani raspliniti skup na osnovu povezanih rasplinitih skupova

Rasplinuto zaključivanje

- Raspliniti skupovi: A - rast je visok, B - masa je velika
- Pravilo: IF rast je visok THEN masa je velika
- U praksi, ovo pravilo se može koristiti da se formira stepen poverenja da neka osoba date visine ima veliku masu.
- Rasplinuto zaključivanje: uzima se raspoloživa informacija kodirana u A' (podskup od A) i indukuje raspliniti skup B' od B koji kvantitativno iskazuje ovo poverenje.
- Za izvođenje indukovanog rasplinitog skupa, rasplinuto zaključivanje koristi vektorsko-matrično rasplinuto množenje.
- Dve najpopularnije tehnike rasplinitog zaključivanja su max-min zaključivanje i max-proizvod zaključivanje

Vektorsko-matrično rasplinuto množenje

IF X is A THEN Y is B

A i B se predstavljaju kao vektori:

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_n) \quad \text{gde je } a_i = \mu_A(x_i)$$

$$B = (b_1, b_2, \dots, b_p) \quad \text{gde je } b_j = \mu_B(y_j)$$

Za zadato A i zadatu rasplintu matricu M dimenzija $n \times p$ na osnovu jednakosti:

$$A \cdot M = B$$

izračunava se B po formuli:

$$b_j = \max[\min(a_i, m_{ij})] \quad 1 \leq i \leq n$$

Vektorsko-matrično rasplinuto množenje

Na primer,

$$A = (0.2, 0.4, 0.6, 1) \quad \text{i} \quad M = \begin{vmatrix} 0.1 & 0.6 & 0.8 \\ 0.6 & 0.8 & 0.6 \\ 0.8 & 0.6 & 0.5 \\ 0 & 0.5 & 0.5 \end{vmatrix}$$

$$b_1 = \max [\min(0.2, 0.1), \min(0.4, 0.6), \min(0.6, 0.8), \min(1, 0)]$$

$$= \max(0.1, 0.4, 0.6, 0) = 0.6$$

$$b_2 = \max(0.2, 0.4, 0.6, 0.5) = 0.6$$

$$b_3 = \max(0.2, 0.4, 0.5, 0.5) = 0.5$$

Max-Min zaključivanje

$$m_{ij} = \text{truth}(a_i \longrightarrow b_j) = \min(a_i, b_j)$$

Ako su data dva rasplinuta skupa A i B, mi možemo da formiramo matricu M a zatim da odredimo indukovani vektor B' iz podskupa A' prema vezi:

$$A' \cdot M = B'$$

Max-Min zaključivanje

Pretpostavimo da imamo objekt X koji predstavlja temperaturu i rasplinut skup A definisan nad X koji predstavlja normalnu temperaturu. Takođe usvojimo da imamo objekt Y koji predstavlja brzinu i raspliniti skup B definisan nad Y koji predstavlja srednju brzinu. Neka je dato sledeće pravilo:

IF temperatura je normalna THEN brzina je srednja
Neka su A i B opisani sa:

$$A = (0/100, 0.5/125, 1/150, 0.5/175, 0/200)$$

$$B = (0/10, 0.6/20, 1/30, 0.6/40, 0/50)$$

Max-Min zaključivanje

zračunata vrednost M je:

$$M = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0.6 & 1 & 0.6 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Ako je $A' = (0/100, 0.5/125, 0/150, 0/175, 0/200)$
ovo indukuje rasplinut skup B' (to jest, poverenje u B):
 $B' = (0/10, 0.5/20, 0.5/30, 0.5/40, 0/50)$

Max-Min zaključivanje

Ključna tačka koja proizilazi iz ovog primera je rezultat dobijen ograničavanjem A' na samo jednu vrednost. Drugim rečima, naše čitanje temperature je bilo 125 stepeni što je dalo:

$$A' = (0/100, 0.5/125, 0/150, 0/175, 0/200)$$

$$B' = (0/10, 0.5/20, 0.5/30, 0.5/40, 0/50)$$

U najvećem broju realnih slučajeva mi imamo jednu vrednost pri nekom merenju (na primer, $x_k = 125$ °C). Sa samo jednom izmerenom vrednošću x_k mi možemo koristiti $\mu_A(x_k)$ direktno sa rasplinutim skupom B , to jest, $\mu_B(y)$ da bi se dobio indukovani skup na B' :

$$B' = \mu_A(x_k) \wedge \mu_B(y)$$

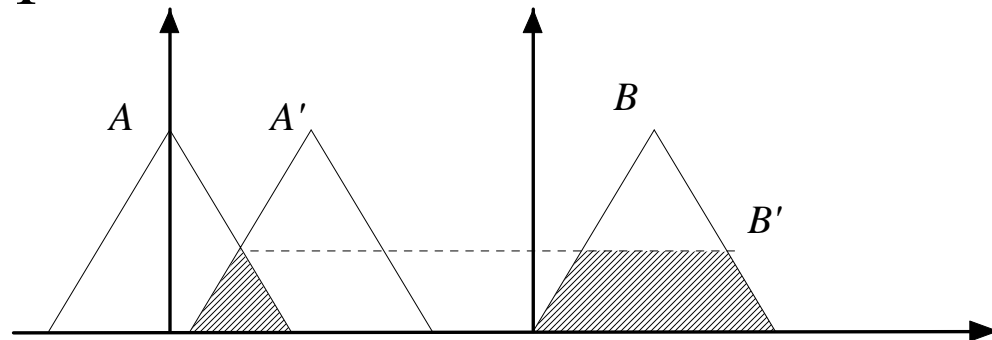
Max-Min zaključivanje

U slučaju da je ulaz u pravila rasplinuto čitanje, još uvek se može ići jednostavnijim pristupom.

Posmatrajmo pravilo

IF A THEN B

i rasplinuto čitanje za A označimo kao A' . Jednostavno se može uzeti presek $A \cap A'$ da bi se indukovao B' prema slici:



Zaključivanje Max-proizvod

Zaključivanje u varijanti max-proizvod koristi standardni proizvod elemenata implikacije pri formiranju komponenti za M :

$$m_{ij} = a_i b_j$$

Po izračunavanju ove matrice, min-max kompozicija se koristi da odredi indukovani skup B' iz nekog podskupa A' skupa A .

Zaključivanje Max-proizvod

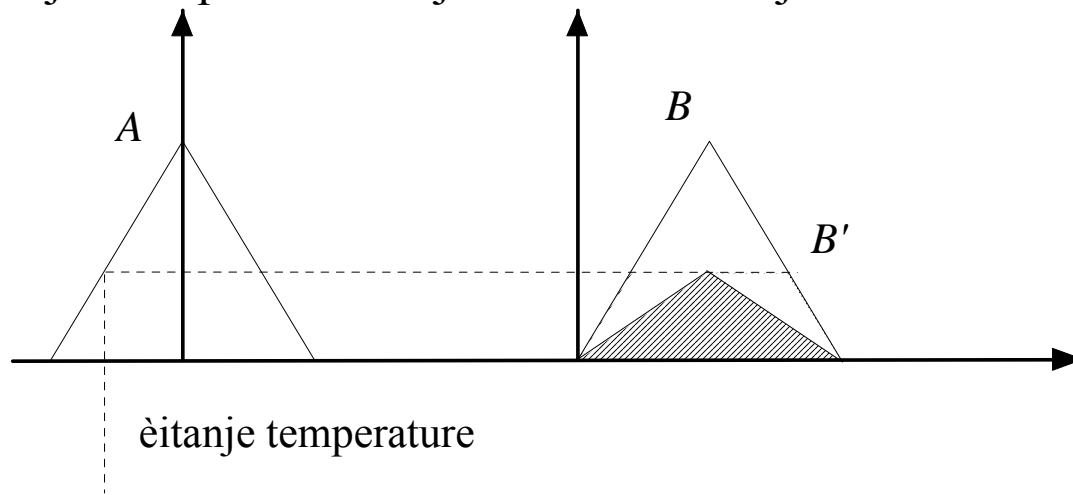
$$M = \begin{vmatrix} (0 \cdot 0) & (0 \cdot 0.6) & (0 \cdot 1) & (0 \cdot 0.6) & (0 \cdot 0) \\ (0.5 \cdot 0) & (0.5 \cdot 0.6) & (0.5 \cdot 1) & (0.5 \cdot 0.6) & (0.5 \cdot 0) \\ (1 \cdot 0) & (1 \cdot 0.6) & (1 \cdot 1) & (1 \cdot 0.6) & (1 \cdot 0) \\ (0.5 \cdot 0) & (0.5 \cdot 0.6) & (0.5 \cdot 1) & (0.5 \cdot 0.6) & (0.5 \cdot 0) \\ (0 \cdot 0) & (0 \cdot 0.6) & (0 \cdot 1) & (0 \cdot 0.6) & (0 \cdot 0) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.5 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0.6 & 1 & 0.6 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.5 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

$$b'_j = \max[\min(a'_i, m_{ij})]$$

$$B' = (0, 0.3, 0.5, 0.3, 0)$$

Zaključivanje Max-proizvod

Tehnika zaključivanja max-proizvod daje skaliranu verziju za B' :



Uz pretpostavku da A' sadrži samo jednu vrednost, B' se može dobiti i na sledeći način:

$$B' = \mu_A(x_k) \cdot \mu_B(y)$$

gde je x_k merenje za A . U našem primeru,

$$\begin{aligned} B' &= 0.5 \cdot (0, 0.6, 1, 0.6, 0) \\ &= (0, 0.3, 0.5, 0.3, 0) \end{aligned}$$

Max-proizvod tehnika čuva više informacija nego min-max zaključivanje. Kada se kombinuje više indukovanih skupova iz više pravila, ovo postaje važno.

Pravila sa više premisa

Postavlja se pitanje: Kako se formira asocijativna matrica za pravilo

IF A AND B THEN C?

Postupak je sledeći:

- Izračunati prvo matrice M_{AC} i M_{BC} .
- Za date ulazne podatke A' i B' o premisama A i B, indukovani rasplinuti skupovi za C se računaju nezavisno:

$$A' \cdot M_{AC} = C_{A'}$$

$$B' \cdot M_{BC} = C_{B'}$$

- Sledeći korak je rekompozicija rasplnutih skupova $C_{A'}$ i $C_{B'}$. Ovaj korak zavisi od toga da li su premise vezane sa AND ili OR. Za premise vezane sa AND, koristi se operacija rasplnutog preseka:

$$C' = [A' \cdot M_{AC}] \wedge [B' \cdot M_{BC}] = C_{A'} \wedge C_{B'}$$

a za OR:

$$C' = [A' \cdot M_{AC}] \vee [B' \cdot M_{BC}] = C_{A'} \vee C_{B'}$$

Pravila sa više premisa

C'	povezivanje premisa	zaključivanje
$\min(a_i, b_j) \wedge \mu_C(z)$	AND	max-min
$\max(a_i, b_j) \wedge \mu_C(z)$	OR	max-min
$\min(a_i, b_j) \cdot \mu_C(z)$	AND	max-proizvod
$\max(a_i, b_j) \cdot \mu_C(z)$	OR	max-proizvod

Koncentracija (defuzzification)

U nekim primenama potrebno je da se na osnovu B' dobije singularna vrednost:

IF temperatura je normalna THEN brzina je srednja
i koristi se temperaturna merenja da indukujemo rasplinuti skup o normalnoj brzini. U kontronim aplikacijama želeli bismo da znamo koju specifičnu vrednost brzine treba da primenimo. To znači da na osnovu indukovanog rasplinitog skupa treba da dobijemo singularnu vrednost. Postupak određivanja ove vrednosti zove se koncentracija.

Najpoznatija metoda koncentracije je metoda rasplinitog centroida. Dakle, y_j se dobija iz B' na sledeći način:

$$y_j = \frac{\sum y_i \cdot m_{B'}(y_i)}{\sum m_{B'}(y_i)}$$

Korišćenje ove tehnike u jednom jedinom pravilu nije posebno interesantno jer će vrednost biti uvek ista - centroid od B . Koncentracija je važna kada više pravila daju isti zaključak.

Višestruka rasplinuta pravila

IF A_1 THEN B_1

IF A_1 THEN B_1

· · ·
IF A_n THEN B_n

Nas interes je da nađemo ukupno poverenje u skup B definisan na domenu X ako je dato samo jedno merenje A' .

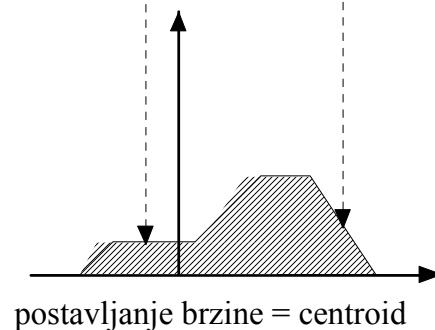
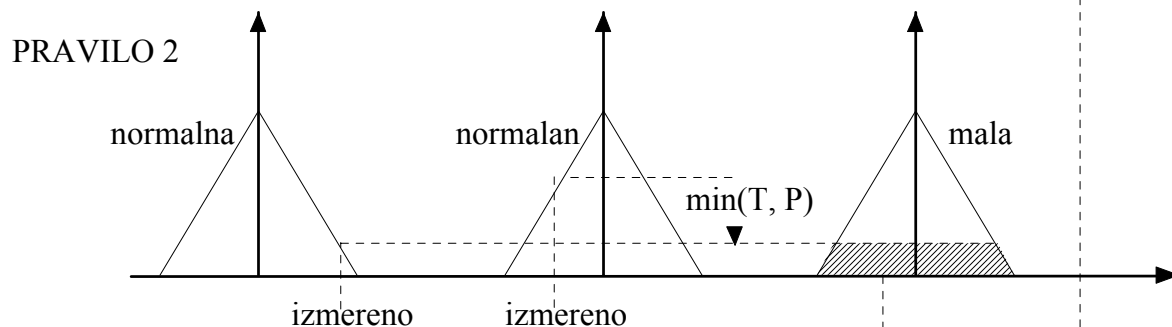
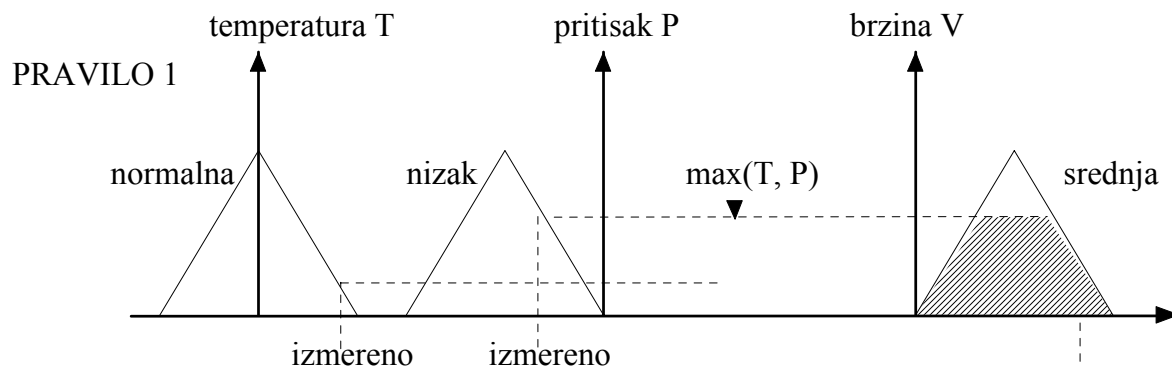
Primenjujući A' na svako od pravila dobijamo indukovane rasplinite skupove B_i' . Nakon toga, kombinujemo sve indukovane skupove da bismo dobili rezultatni kompozitni skup B , koristeći standardnu operaciju rasplinite unije:

$$\begin{aligned} B' &= B_1' \cup B_2' \cup \dots \cup B_n' \\ &= \max(B_1'(x), B_2'(x), \dots, B_n'(x)) \quad \text{za svako } x \in X \end{aligned}$$

Višestruka rasplinuta pravila

- Nakon ovoga, može se izvršiti koncentracija rezultata B' primenom metode centroida. Singularna vrednost je y_j .
- Ova operacija, prema tome, uzima kao ulazno merenje A i daje procenu B .
- Za primer data su sledeća pravila:
IF temperatura je normalna OR pritisak je nizak THEN brzina je srednja
IF temperatura je normalna AND pritisak je normalan THEN brzina je mala

Višestruka rasplinuta pravila



Razvoj rasplinutog ekspertskog sistema

- Cilj je projektovati rasplinuti ekspertski sistem, koji će automatski voditi igrača duž golf staze. Igrač ima problema da kontroliše svoja golf kolica što povećava uznemirenost igrača i dovodi do lošijeg rezultata. Pomoću automatskih golf kolica igrač može da se opusti i poboljša svoju igru.
- Postoji sedam osnovnih zadataka koje je potrebno obaviti pri razvoju sistema:
 - Definirati problem
 - Definirati lingvističke promenljive
 - Definirati rasplinite skupove
 - Definirati rasplinita pravila
 - Realizovati sistem
 - Testirati sistem
 - Podesiti sistem

Razvoj rasplinutog ekspertskog sistema

- Potrebno je da se dođe do izvora znanja - ekspert u posmatranom domenu - osoba koja ima višegodišnje iskustvo u upravljanju kolicima za golf.
- Ova osoba je rekla da je osnovni problem: upravljanje kolicima na efikasan i siguran način od neke početne stacionarne pozicije do mesta loptice za golf. Efikasnost se postiže minimiziranjem pređenog rastojanja i utrošenog vremena da se to rastojanje pređe. Sigurnost se postiže izbegavanjem drveća duž puta. Da bi se obavio zadatak potrebno je obezbediti sistem koji će kontrolisati smer i brzinu kolica.

Razvoj rasplinutog ekspertskog sistema

- Osnovni problem je anuliranje uglova greške. Kolica se moraju u početku usmeriti ka loptici anulirajući grešku između uglovnog položaja kolica i položaja loptice.
- Kolica treba da se ubrzaju do neke maksimalne dozvoljene brzine, i da se uspore i eventualno zaustave kada su blizu loptice, rastojanje zaustavljanja je oko 3 metra. Ovim se minimizira greška između položaja kolica i loptice, i to na brz način.
- Kada se drvo nađe na putu, kolica ga moraju pažljivo zaobići, uz usporenje, a zatim uz povećanje brzine usmeriti opet ka loptici.

Razvoj rasplinutog ekspertskog sistema

- Treba odrediti promenljive koje će obuhvatiti ceo posmatrani problem i definisati rasplinite skupove nad svakom od njih. Iz prvg zadatka se zaključuje da se sistem mora suočiti sa tri osnovna problema:
 - Kontrola upravljačkog sistema kolica radi usmeravanja ka loptici
 - Kontrola brzine kolica
 - Kontrola upravljačkog sistema kolica radi izbegavanja drveća
- Za ova tri problema dobijena su sledeća uputstva:
 - Kada je smer kolica daleko od loptice, usmeriti kolica ka loptici
 - Kada su kolica daleko od loptice, ubrzati kolica, i kada su kolica blizu loptice, usporiti kolica

Razvoj rasplinutog ekspertskog sistema

Lingvistička promenljiva	Opseg
Uglovna greška	$-180^{\circ} - 180^{\circ}$
Ugao drveta	$-180^{\circ} - 180^{\circ}$
Ugao upravljачkog mehanizma	$-45^{\circ} - 45^{\circ}$
Brzina	$0 - 5\text{m/s}$
Ubrzanje	$-2 - 1\text{m/s}^2$
Rastojanje lopte	$0 - 600\text{ m}$
Rastojanje drveta	$0 - 1000\text{ m}$

Razvoj rasplinutog ekspertskog sistema

Uglovna greška	Ugao drveta	Ugao upravljačkog mehanizma	Brzina	Ubrzanje	Rastojanje lopte	Rastojanje drveta
Jako negativna	Jako negativna	Jako desno	0	Puna kočnica	0	Blizu
Malo negativna	Malo negativna	Malo desno	Stvarno mala	Lagano kočenje	Stvarno blizu	
0	0	0	Mala	Kretanje po inerciji	Blizu	
Malo pozitivna	Malo pozitivna	Malo levo	Srednje	0	Srednje	
Jako pozitivna	Jako pozitivna	Jako levo	Velika	Lagano ubrzanje	Daleko	
				Do daske		

Razvoj rasplinutog ekspertskog sistema

- **Pravilo 1S** – Održavanje smera upravljačkog mehanizma
If uglovna greška 0
Rastojanje drveta NIJE NEŠTO blizu
Ugao drveta NIJE NEŠTO nula
then postaviti upravljački mehanizma na 0
- **Pravilo 2S** – Promeniti smer upravljačkog mehanizma malo desno
If uglovna greška je malo pozitivna
Rastojanje drveta NIJE NEŠTO blizu
Ugao drveta NIJE NEŠTO nula
then postaviti upravljački mehanizma malo desno

Razvoj rasplinutog ekspertskog sistema

- **Pravilo 3S** – Promeniti smer upravljačkog mehanizma malo levo

If uglovna greška je malo negativna

Rastojanje drveta NIJE NEŠTO blizu

Ugao drveta NIJE NEŠTO nula

then postaviti upravljački mehanizma malo levo

- **Pravilo 4S** – Promeniti smer upravljačkog mehanizma malo desno

If uglovna greška je jako pozitivna

Brzina je velika

then postaviti upravljački mehanizma malo desno

Razvoj rasplinutog ekspertskog sistema

- **Pravilo 5S** – Promeniti smer upravljačkog mehanizma jako desno

If uglovna greška je jako pozitivna

Brzina NIJE velika

then postaviti upravljački mehanizma jako desno

- **Pravilo 6S** – Promeniti smer upravljačkog mehanizma malo levo

If uglovna greška je jako negativna

Brzina je velika

then postaviti upravljački mehanizma malo levo

- **Pravilo 7S** – Promeniti smer upravljačkog mehanizma jako levo

If uglovna greška je jako negativno

Brzina NIJE velika

then postaviti upravljački mehanizma jako levo

Razvoj rasplinutog ekspertskog sistema

- **Pravilo 1A** – Lagano kočenje

If uglovna greška je jako pozitivna

Brzina je velika

then učiniti lagano kočenje

- **Pravilo 2A** – Lagano kočenje

If uglovna greška je jako negativna

Brzina je velika

then učiniti lagano kočenje

Razvoj rasplinutog ekspertskog sistema

- **Pravilo 3A** – Do daske

If rastojanje lopte je veliko

Brzina NIJE VRLO velika

then ubrzati do daske

- **Pravilo 4A** – Svesti ubrzanje na nulu

If rastojanje lopte je veliko

Brzina je VRLO velika

then svesti ubrzanje na nulu

- **Pravilo 5A** – Lagano ubrzanje

If rastojanje lopte je srednje

Brzina NIJE velika

then učiniti lagano ubrzanje

Razvoj rasplinutog ekspertskog sistema

- **Pravilo 6A** – Svesti ubrzanje na nulu

If rastojanje lopte je srednje

Brzina je velika

then svesti ubrzanje na nulu

- **Pravilo 7A** – Lagano kočenje

If rastojanje lopte je blizu

Brzina je velika

then učiniti lagano kočenje

- **Pravilo 8A** – Lagano ubrzanje

If rastojanje lopte je blizu

Brzina je nula

then učiniti lagano ubrzanje

Razvoj rasplinutog ekspertskog sistema

- **Pravilo 9A** – Kretanje po inerciji

If rastojanje lopte je blizu

Brzina je srednja

then učiniti kretanje po inerciji

- **Pravilo 10A** – Lagano kočenje

If rastojanje lopte je stvarno blizu

Brzina je srednja

then učiniti lagano kočenje

- **Pravilo 11A** – Kretanje po inerciji

If rastojanje lopte je stvarno blizu

Brzina je mala

then učiniti kretanje po inerciji

Razvoj rasplinutog ekspertskog sistema

- **Pravilo 12A** – Svesti ubrzanje na nulu

If rastojanje lopte je stvarno blizu

Brzina je stvarno mala

then svesti ubrzanje na nulu

- **Pravilo 13A** – Lagano ubrzanje

If rastojanje lopte je stvarno blizu

Brzina je nula

then učiniti lagano ubrzanje

- **Pravilo 14A** – Puna kočnica

If rastojanje lopte je nula

Brzina NIJE nula

then primeniti punu kočnicu

Razvoj rasplinutog ekspertskog sistema

- **Pravilo 15A** – Kretanje po inerciji

If rastojanje lopte je blizu

Brzina je srednja

then pustiti kretanje po inerciji

- **Pravilo 16A** – Svesti ubrzanje na nulu

If rastojanje lopte je blizu

Brzina je mala

then svesti ubrzanje na nulu

Razvoj rasplinutog ekspertskog sistema

- **Pravilo 1D** – Skrenuti malo levo da bi se izbeglo drvo

If Rastojanje drveta je NEŠTO blizu

Ugao drveta je NEŠTO nula

Ugao drveta je NEŠTO malo pozitivan

then učiniti ugao upravljačkog mehanizma malo levo

- **Pravilo 2D** – Skrenuti malo desno da bi se izbeglo drvo

If Rastojanje drveta je NEŠTO blizu

Ugao drveta je NEŠTO nula

Ugao drveta je NEŠTO malo negativan

then učiniti ugao upravljačkog mehanizma malo desno

- **Pravilo 3D** – Puna kočnica da bi se izbeglo drvo

If Rastojanje drveta je VRLO blizu

Ugao drveta je nula

then primeniti punu kočnicu

Razvoj rasplinutog ekspertskog sistema

- Sledeći zadatak je izgradnja ekspertskog sistema. Ovaj zadatak uključuje kodiranje rasplnutih skupova, pravila i procedura da bi se obavile rasplnute funkcije, kao što je rasplnuto zaključivanje.
- Ovo se može izvesti na dva načina: izgradnja sistema od nule koristeći određeni programski jezik ili upotrebiti sredstvo za razvoj rasplnutih ekspertskih sistema.
- Izgradnja sistema od nule zahteva ne samo kodiranje znanja, već i kodiranje procedura rasplnute logike. Ako se koriste razvojna sredstva, na primer *CubiCalc*, potrebno je kodirati samo znanje – zadatak koji se obavlja korišćenjem sintakse prirodnih jezika i grafičkih metoda radi definisanja rasplnutih skupova.

Razvoj rasplinutog ekspertskog sistema

- Neka je sistem razvijen korišćenjem razvojnog sredstva koje ima mogućnost simulacije. Postoje brojne test situacije koje zavise od položaja lopte, drveta i kolica, kao i od orijentacije kolica. Biće razmatrana samo dva slučaja: u blizini nema drveta i drvo je na putu kolica. U oba slučaja lopta je smeštena u centar koordinatnog sistema (0,0).
- Posle početnog manevra da bi se dostigao cilj, kolica slede pravu liniju do lopte. Nikakvog odstupanja od prave linije nije bilo zbog udaljenosti stabla. Kola se zaustavljaju približno 3m od lopte.
- Od stacionarne pozicije, kolica brzo dostižu maksimalnu dozvoljenu brzinu od 5 m/s. Pri približavanju lopti, kolica smanjuju brzinu, kada počnu oscilacije.

Razvoj rasplinutog ekspertskog sistema

Da bi se obezbedio uvid u proces zaključivanja, simulacija je zaustavljena da bi se izvršila inspekcija ispaljivanja pravila:

- Kolica su bila 28,5 m od lopte
- Kolica su se kretala direktno ka lopti
- Brzina kolica je bila 4,5 m/s
- Kolica su usporavana sa 0,5 m/sec²
- Uglovna greška je bila zanemarljiva
- Drvo je bilo udaljeno od puta kretanja

Razvoj rasplinutog ekspertskog sistema

- Pod ovim uslovima primenjuju se samo tri pravila: 5A, 6A, 7A. Da bi se primenilo pravilo 5A funkcije članstva «srednje», «rastojanje lopte» i «velika brzina» moraju se izračunati. «Rastojanje lopte» od 28,5 m pripada klasifikaciji «srednje» sa stepenom od 0,125. Brzina od 4,5 m/s se smatra «velika» sa stepenom od 0,8, stoga je «NIJE velika» stepen članstva od 0,2. Kada se izvrši konjunkcija ove dve vrednosti, operator minimum daje vrednost 0,125. Korišćenjem max-proizvod zaključivanja, ova vrednost se koristi za izračunavanje članstva zaključka pravila 5A «malo ubrzanje».
- Kada se računa pravilo 6A, gde se takođe pojavljuju i konjunkciji «srednje» i «velika» dobija se takođe vrednost 0,125 koja se koristi za izračunavanje vrednosti članstva za «nula» ubrzanje.
- Kada se računa pravilo 7A, rastojanje od 28,5 se smatra blizu 0,625 i brzina je «velika» sa stepenom od 0,8. Stoga se «lagano kočenje» skalira vrednošću od 0,625.
- Tri indukovana rasplinuta skupa za «ubrzanje» su kombinovana korišćenjem operatora unije. Zatim je izračunata vrednost iskorišćena za promenu ubrzanja kolica. S obzirom da je konačna vrednost negativna, simulator smanjuje brzinu i proces se nastavlja.

Razvoj rasplinutog ekspertskog sistema

- U većini rasplnutih ekspertskih sistema vreme utrošeno na razvoj rasplnutih skupova i pravila je malo u poređenju sa podešavanjem sistema. Naime, dobijanje tačnijih rezultata zahteva dodatne napore. Studija rezultata dobijenih simulacijom, govori da je glavni deo specifikacije zadovoljen, ali da se pojavljuje problem kada se kolica približe loptici, jer brzina počinje da osciluje između nule i neke vrednosti.
- Da bi se korigovao ovaj problem, posmatraju se pravila koja kontrolišu brzinu kolica kada su ona «stvarno blizu» loptice. To su pravila 9A do 13A. Kako pravilo 13A prouzrokuje povećanje brzine kada se ona približi nuli, ovo se pravilo izbacuje iz razmatranja. Ubacujući sada u igru ova pravila, ona eliminišu oscilacije, ali se kolica zaustavljaju na 7m od loptice.

Razvoj rasplinutog ekspertskog sistema

- U praksi, može se vratiti unatrag radi daljeg doterivanja bilo rasplnutih skupova, bilo pravila radi korekcije ovog novog problema.
- U opštem slučaju rasplnuti logički sistem uključuje jednu od sledećih aktivnosti:
- Pravila
 - Dodavanje pravila za specijalne situacije
 - Dodavanje premise za druge lingvističke promenljive
 - Dodavanje priloga preko «hedge» operatora
- Rasplnuti skupovi
 - Dodavanje skupova na definisanu lingvističku promenljivu
 - Proširivanje ili sužavanje postojećih skupova
 - Bočno pomeranje postojećih skupova
 - Doterivanje oblika postojećih skupova