

1 AZ MI FOGALMA

1.1 Miről ismerhető fel az MI?

Megoldandó feladat: nehéz

- A feladat problémateretere hatalmas

- Szisztematikus keresés helyett intuíción, kreativitásra (azaz heurisztikára) van szükségünk ahhoz, hogy elkerljük a kombinatorikus robbanást.

Szoftver viselkedése: intelligens (tárol ismeretet, automatikusan következtet, tanul, gépi látás, gépi cselekvés)

- Turing teszt vs. kínai szoba elmélet

- "mesterjelölt szintű" mesterséges intelligencia

Felhasznált eszközök: sajátosak

- Átgondolt reprezentáció a feladat modellezéséhez

- Heurisztikával megerősített hatékony algoritmusok

- Gépi tanulás módszerei

2 MODELLEZÉS ÉS KERESÉS

feladat \rightarrow útkeresési probléma \rightarrow megoldás

Feladat és útkeresési probléma között helyezkedik el a modellezés. Itt található az állapottér-reprezentáció, a probléma dekompozíció, a korlátprogramozási modell, és a logikai reprezentáció.

Az útkeresési problémát egy gráffal reprezentálhatjuk. Az útkeresési probléma és a megoldás között található a keresés. A keresésbe tartoznak a lokális keresések, a visszalépéses keresések, a gráfkeresések, az evolúciós algoritmus, a rezolúció és a szabályalapú következtetés.

2.1 Mire kell a modellezésnek fókuszálni

Problématér elemei: probléma lehetséges válaszai.

Cél: egy helyes válasz (megoldás) megtalálása

Keresést segítő ötletek (heurisztikák):

- Problématér hasznos elemeinek elválasztása a haszontalanoktól.

- Az elemek szomszédsági kapcsolatainak kijelölése, hogy a probléma tér elemeinek szisztematikus bejárását segítsük.

- Adott pillanatban elérhető elemek rangsorolása.

- Kiinduló elem kijelölése.

2.2 Útkeresési probléma

Egy útkeresési problémában a problémateret elemeit egy olyan élsúlyozott irányított gráf csúcsai vagy útjai szimbolizálják, amelyik gráf nem feltétlenül véges, de a

csúcsainak kifoka véges, és van egy közös pozitív alsó korlátja az élek súlyának (költségének) (δ -gráf).

A megoldást ennek megfelelően vagy egy célcsúcs, vagy egy startcsúcsból célcsúcsba vezető út (esetleg a legolcsóbb ilyen) megtalálása szolgáltatja.

Számos olyan modellező módszert ismerünk, amely a kitűzött feladatot útkeresési problémává fogalmazza át.

2.3 Gráf fogalmak

-csúcsok, irányított élek: $\rightarrow N, A \subseteq N \times N$

-él n -ből m -be $\rightarrow (n,m) \in A \ (n,m \in N)$

- n utódai $\rightarrow \gamma(n) = \{ m \in N \mid (n,m) \in A \}$

- n szülei $\rightarrow \pi(n) \in \Pi(n) = \{ m \in N \mid (m,n) \in A \}$

-irányított gráf $\rightarrow R=(N,A)$

-véges sok kivezető él $\rightarrow |\gamma(n)| < \infty \ (\forall n \in N)$

-élköltség $\rightarrow c:A \rightarrow \mathbb{R}$

- δ tulajdonság ($\delta \in \mathbb{R}^+$) $\rightarrow c(n,m) \geq \delta > 0 \ (\forall (n,m) \in A)$

- δ -gráf $\rightarrow \delta$ -tulajdonságú, véges sok kivezető élű, élsúlyozott irányított gráf

-irányított út $\rightarrow \alpha = (n,n_1),(n_1,n_2),\dots,(n_{k-1},m) = \langle n,n_1,n_2,\dots,n_{k-1},m \rangle \ n \rightarrow^\alpha m,$

$n \rightarrow m, n \rightarrow M \ (M \subseteq N) \ n \rightarrow m, n \rightarrow M$

-út hossza \rightarrow az út éleinek száma: $|\alpha|$

-út költsége $\rightarrow c(\alpha) = c^\alpha(n,m) := \sum_{j=1..k} c(n_{j-1},n_j)$ ha $\alpha = \langle n=n_0,n_1,n_2,\dots,n_{k-1},m=n_k \rangle$

-opt. költség $\rightarrow c^*(n,m) := \min_{\alpha \in \{ n \rightarrow m \}} c^\alpha(n,m)$ { δ gráfokban ez végtelen

sok út esetén is értelmes. Értéke ∞ , ha nincs egy út se.}

-opt. költség2 $\rightarrow c^*(n,M) := \min_{\alpha \in \{ n \rightarrow m \}} c^\alpha(n,M)$

-opt. költségű út $n \rightarrow^* m := \min_c \{ |\alpha| \mid \alpha \in \{ n \rightarrow m \} \}$

-opt. költségű út $n \rightarrow^* M := \min_c \{ |\alpha| \mid \alpha \in \{ n \rightarrow M \} \}$

2.4 Gráfrepresentáció fogalma

Minden útkeresési probléma rendelkezik egy (a probléma modellezéséből származó) gráfrepresentációval, ami egy (R,s,T) hármas, amelyben:

- $R=(N,A,c)$ δ -gráf az ún. reprezentációs gráf,

-az $s \in N$ startcsúcs,

-a $T \subseteq N$ halmazbeli célcsúcsok.

És a probléma megoldása:

-egy $t \in T$ cél megtalálása, vagy

-egy $s \rightarrow T$, esetleg $s \rightarrow^* T$ optimális út megtalálása

(s -ből Tegyük csúcsába vezető irányított út, vagy s -ből T egyik csúcsába vezető legolcsóbb irányított út)

Az útkeresési problémák megoldásához azok a reprezentációs gráfjainak nagy mérete miatt speciális (nem determinisztikus, heurisztikus) útkereső algoritmusokra van szükség, amelyek:

-a startcsúcsból indulnak, amely az első aktuális csúcs;

-minden lépésben nem-determinisztikus módon új aktuális csúcs(ka)t választanak

a korábbi aktuális csúcs(ok) alapján (gyakran azok gyerekei közül);
 -tárolják a már feltárt reprezentációs gráf egy részét;
 -megállnak, ha célcúcsot találnak vagy nyilvánvalóvá válik, hogy erre semmi esélyük.

2.5 Kereső rendszer (KR)

Procedure KR

```
1. ADAT:= kezdeti érték
2. while !terminálási feltétel(ADAT) loop
3.   SELECT SZ FROM alkalmazható szabályok
4.   ADAT := SZ(ADAT)
5. endloop
end
```

AHOL:

-ADAT: globális munkaterület, tárolja a keresés során megszerzett és megőrzött ismereteket
 -alkalmazható szabályok: keresési szabályok, megváltoztatják a globális munkaterület tartalmát
 -SELECT: vezérlési stratégia, alkalmazható szabályok közül kiválaszt egy "megfelelőt"

2.6 Kereső rendszerek vizsgálata

-helyes-e (azaz korrekt választ ad-e)
 -teljes-e (minden esetben választ ad-e)
 -optimális-e (optimális megoldást ad-e)
 -idő bonyolultság
 -tár bonyolultság

3 GÉPI TANULÁS

-Egy programozási feladat megoldásához meg kell adnunk a feladat modelljét és készítenünk kell egy ehhez illeszkedő algoritmust, amely a feladat megoldását előállítja.

-Gépi tanulással a modell (reprezentáció és/vagy heurisztika), illetve a megoldó algoritmus (többnyire annak bizonyos paraméterei) állhatnak elő automatikusan.

-A tanuláshoz a megoldandó probléma néhány konkrét esetére, a tanító példákra van szükség.

-A gépi tanulási módszereket három csoportba szokás sorolni: felügyelt-, nem-felügyelt, és megerősítéses tanulásra attól függően, hogy a tanító példák input-output párok, csak inputok, vagy input-hasznosság párok.

4 Állapottér-reprezentáció

Állapottér: a probléma leírásához szükséges adatok által felvett érték-együttesek (azaz állapotok) halmaza

-az állapot többnyire egy összetett szerkezetű érték

-gyakran egy bővebb alaphalmazzal és egy azon értelmezett invariáns állítással definiáljuk

Műveletek: állapotból állapotba vezetnek.

-megadásukhoz: előfeltétel és hatás leírása

-invariáns tulajdonságot tartó leképezés

Kezdőállapot(ok) vagy azokat leíró kezdeti feltétel

Végállapot(ok) vagy célfeltétel

4.1 Hanoi tornyai probléma

Állapottér: $AT = \{1, 2, 3\}^n$

megjegyzés: a tömb i -dik eleme mutatja az i -dik korong rúdjának számát, a korongok a rudakon méretük szerint fentről lefelé növekvő sorban vannak.

Művelet: $Rak(honnan, hova): AT \rightarrow AT$ honnan, $hova \in \{1, 2, 3\}$

HA a honnan és hova létezik és nem azonos, és van korong a honnan rúdon, és a hova rúd üres vagy a mozgatandó korong (honnan rúd felső korongja) kisebb, mint a hova rúd felső korongja, AKKOR $this[honnan\ legfelső\ korongja] := hova$

4.2 Állapottér-reprezentáció gráf-reprezentációja

δ -gráf állapot-gráf

-csúcs: állapot

-irányított él: művelet hatása

-élköltség: művelet költsége

startcsúcs kezdőállapot

célcsúcsok végállapotok

irányított út egy műveletsorozat hatása

4.3 Állapottér vs. problémater

-Az állapottér-reprezentáció és a problémater között szoros kapcsolat áll fenn, de az állapottér többnyire nem azonos a problématerrel.

-A problémater elemeit többnyire nem az állapotok, hanem a startcsúcsból induló különböző hosszúságú irányított utak.

-A hanoi tornyai problémánál például egy megoldást egy irányított út szimbolizál, amelyik a startcsúcsból a célcsúcsba vezet.

-Van amikor a megoldás egyetlen állapot (azaz csúcs), de ebben az esetben is kell találni egy odavezető operátor-sorozatot (azaz irányított utat).

4.4 Állapot-gráf bonyolultsága

Állapot-gráf bonyolultsága \rightarrow Problémater mérete \rightarrow Keresés számításigénye

A bonyolultság elsősorban a start csúcsból kivezető utak száma az oda-vissza lépések nélkül, amely nyilván függvénye a

- csúcsok és élek számának
- csúcsok ki-fokának
- körök gyakoriságának, és hosszuk sokféleségének

Ugyanannak a feladatnak több modellje lehet: érdemes olyat keresni, amely kisebb problémateret jelöl ki.

- Az előző reprezentációnál a problémater mérete, azaz a lehetséges utak száma, óriási. Készítsünk jobb modellt!
- Bővítsük az állapotteret, és használjunk új műveletet!
- Műveletek előfeltételének szigorításával csökken az állapot-gráf átlagos ki-foka.

4.5 Művelet végrehajtásának hatékonysága

A művelet kiszámítási bonyolultsága csökkenthető, ha az állapotokat extra információval egészítjük ki, vagy az invariáns szigorításával szűkítjük az állapotteret.

4.6 Hogyan "látja" egy keresés a reprezentációs gráfot?

Egy keresés fokozatosan fedezi fel a reprezentációs gráfot: bizonyos részeihez soha nem jut el, de a felfedezett részt sem feltétlenül tárolja el teljesen, sőt, sokszor torzultan "látja" azt: ha például egy csúcshoz érve nem vizsgálja meg, hogy ezt korábban már felfedezte-e, hanem új csúcsként regisztrálja, akkor az eredeti gráf helyett egy fát fog tárolni.

4.7 Reprezentációs gráf "fává egyenesítése"

Ha a keresés nem vizsgálja meg egy csúcsról, hogy korábban már felfedezte-e, akkor az eredeti reprezentációs gráf helyett annak fává kiegyenesített változatában keres.

Előny: eltűnnek a körök, de a megoldási utak megmaradnak.

Hátrány: duplikátumok jelennek meg, sőt a körök kiegyenesítése végtelen hosszú utakat eredményez.

A kétirányú (oda-vissza) élek szörnyen megnövelik a kiegyenesítéssel kapott fa méretét. De bármelyik keresésnél eltárolhatjuk egy csúcsnak azt a szülőcsúcsát, amelyik felől a csúcsot elértük. Így egy csúcsból a szülőjébe visszavezető él könnyen felismerhető és figyelmen kívül hagyható.

5 Probléma dekompozíció

Egy probléma dekomponálása során a problémát részproblémákra bontjuk, majd azokat tovább részletezzük, amíg nyilvánvalóan megoldható problémákat nem kapunk.

Sokszor egy probléma megoldását akár többféleképpen is fel lehet bontani részproblémák megoldásaira.

5.1 Dekompozíciós reprezentáció fogalma

A reprezentációhoz meg kell adnunk:

- a feladat részproblémáinak általános leírását
- a kiinduló problémát
- az egyszerű problémákat, amelyekről könnyen eldönthető, hogy megoldhatók-e vagy sem
- a dekomponáló műveleteket:
 - D: probléma \rightarrow probléma⁺
 - D(p) = $\langle p_1, \dots, p_n \rangle$

5.2 A dekompozíció modellezése ÉS/VAGY gráffal

Egy dekompozíciót egy ún. ÉS/VAGY gráffal szemléltetjük: -egy csúcs egy részproblémát jelöl, a startcsúcs a kiinduló problémát, a célcsúcsok a megoldható egyszerű problémákat. -egy élköteg egy dekomponáló művelet hatását írja le, és a dekomponált probléma csúcsából a dekomponálással előállított részproblémák csúcsaiba vezet.

- egy élköteg élei mutatják meg, hogy a dekomponált probléma megoldásához mely részproblémákat kell megoldani. Az élköteg élei között ezért ún. "ÉS" kapcsolat van: hiszen minden részproblémát meg kell oldani.
- egy csúcsból több élköteg is indulhat, ha egy probléma többféleképpen dekomponálható. Ezen élkötegek élei között ún. "VAGY" kapcsolat áll fenn: hiszen választhatunk, hogy melyik élköteg mentén oldjunk meg egy problémát.

5.3 ÉS/VAGY gráfok

1. AZ $R=(N,A)$ élsúlyozott irányított hiper-gráf, ahol az
 - N a csúcsok halmaza
 - $A \subseteq \{ (n,M) \in N \times N^+ \mid 0 \neq |M| < \infty \}$ a hiper-élek halmaza, $|M|$ a hiper-él rendje
 - ($c(n,M)$ az (n,M) költsége)
2. Egy csúcsból véges sok hiper-él indulhat
3. $(0 < \delta \leq c(n,M))$

5.4 Megoldás-gráf

Az eredeti problémát egyszerű problémákra visszavezető dekomponálási folyamatot az ÉS/VAGY gráf speciális részgráfja, az ún. megoldás-gráf jeleníti meg, amelyben:

- szerepel a startcsúcs
- a startcsúcsból minden más csúcsba vezet út, és minden csúcsból vezet út egy megoldás-gráfbeli célcsúcsba
- egy éllel együtt az összes azzal "ÉS" kapcsolatban álló él is (azaz a teljes élköteg) része a megoldás-gráfnak
- nem tartalmaz "VAGY" kapcsolatban álló él párokat

A megoldás a megoldás-gráfból olvasható ki.

5.5 Az n csúcsból az M csúcs-sorozatba vezető irányított hiper-út fogalma

Az $n \rightarrow M$ hiper-út ($n \in N, M \in N^+$) egy olyan véges részgráf, amelyben:

- M csúcsaiból nem indul hiper-él
- M -en kívüli csúcsokból csak egy hiper-él indul
- minden csúcs elérhető az n csúcsból egy közönséges irányított úton.

A megoldás-gráf egy olyan hiper-út, amely a startcsúcsból csupa célcsúcsba vezet.

5.6 Hiper-út bejárása

Az $n \rightarrow M$ hiper-út egy bejárásán a hiper-út csúcsaiból képzett sorozatoknak a felsorolását értjük:

- első sorozat: $\langle n \rangle$
- a C sorozatot a $C^{k \leftarrow K}$ sorozat követi (ahol a $k \in C$, és k minden C -beli előfordulásának helyén a K sorozat szerepel) feltéve, hogy a hiper-útnak van olyan (k, K) hiper-éle, ahol $k \notin M$.

5.7 Útkeresés ÉS/VAGY gráfban

Amikor a startcsúcsból induló hiper-utakat (ezek között vannak a megoldás-gráfok is, ha egyáltalán vannak ilyenek) a bejárásukkal írjuk le, akkor ezek a bejárások olyan közönséges irányított utak, amelyek csúcsai az eredeti ÉS/VAGY gráf csúcsainak sorozatai. Ezen utakból egy olyan közönséges irányított gráfot készíthetünk, amelyben a startcsúcs az ÉS/VAGY gráf startcsúcsából álló egy elemű sorozat, a célcsúcsait leíró sorozatok pedig kizárólag az ÉS/VAGY gráf célcsúcsainak egy részét tartalmazzák.

Ha ebben a közönséges gráfban megoldási utat találunk, akkor az egyben az eredeti ÉS/VAGY gráf megoldás-gráfja is lesz.

6 Keresések

6.1 KR vezérlési szintjei

Három féle vezérlési stratégiát különböztetünk meg:

- általános (független a feladattól, és annak modelljétől: nem merít sem a feladat ismereteiből, sem a modell sajátosságaiból.)
- modellfüggő (nem függ a feladat ismereteitől, de épít a feladat modelljének általános elemeire.)
- heurisztikus (a feladattól származó, annak modelljében nem rögzített, a megoldást segítő speciális ismeret)

Másik megközelítés alapján, kétféle általános stratégiát különböztetünk meg:

- nemmódosítható (lokális keresések, evolúciós algoritmus, rezolúció)
- módosítható (visszalépéses keresések, gráfkeresések)

6.2 Lokális keresések

A lokális keresés olyan KR, amely a probléma reprezentációs gráfjának egyetlen csúcsát (aktuális csúcs) és annak szűk környezetét tárolja (a globális munkaterületén). Kezdetben az aktuális csúcs a startcsúcs, és a keresés akkor áll le, ha az aktuális csúcs a célcúcs lesz.

Az aktuális csúcsot minden lépésben annak környezetéből vett "jobb" csúccsal cseréli le (keresési szabály).

A "jobság" eldöntéséhez (vezérlési stratégia) egy kiértékelő (cél-, rátermettségi-, heurisztikus) függvényt használ, amely reményeink szerint annál jobb értéket ad egy csúcsra, minél közelebb esik az a célhoz.

6.3 Hegymászó algoritmus

Mindig az aktuális (akt) csúcs legjobb gyermekére lép, amelyik lehetőleg nem a szülője.

(Megjegyzés: Az eredeti hegymászó algoritmus nem zárja ki a szülőre való lépést, viszont nem engedi meg, hogy az aktuális csúcsot egy rosszabb értékű csúcsra cseréljük, ilyenkor inkább leáll.)

Hátrányok:

Csak erős heurisztika esetén lesz sikeres: különben "eltéved" (nem talál megoldást), sőt zsákutcába jutva "beragad".

Segíthet, ha:

- véletlenül választott startcsúcsból újra- és újra elindítjuk (random restart local search)
- k darab aktuális csúcs legjobb k darab gyerekére lépünk (local beam search)
- gyengítjük a mohó stratégiáját (simulated annealing)

Lokális optimum hely körül vagy ekvidisztans felületen (azonos értékű szomszédos csúcsok között) található körön, végtelen működésbe eshet.

Segíthet ha:

- növeljük a memóriát (tabu search)

6.4 Tabu keresés

A globális munkaterületén az aktuális csúcson (akt) kívül nyilvántartja még:

- az utolsó néhány érintett csúcsot: Tabu halmaz
- az eddigi legjobb csúcsot: optimális csúcs (opt)

Egy keresési szabály minden lépésben

- az aktuális csúcsnak a legjobb, de nem a Tabu halmazban lévő gyerekére lép
- ha akt jobb, mint az opt, akkor opt az akt lesz
- frissíti akt-tal a sorszerkeztű Tabu halmazt

Terminálási feltételek:

- ha az opt a célsúcs
- ha az opt sokáig nem változik

Előnyök:

Tabu méreténél rövidebb köröket észleli, és ez segíthet a lokális optimum hely illetve az ekvidisztans felület körüli körök leküzdésében.

Hátrányok: A tabu halmaz méretét kísérletezéssel kell belőni.

Zsákutcába futva nem-módosítható stratégia miatt beragad.

6.5 Szimulált hűtés

A keresési szabály a következő csúcsot véletlenszerűen választja ki az aktuális (akt) csúcs gyermekei közül.

Ha az így kiválasztott új csúcs kiértékelő függvény-értéke nem rosszabb, mint az akt csúcsé (itt $f(új) \leq f(akt)$), akkor elfogadjuk aktuális csúcsnak.

Ha az új csúcs függvényértéke rosszabb (itt $f(új) > f(akt)$), akkor egy olyan véletlenített módszert alkalmazunk, ahol az új csúcs elfogadásának valószínűsége fordítottan arányos az $|f(akt) - f(új)|$ különbséggel:

$$e^{\frac{f(akt) - f(új)}{T}} > \text{random}[0,1]$$

6.6 Hűtési ütemterv

Egy csúcs elfogadásának valószínűségét az elfogadási képlet kitevőjének T együtthatójával szabályozhatjuk. Ezt egy (T_k, L_k) $k=1,2,\dots$ ütemterv vezérli, amely L_1 , majd L_2 lépésen keresztül T_2 , stb. lesz.

$$e^{\frac{f(current) - f(new)}{T_k}} > \text{rand}[0,1]$$

Ha T_1, T_2, \dots szigorúan monoton csökken, akkor egy ugyanannyival rosszabb függvényértékű új csúcsot kezdetben nagyobb valószínűséggel fogad el a keresés, mint később.

6.7 Lokális kereséssel megoldható feladatok

Erős heurisztika nélkül nincs sok esély a cél megtalálására.

- Jó heurisztikára épített kiértékelő függvénnyel elkerülhetőek a zsákutcák, a körök.

A sikerhez az kell, hogy egy lokálisan hozott rossz döntés ne zárja ki a cél megtalálását!

- Ez például egy erősen összefüggő reprezentációs-gráfban automatikusan teljesül, de kifejezetten előnytelen, ha a reprezentációs-gráf egy irányított fa. (Például az n- királynő problémákat csak tökéletes kiértékelő függvény esetén lehetne lokális kereséssel megoldani.)

6.8 A heurisztika hatása a KR működésére

A heurisztika olyan, a feladathoz kapcsolódó ötlet, amelyet közvetlenül építünk be egy algoritmusba azért, hogy annak eredményessége és hatékonysága javuljon (egyszerre képes javítani a futási időt és a memóriaigényt), habár erre általában semmiféle garanciát nem ad.

7 Visszalépéses keresés

A visszalépéses keresés egy olyan KR, amely:

- globális munkaterülete:
 - egy út a startcsúcsból az aktuális csúcsba (ezen kívül az útról leágazó még ki nem próbált élek)
 - kezdetben a startcsúcsot tartalmazó nulla hosszúságú út
 - terminálás célcsúccsal vagy startcsúcsból való visszalépéssel
- keresés szabályai:
 - a nyilvántartott út végéhez egy új (ki nem próbált) él hozzáfűzése, vagy a legutolsó él törlése (visszalépés szabálya)
- vezérlés stratégiája a visszalépés szabályát csak a legvégső esetben alkalmazza

7.1 Visszalépés feltételei

- Zsákutca: az aktuális csúcsból (azaz az aktuális út végpontjából) nem vezet tovább él
- Zsákutca torkolat: az aktuális csúcsból kivezető utak nem vezetnek célba
- Kör: az aktuális csúcs szerepel már korábban is az aktuális úton
- Mélységi korlát: az aktuális út hossza elér egy előre megadott értéket

7.2 Alacsonyabb rendű vezérlési stratégiák

- A vezérlési stratégia kiegészíthető:
 - sorrendi szabállyal: sorrendet ad az aktuális út végpontjából kivezető élek (utak) vizsgálatára
 - vágó szabállyal: megjelöli azokat az aktuális út végpontjából kivezető éleket (utakat), amelyeket nem érdemes megvizsgálni
- Ezek a szabályok lehetnek:
 - másodlagos vezérlési stratégiák (a probléma modelljének sajátosságaiból származó ötlet)
 - heurisztikák (a probléma ismereteire támaszkodó ötlet)

7.3 Első változat: VL1

A visszalépéses algoritmus első változata az, amikor a visszalépés feltételei közül az első kettőt építjük be a kereső rendszerbe.

Bebizonyítható: Véges körmentes irányított gráfokon a VL1 mindig terminál, és ha létezik megoldás, akkor talál egyet. UI: véges sok adott startból induló út van.

Rekurzív algoritmussal (VL1) szokták megadni.

7.4 Az n-királynő probléma új reprezentációs modellje

Az előző módszerek átalakították az n-királynő probléma reprezentációját:

Tekintsük a D_1, \dots, D_n halmazokat, ahol $D_i = 1 \dots n$

(ezek az i-dik sor szabad mezői).

Keressük azt az $(x_1, \dots, x_n) \in D_1 \times \dots \times D_n$ elhelyezést (x_i az i-dik sorban elhelyezett királynő oszloppozíciója),

amely nem tartalmaz ütést: minden i,j királynő párra:

$C_{ij}(x_i, x_j) \equiv (x_i \neq x_j \wedge |x_i - x_j| \neq |i - j|)$.

A visszalépéses keresés e modell változóinak értékeit határozza meg, miközben a bemutatott vágó módszerek egyike redukálják ezen változók D_i halmazait.

7.5 Bináris korlát-kielégítési modell

Keressük azt az $(x_1, \dots, x_n) \in D_1 \times \dots \times D_n$ n-est (D_i véges) amely kielégít néhány $C_{ij} \subseteq D_i \times D_j$ bináris korlátot.

Példa:

Házasságközvetítő probléma (n férfi, m nő, keressünk minden férfinak neki szimpatikus feleségjelöltet):

- Az i-dik férfi ($i=1..n$) felesége (x_i) a $D_i=1, \dots, m$ azon elemei, amelyekre fenn áll, hogy szimpatikus(i, x_i).
- Az összes (i,j)-re: $C_{ij}(x_i, x_j) \equiv (x_i, x_j)$ (azaz nincs bigámia)

7.6 Modellfüggő vezérlési stratégia

A korábban mutatott vágó módszereket az új modellben a bináris korlátok definiálják, de a korlátok jelentésétől függetlenül. Ezek a módszerek tehát nem heurisztikák, hanem modellfüggő vágó stratégiák:

Töröl(i,k): $D_i := D_i - \{ e \in D_i \mid \neg C_{ik}(e, x_k) \}$

Szűr(i,j) : $D_i := D_i - \{ e \in D_i \mid \forall f \in D_j : \neg C_{ij}(e, f) \}$

Modellfüggő sorrendi stratégiák is konstruálhatók:

- Mindig a legkisebb tartományú még kitöltetlen komponensek válasszunk előbb értéket.
- Ugyanazon korláthoz tartozó komponenseket lehetőleg közvetlenül egymás után töltjük ki.

7.7 Második változat: VL2

A visszalépéses algoritmus második változata az, amikor a visszalépés feltételei közül mindet beépítjük a kereső rendszerbe.

Bebizonyítható: A VL2 δ -gráfban mindig terminál. Ha létezik a mélységi korlátnál nem hosszabb megoldás, akkor megtalál egy megoldást. UI: véges sok adott korlátnál rövidebb startból induló út van.

Rekurzív algoritmussal (VL2) adjuk meg

```

1: akt := utolsó_csúcs(út)
2: if cél(akt) then return(nil) endif
3: if hossza(út) ≥ korlát then return(hiba) endif
4: if akt ∈ maradék(út) then return(hiba) endif
5: for  $\forall \acute{u}j \in \gamma(\text{akt}) - \pi(\text{akt})$  loop
6:   megoldás := VL2(fűz(út, új))
7:   if megoldás ≠ hiba then
8:     return(fűz((akt, új), megoldás)) endif
9: endloop
10: return (hiba)
```

7.8 Mélységi korlát szerepe

A VL2 nm talál megoldást (csak terminál), ha a megadott mélységi korlátnál csak hosszabb megoldási utak vannak.

A mélységi korlát önmagában is biztosítja a terminálást körök esetén is.

- Ez akkor előnyös, ha nincsenek rövid körök (a kettő hosszú köröket kiszűri a szülőcsúcs vizsgálat).

-Ilyenkor nem kell a rekurzív hívásnál a teljes aktuális utat átadni : elég az út hosszát, az aktuális csúcsot és annak szülőjét.

7.9 Értékelés

Előnyök:

- Mindig terminál, talál megoldást (a mélységi korláton belül)
- Könnyen implementálható
- Kicsi memória igény

Hátrányok:

- Nem ad optimális megoldást. (iterációba szervezhető)
- Kezdetben hozott rossz döntést csak sok visszalépés korrigál (visszaugrások keresés)
- Egy zsákutca részt többször is bejárhat a keresés

8 Gráfkeresés

A gráfkeresés olyan KR, amelynek:

- globális munkaterülete: a reprezentációs gráf startcsúcsból kiinduló már feltárt útjait tárolja (tehát egy részgráfot), és külön az egyes utak végeit, a nyílt csúcsokat
 - kiinduló értéke: a startcsúcs,
 - terminálási feltétel: megjelenik egy célcsúcs vagy megakad az algoritmus.
- keresés szabálya: egyik útvégi csúcs kiterjesztése
- vezérlés stratégiája: a legkedvezőbb csúcs kiterjesztésére törekszik

8.1 Általános gráfkereső algoritmus

Jelölések:

- keresőgráf (G): a reprezentációs gráf eddig bejárt és eltárolt része
- nyílt csúcsok halmaza (NYÍLT): kiterjesztésre várakozó csúcsok, amelyeknek gyerekeit még nem vagy nem eléggé jól ismerjük.
- kiterjesztett csúcsok halmaza (ZÁRT) : azok a csúcsok, amelyeknek a gyerekeit már előállítottuk.
- kiértékelő függvény (f : NYÍLT $\rightarrow \mathbb{R}$): kiválasztja a megfelelő nyílt csúcsot kiterjesztésre

8.2 Kritika

- Nem olvasható ki a megoldási út a kereső gráfból
 - Meg kell jegyezni a felfedezett utak nyomát.

Nem garantál optimális megoldást (sőt még a megoldást sem)

- Tároljuk el egy csúcsnál az odavezető eddig talált legjobb út költségét.

Körökre érzékeny

- Ha ehhez a csúcsához egy kört tartalmazó utat találunk, akkor annak költsége drágább lesz a tárolt értéknél, hiszen δ -gráfban vagyunk.