

Az Alice nyelvről

Korlátalapú programozás

Pallinger Péter

Kiegészítette, átdolgozta: Hanák Péter

2004. okt. 18. – Rev. 2005. okt. 11. - okt. 21.

1

1 Korlátalapú programozás

1.1 Korlátalapú programozás véges halmazokon

A korlátalapú programozást kombinatorikus feladatok megoldására szokták használni, ahol a megoldást jelentő változókra különböző kikötések tehetők, és a változók értékészlete korlátos, tipikusan egész számok egy véges halmaza.

A korlátalapú programozás két alaptechnikája a *korlátterjesztés* (constraint propagation) és a *korlátfelosztás* (constraint distribution).

A *korlátterjesztés* egy hatékony következtetési mechanizmus, amely egyidejűleg több olyan „terjesztőt” (propagator) használ, amelyek egy korláttárban (constraint store) gyűjtik a kikövetkeztetett információt.

A *korlátfelosztás* a problémát egymást kölcsönösen kizáró részekre bontja, amikor a korlátterjesztés mechanizmusa megakad.

A két technika változtatott alkalmazásával a terjesztő végül meg fogja találni a megoldást. A felosztás a generált részproblémák számának exponenciális növekedéshez vezethet. A robbanás kellően erős terjesztési (propagációs) szabályokkal megelőzhető.

Az Alice korlátmegoldó képességeit a MOZART-tól örökölte.

2 Példák

2.1 Egyszerű példa

Először is be töltjük be a lineáris korlátok felvételéhez szükséges csomagot.

```
open Linear;
```

Ezután hozzunk létre egy FD-változókat¹ tartalmazó vektort:

```
val #[x,y,z] = vec (3, [1`#10]);
```

Végül adjuk meg pl. a következő korlátokat:

```
post (`2 `* x `= y);  
post (z `< x);  
post (y `< `7);  
post (z `<> `1);
```

¹FD = Finite Domain, véges értelmezési tartomány.

Egy inspektorral figyelhetjük meg, hogyan alakul a változók értékkészlete az egyes korlátok felvétele után.

Figyeljük meg, hogy itt nem volt szükségünk korlátfelosztásra, de ez persze nem mindig van így.

2.2 Egy kicsit bonyolultabb példa

2.2.1 A feladat

Álljon itt a sokak által ismert példa:

$$SEND + MORE = MONEY.$$

Ebben az egyenletben minden betű egy (tízes számrendszerbeli) számjegyet jelöl. A feladat egyetlen megoldása:

$$9567 + 1085 = 10652.$$

2.2.2 ALICE-megoldás

Először definiálnunk kell egy ún. *script*-et a probléma leírására:

```

fun money () =
  let
    val v as #[S,E,N,D,M,O,R,Y] = Linear.vec (8, [0`#9])
  in
    distinct v;
    post (S `<> `0);
    post (M `<> `0);
    post (`1000`*S `+ `100`*E `+ `10`*N `+ D `+
          `1000`*M `+ `100`*O `+ `10`*R `+ E `=
          `10000`*M `+ `1000`*O `+ `100`*N `+ `10`*E `+ Y);
    distribute (FD.FIRSTFAIL, v);
    {S,E,N,D,M,O,R,Y}
  end;

```

Mivel ez a probléma keresés nélkül nem oldható meg, használjuk a beépített keresőt:

```
Search.searchAll money;
```

Megnézhetjük a megoldást így:

```
inspect it;
```

mfp05a – Alice: korlátalapú programozás

5

Vagy így is, ráadásul az alábbi parancs a keresési fát is megmutatja:

```
Explorer.exploreAll money;
```

2.3 Még egy klasszikus feladat – az N-királyó probléma

```

fun nQueens n () =
  let
    val v = FD.rangeVec (n, (0, n-1))
    val v1 = Vector.mapi (fn (i,x)=>(x, i)) v
    val v2 = Vector.mapi (fn (i,x)=>(x,~i)) v
  in
    FD.distinct v;
    FD.distinctOffset v1;
    FD.distinctOffset v2;
    FD.distribute(FD.FIRSTFAIL, v);
    v
  end

```

mfp05a – Alice: korlátalapú programozás

6

A megoldáshoz felhasználjuk az `FD.distinctOffset` korlátot, amelynek a szignatúrája:

```
FD.distinctOffset : (FD.fd * int) vector
```

és a jelentése, ha a vektor az (fd_j, i_j) párokból áll:

$$\text{distinctOffset } v = \text{distinct } (fd_0 + i_0, fd_1 + i_1, \dots, fd_n + i_n)$$

A megoldás megkereséséhez az adott méretű táblára egy segédfüggvényt definiálunk:

```
fun fiveQueens () = nQueens 5 ();  
Search.searchAll fiveQueens;  
Explorer.exploreAll fiveQueens;
```

3 Áttekintés

Az Alice-ben több modul is található korlátprogramozás megvalósítására.

3.1 FD

Véges tartományokon (értsd: nem negatív egészeken) értelmezett változókat hoz létre, szűkítő szabályokat vesz fel és alkalmaz rajtuk.

Ha egy propagátor felébred, akkor megpróbálja az általa figyelt változók értékészletét leszűkíteni. A propagátorok egy része csak tartományszűkítést hajt végre, mások halmazszűkítést végeznek, míg megint másoknál beállítható, hogy melyik módszert használják. Egy propagátor megszűnik, ha minden hozzá rendelt változó behelyettesítődött. Persze vannak olyan propagátorok is, amelyek már előbb (de ez ritka).

3.1.1 A FD struktúra függvényei

```
type fd  
type bin = fd
```

```

exception Tell
datatype domain_element = SINGLE of int | RANGE of int * int
type domain = domain_element vector
datatype relation = LESS | LESSEQ | EQUAL | NOTEQUAL |
                  GREATER | GREATEREQ
datatype dist_mode = NAIVE | FIRSTFAIL | SPLIT_MIN |
                  SPLIT_MAX | NBSUSPS
datatype assign = MIN | MID | MAX
inf
sup
fd dom
fdVec (n, dom)
range (il, ih)
rangeVec (n, il, ih)
bin ()
binVec n
assign (as, v)
toInt f

```

```

future f
fromInt i
isBin f
sum (v, rel, r)
sumC (v, rel, r)
sumAC (v, rel, r)
sumCN (v, rel, r)
sumACN (v, rel, r)
sumD (v, rel, r)
sumCD (v, rel, r)
plus (x, y, z)
minus (x, y, z)
times (x, y, z)
power (x, i, z)
divI (x, i, z)
modI (x, i, z)
plusD (x, y, z)
minusD (x, y, z)

```

```
timesD (x, y, z)
divD (x, i, z)
modD (x, i, z)
min (x, y, z)
max (x, y, z)
equal (x, y)
notequal (x, y)
distance (x, y, rel, z)
less (x, y)
lessEq (x, y)
greater (x, y)
greaterEq (x, y)
disjoint (x, i1, y, i2)
disjointC (x, i1, y, i2, c)
tasksOverlap (x, i1, y, i2, c)
distinct v
distinctOffset v
distinct2 v
```

```
atMost (x, v, i)
atLeast (x, v, i)
exactly (x, v, i)
element (x, v, z)
conj (x, y, z)
disj (x, y, z)
exor (x, y, z)
nega (x, y)
impl (x, y, z)
equi (x, y, z)
Reified.fd (dom, c)
Reified.fdVec (n, dom, c)
Reified.card (i1, v, i2, c)
Reified.sum (v, rel, r, c)
Reified.sumC (v, rel, r, c)
Reified.sumAC (v, rel, r, c)
Reified.sumCN (v, rel, r, c)
Reflect.min x
```

```

Reflect.max x
Reflect.mid x
Reflect.nextLarger (x, i)
Reflect.nextSmaller (x, i)
Reflect.size x
Reflect.dom x
Reflect.domList x
Reflect.nbSusps x
Reflect.eq (x, y)
distribute (spec, v)
choose (spec, v)

```

3.2 Linear

Lineáris egyenlőtlenségekként engedi megfogalmazni a korlátokat. A lineáris korlátokat az FD-modul összeg-korlátjaivá fogalmazza át, nem feltétlenül optimális módon.

Mivel a Linear modul az állandó kifejezéseken nagymértékű egyszerűsítést végez, bizonyos esetekben előfordulhat, hogy túl akar lépni az egészek implementációtól függő

határán, amely az FD-korlátokra is érvényes. Ilyen esetben az egyszerűsítés egy olyan FD-változó bevezetésével akadályozható meg, amelyhez egyetlen értéket rendelünk.

A bekezdés az Alice Manuel-ből angolul: Note also that since the linear module extensively performs folding of constant expressions, it eventually might exceed the implementation specific integer constant limit of finite domain constraints. In such a case, folding can be prevented by introducing a finite domain variable that is assigned a singleton value.

3.2.1 A Linear struktúra szignatúrája

```

signature LINEAR =
  sig
    infix 7 `*
    infix 6 `+ ` -
    infix 5 `#
    infix 4 `= `<> `> `>= `< `<=
    infix 3 `<->

```

```

datatype domain_element =
  `` of int
  | `# of int * int

type domain = domain_element list

datatype term =
  FD of FD.fid
  | ` of int
  | `+ of term * term
  | `- of term * term
  | `* of term * term

datatype rel =
  `< of term * term
  | `<= of term * term
  | `= of term * term
  | `<> of term * term

```

```

  | `>= of term * term
  | `> of term * term
  | `<-> of rel * term

val var : domain option -> term
val bin : unit -> term
val vec : int * domain -> term vector

val distribute : FD.dist_mode * term vector -> unit
val distinct : term vector -> unit
val post : rel -> unit
end

```

3.3 FS

Véges halmazváltozókat és azokra felvehető korlátokat tartalmaz. A véges halmazváltozó (finite set variable) olyan változó, amelynek az értéke a nemnegatív számok egy halmaza.

Lássunk egy példát:

```
open FS;  
val x = FS.fs NONE;  
val y = FS.fs NONE;  
FS.disjoint (x,y);  
FS.subset (x,y);  
FS.Int.max (y,FD.fd (SOME #[RANGE (1,2)]));  
FS.incl (FD.fd (SOME #[SINGLE (3)]),y);  
FS.excl (FD.fd (SOME #[SINGLE (0)]),y);
```

3.3.1 Az FS struktúrában található korlátok

```
type fd  
type bin = fd  
type fs  
exception Tell of {cause : exn}  
inf  
sup
```

```
fs spec  
fsVec (n,spec)  
compl (x,y)  
compl (x,y)  
complIn (x,y,z)  
incl (x,y)  
excl (x,y)  
card (x,y)  
cardRange (l,u,x)  
isIn (i,x)  
difference (x,y,z)  
intersect (x,y,z)  
intersectN (v,x)  
union (x,y,z)  
unionN (v,x)  
subset (x,y)  
disjoint (x,y)  
disjointN v
```

```

distinct (x,x)
distinctN v
partition (v,x)
value x
emptyValue ()
singletonValue i
universalValue ()
isValue x
Int.min (x,y)
Int.max (x,y)
Int.convex x
Int.match (x,v)
Int.minN (x,v)
Int.maxN (x,v)
Reified.isIn (i,x,c)
Reified.areIn (is,x,cs)
Reified.incl (x,y,c)
Reified.equal (x,y,c)

```

```

Reified.partition (vs,is,x,cs)
Reflect.card x
Reflect.lowerBound x
Reflect.unknown x
Reflect.upperBound x
Reflect.cardOfLowerBound x
Reflect.cardOfUnknown x
Reflect.cardOfUpperBound x

```

3.4 A keresési tér megvalósításáról

A keresési feladatokat az Alice végzi a Space struktúra segítségével, amely úgynevezett elsőrendű keresési tereket valósít meg.

Ezek használatával pl. egy mélységi keresés elvileg könnyen implementálható:

```

fun searchOne s =
  case Space.ask s of
    Space.FAILED           => NONE
  | Space.SUCCEEDED       => SOME (Space.merge s)

```

```

| Space.ALTERNATIVES(n) =>
  let
    val c = Space.clone s
  in
    (Space.commit(s, Space.SINGLE 1)
     ;case searchOne s of
       NONE    => (Space.commit(c, Space.RANGE(2,n))
                   ;searchOne c
                   )
       | SOME s => SOME s
     )
  end;

```

Megjegyzés: Az eredetileg az Alice Manual „The Space structure” c. fejezetében közölt searchOne függvényt szintaktikai hiba miatt nem lehet lefordítani. Az Alice az in és az end kulcsszók között álló alábbi szekvenciális kifejezést véli rossznak, feltehetően hibás a fordítóprogram:

```

in
  Space.commit(s, SINGLE 1);

```

```

      case searchOne s of
        NONE    => ...
      end;

```

Ha a szekvenciális kifejezést a következő változatok egyikében írjuk föl, a fordítás sikerül:

```

in
  Space.commit(s, SINGLE 1); case searchOne s of
    NONE    => ...
  end;

```

vagy

```

in
  Space.commit(s, SINGLE 1)
  ; case searchOne s of
    NONE    => ...
  end;

```

vagy

```

in
  (Space.commit(s, SINGLE 1)
   ;case searchOne s of
     NONE    => ...
   )
end;

```

Példa searchOne alkalmazására:

```
searchOne (Space.space money);
```

A Search struktúrában ennél kifinomultabb keresési módszereket is találhatunk.

3.4.1 A Space struktúra szignatúrája

```

signature SPACE =
sig

    eqtype 'a space

```

```

datatype state =
  MERGED
  | FAILED
  | SUCCEEDED
  | ALTERNATIVES of int

datatype verbose_state =
  VERBOSE_SUSPENDED of verbose_state
  | VERBOSE_MERGED
  | VERBOSE_FAILED
  | VERBOSE_SUCCEEDED_STUCK
  | VERBOSE_SUCCEEDED_ENTAILED
  | VERBOSE_ALTERNATIVES of int

datatype choice =
  SINGLE of int
  | RANGE of int * int

```

```

val space : (unit -> 'a) -> 'a space

val ask : 'a space -> state
val askVerbose : 'a space -> verbose_state
val clone : 'a space -> 'a space
val commit : 'a space * choice -> unit
val inject : 'a space * ('a -> unit) -> unit
val merge : 'a space -> 'a
val kill : 'a space -> unit
val waitStable : 'a space -> unit
end

```

3.4.2 A függvények és típusok leírása

The type of computation spaces:

```
eqtype 'a space
```

This datatype is used to communicate the state of a computation space:

```
datatype state = MERGED | FAILED | SUCCEEDED |
               ALTERNATIVES of int
```

This datatype is used to communicate the verbose state of a computation space:

```
datatype verbose_state = VERBOSE_SUSPENDED of verbose_state
                       | VERBOSE_MERGED
                       | VERBOSE_FAILED
                       | VERBOSE_SUCCEEDED_STUCK
                       | VERBOSE_SUCCEEDED_ENTAILED
                       | VERBOSE_ALTERNATIVES of int
```

This datatype is used to select alternatives of the selected choice of a space:

```
datatype choice = SINGLE of int | RANGE of int * int
```

space p

returns a newly created space, in which a thread containing an application of the unary function p to the root variable of the space is created.

ask s

waits until s becomes stable or merged and then returns the state of s.

If s is merged, MERGED is returned.

If s is stable and failed, `FAILED` is returned.

If s is stable and succeeded and there are no threads in s synchronizing on choices, `SUCCEEDED` is returned.

If s is stable and succeeded and there is at least one thread in s which synchronizes on a choice, `ALTERNATIVES i` is returned, where i gives the number of alternatives on the selected choice.

Synchronizes on stability of s .

Raises a runtime error if the current space is not admissible for s .

`askVerbose s`

returns the state of s in verbose form. Reduces immediately, even if s is not yet stable.

If s becomes merged, `VERBOSE_MERGED` is returned.

If s becomes suspended (that is, blocked but not stable), `VERBOSE_SUSPENDED t` is returned. t is a future that is bound to the verbose state of s when s becomes stable again.

If s is stable and failed, `VERBOSE_FAILED` is returned.

If s is stable and succeeded and there are no threads in s synchronizing on choices, either `VERBOSE_SUCCEEDED_STUCK`, or `VERBOSE_SUCCEEDED_ENTAIL` is returned. The former happens when s still contains threads.

If s is stable and succeeded and there is at least one thread in s which synchronizes on a choice, `VERBOSE_ALTERNATIVES i` is returned, where i gives the number of alternatives on the selected choice.

Does not synchronize on stability of s .

Raises a runtime error if the current space is not admissible for s .

`clone s`

blocks until s becomes stable and returns a new space which is a copy of s .

Synchronizes on stability of s .

Raises a runtime error if s is already merged, or if the current space is not admissible for s .

`commit (s, c)`

blocks until s becomes stable and then commits to alternatives of the selected choice of s .

If c is `RANGE(l, h)`, then all but the $l, l+1, \dots, h$ alternatives of the selected choice of s are discarded. If a single alternative remains, the topmost choice is replaced by this alternative. If no alternative remains, the space is failed.

`SINGLE i` is an abbreviation for `RANGE(i, i)`.

Synchronizes on stability of s .

Raises a runtime error, if s has been merged already, if there exists no selected choice in s , or if the current space is not admissible for s .

`inject (s, p)`

creates a thread in s which contains an application of p to the root variable of s .

Does not synchronize on stability of s .

Raises a runtime error if s is already merged, or if the current space is not admissible for s .

`merge s`

merges s with the current space and returns the root variable of s .

Does not synchronizes on stability of s .

Raises a runtime error if s is already merged, or if the current space is not admissible for s .

`kill s`

kills s by injecting a failure into a space.

`waitStable s`

synchronizes on stability of s and returns unit.

3.5 A Search struktúra

A struktúrában többféle keresési eljárás van implementálva, és mindegyiknek több (újraszámítást használó stb.) változata is szerepel benne.

3.5.1 A Search struktúra függvényei

```
searchOne script
searchOneDepth (script,rcd)
searchOneDepthS (script,rcd)
searchOneBound (script,bound,rcd)
searchOneBounds (script,bound,rcd)
searchOneIter (script,rcd)
searchOneIterS (script,rcd)
searchOneLDS (script,m)
searchOneLDSS (script,m)
searchAll script
searchAllDepth (script,rcd)
searchAllDepthS (script,rcd)
searchBest (script,order)
searchBestBAB (script,order,rcd)
searchBestBABS (script,order,rcd)
searchBestRestart (script,order,rcd)
searchBestRestartS (script,order,rcd)
```

References

- [1] The Alice manual, 2004.10.05, <http://www.ps.uni-sb.de/alice/>
- [2] Constraintprogrammierung, Niko Paltzer, 2004.04.05,
<http://www.ps.uni-sb.de/courses/seminar-ws03/ConstraintProgrammierung.pdf>