Implementace Prologu
(pokračování)

Interpret Prologu

Základní principy:

- klauzule uloženy jako termy
- **programová databáze**
  - pro uložení klauzulí
  - má charakter haldy
    - umožňuje modifikovatelnost prologovských programů za běhu (`assert`)
- klauzule zřetězeny podle pořadí načtení
  - triviální zřetězení

Vyhodnocení dotazu: volání procedur řízené unifikací

Interpret – Základní princip

1. Vyber redukovaný literál („první", tj. nejlevější literál cíle)
2. Lineárním průchodem od začátku databáze najdi klauzuli, jejíž hlava má stejný funktor a stejný počet argumentů jako redukovaný literál
3. V případě nalezení klauzule založ bod volby procedury
4. Založ dále okolí první klauzule (velikost odvozena od počtu lokálních proměnných v klauzuli)
5. Proveď unifikaci literálu a hlavy klauzule
6. Úspěch ⇒ přidej všechny literály klauzule k cíli („doleva", tj. na místo redukovaného literálu). Tělo prázdné ⇒ výpočet se s úspěchem vrací do klauzule, jejíž adresa je v aktuálním okolí.
7. Neúspěch unifikace ⇒ z bodu volby se obnoví stav a pokračuje se v hledání další vhodné klauzule v databázi.
8. Pokud není nalezena odpovídající klauzule, výpočet se vrací na předchozí bod volby (krátí se lokální i globální zásobník).
9. Výpočet končí neúspěchem: neexistuje již bod volby, k němuž by se výpočet mohl vrátit.
10. Výpočet končí úspěchem, jsou-li úspěšně redukovány všechny literály v cíli.

Interpret – vlastnosti

- Lokální i globální zásobník
  - při dopředném výpočtu roste
  - při zpětném výpočtu se zmenšuje

  Lokální zásobník se může zmenšit při dopředném úspěšném výpočtu deterministické procedury.
- Unifikace argumentů hlavy – obecný unifikační algoritmus
  Současně poznačí adresy instanciovaných proměnných na stopu.
- „Interpret":

```
interpret(Query, Vars) :- call(Query), success(Query, Vars).
interpret(_,_) :- failure.
```

  - dotaz vsazen do kontextu této speciální nedeterministické procedury
  - tato procedura odpovídá za korektní reakci systému v případě úspěchu i neúspěchu

Optimalizace: Indexace

- Zřetězení klauzulí podle pořadí načtení velmi neefektivní
- Provázání klauzulí se stejným funktorem a aritou hlavy (tvoří jednu **proceduru**)
  - tj., **indexace procedur**
- Hash tabulka pro vyhledání první klauzule
- Možno rozhodnout (parciálně) determinismus procedury

Indexace argumentů

```
a(1) :- q(1).
a(a) :- b(X).
a([A|T]) :- c(A,T).
```

- Obecně nedeterministická
- Při volání s alespoň částečně instanciovaným argumentem vždy deterministická (pouze jedna klauzule může uspět)
- **Indexace podle prvního argumentu**

  Základní typy zřetězení:
  - podle pořadí klauzulí (aktuální argument je volná proměnná)
  - dle konstant (aktuální je argument konstanta)
  - formální argument je seznam (aktuální argument je seznam)
  - dle struktur (aktuální argument je struktura)

Indexace argumentů II

- Složitější indexační techniky
  - podle všech argumentů
  - podle nejvíce diskriminujícího argumentu
  - kombinace argumentů (indexové techniky z databází)
    - zejména pro přístup k faktům

Tail Recursion Optimization, TRO

Iterace prováděna pomocí rekurze ⇒ lineární paměťová náročnost cyklů

Optimalizace koncové rekurze *(Tail Recursion Optimisation)*, TRO:
Okolí se odstraní **před** rekurzivním voláním posledního literálu klauzule, pokud je klauzule resp. její volání deterministické.

Řízení se nemusí vracet:

- v případě úspěchu se rovnou pokračuje
- v případě neúspěchu se vrací na předchozí bod volby („nad” aktuální klauzulí)
  - aktuální klauzule nemá dle předpokladu bod volby

Rekurzivně volaná klauzule může být volána přímo z kontextu volající klauzule.

TRO – příklad

Program:

```
append([], L, L).
append([A|X], L, [A|Y]) :- append(X, L, Y).
```

Dotaz:

```
?- append([a,b,c], [x], L).
```

append volán rekurzivně 4krát

- bez TRO: 4 okolí, lineární paměťová náročnost
- s TRO: 1 okolí, konstatní paměťová náročnost

Optimalizace posledního volání

TRO pouze speciální případ
obecné **optimalizace posledního volání *(Last Call Optimization)*, LCO**

Okolí (před redukcí posledního literálu)
odstraňováno vždy, když leží na vrcholu zásobníku.

Nutné úpravy interpretu

- disciplina směrování ukazatelů
  - vždy „mladší” ukazuje na „starší” („mladší” budou odstraněny dříve)
  - z lokálního do globálního zásobníku

  vyhneme se vzniku „visících odkazů” při předčasném odstranění okolí
- „globalizace” lokálních proměnných: lokální proměnné posledního literálu
  - nutno přesunout na globální zásobník
  - pouze pro neinstanciované proměnné

Překlad

Překlad

- Motivace:
  - dosažení vyšší míry optimalizace
  - kompaktní kód
  - částečná nezávislost na hardware
- Etapy překladu:
  1. zdrojový text ⇒ kód abstraktního počítače
  2. kód abstraktního počítače ⇒ kód (instrukce) cílového počítače
- Výhody:
  - snazší přenos jazyka (nutno přepsat jen druhou část)
  - kód abstraktního počítače možno navrhnout s ohledem na jednoduchost překladu; prostor pro strojově nezávislou optimalizaci
- Překlad Prologu založen na principu existence abstraktního počítače
  V dalším se věnujeme jeho odvození a vlastnostem

Parciální vyhodnocení

- Jak navrhnout **Warrenův abstraktní počítač**?
  - prostřednictvím parciálního vyhodnocení
- **Parciální vyhodnocení**
  - forma zpracování programu,
    tzv. transformace na úrovni zdrojového kódu
  - dosazení známých hodnot vstupních parametrů
    a vyhodnocení všech operací nad nimi
    - příklad: vyhodnocení aritmetických výrazů nad konstantami

Parciální vyhodnocení – příklad

```
a(X,Y) :- b(X), c(X,Y).      a(X,Y) :- b(Y), c(Y,X).

b(1).   b(2).   b(3).   b(4).

c(1,2).   c(1,3).   c(1,4).   c(2,3).   c(2,4).   c(3,4).
```

Dotaz `?- a(2,Z).`
lze společně s uvedeným programem parciálně vyhodnotit na nový program

`a’(3).  a’(4).  a’(1).`

a nový dotaz

`?- a’(Z).`

Je evidentní, že dotaz nad parciálně vyhodnoceným programem bude zpracován mnohem rychleji (efektivněji) než v případě původního programu.

Parciální vyhodnocení II

Konstrukce překladače: parciálním vyhodnocením interpretu
Problémy:

- příliš složitá operace
  - vyhodnocení se musí provést vždy znovu pro každý nový program
- výsledný program příliš rozsáhlý
- nedostatečná dekompozice
  - zejména při použití zdrojového jazyka jako implementačního jazyka interpretu

Vhodnější:

- využití („ručního”) parciálního vyhodnocení pro návrh abstraktního počítače
  1. nalezení operací zdrojového jazyka, které lze dekomponovat do jednodušších operací
  2. dekomponujeme tak dlouho, až jsou výsledné operace dostatečně jednoduché
     nebo již neexistují informace pro parciální vyhodnocení

Parciální vyhodnocení Prologu

Cílová operace: **unifikace**. Důvod:

- řízení výpočtu poměrně podrobné i v interpretu
- unifikace v interpretu atomickou operací
- unifikace v interpretu nahrazuje řadu podstatně jednodušších operací
  (testy, přiřazení, předání a převzetí parametrů . . .)
- většina unifikací nevyžaduje obecnou unifikaci a lze je nahradit jednoduššími operacemi

Zviditelnění unifikace: transformací zdrojového programu

- termy reprezentujeme kopírováním struktur na globálním zásobníku
- parametry procedur jsou vždy umístěny na globální zásobník (predikátem `put/2`)
  a předávány jsou pouze adresy
- formálním parametrem procedury jsou pouze volné proměnné,
  které se v hlavě vyskytují pouze jednou
- všechny unifikace jsou explicitně zachyceny voláním predikátu `unify/2`

Explicitní unifikace

Příklad: append/3 s explicitní unifikací:

```
append(A1, A2, A3) :- unify(A1,[]),       | append([],L,L).
                      unify(A2,L),        |
                      unify(A3,L).        |
append(A1, A2, A3) :- unify(A1,[A|X]),    | append([A|X],L,[A|Y] :-
                      unify(A2,L),        |
                      unify(A3,[A|Y]),    |
                      put(X,B1),          |       append(X,L,Y).
                      put(L,B2),          |
                      put(Y,B3),          |
                      append(B1,B2,B3).   |
```

Cíl: parciálně vyhodnotit predikáty `unify/2` a `put/2`

Pomocné termy a predikáty

- term `$addr$(A)` – odkaz na objekt s adresou A
- predikát `is_addr(P,V)` – je-li P ve tvaru `$addr$(A)`, pak V se unifikuje s hodnotou slova na adrese A (jinak predikát selže)
- predikát `:=(X,T)` – přiřadí volné proměnné X term T;
  X musí být volná proměnná.
- predikát `repres(A,Tag,V)` – uloží do proměnné Tag příznak a do proměnné V hodnotu slova na adrese A.
  A musí být adresa na globálním zásobníku,
  Tag i V musí být volné proměnné.
  - příznak: informace o struktuře součástí objektu
    volná proměnná FREE, konstanta CONST, celé číslo INT, odkaz REF, složený term FUNCT
- je-li A adresa a `i` celočíselná konstanta, pak výraz A+`i` reprezentuje adresu o `i` slov vyšší (ukazatelová aritmetika)

`unify` pro volnou proměnnou

`unify(A,T)` unifikuje term na adrese A (aktuální parametr) s termem T (formální parametr). Podle hodnoty T mohou nastat následující 4 případy:

1) T je volná proměnná: výsledkem je instanciace

```
unify(A,T) :- var(T),
              ( var(A), create_var(A)
              ;  true ),
              T := $addr$(A).
```

Disjunkce garantuje, že A je korektní adresa na globálním zásobníku: nutný run-time test, tedy nelze využít při parc. překladu. Lze proto přepsat na

```
unify(A,T) :- var(T),
              unify_var(A,T).
```

kde `unify_var/2` vloží do T odkaz nebo založí novou proměnnou.

`unify` pro konstantu

2) T je konstanta: výsledkem je test nebo přiřazení

```
unify(A,T) :-
    atomic(T),
    ( ( var(A), create_var(A), instantiate_const(A,T) )
    ; ( repres(A,Tag,Value), Tag == 'FREE', instantiate_const(A,T)
      ; Tag == 'CONST', Value == T )
    ).
```

kde `instantiate_const/2` uloží do slova s adresou A hodnotu T.
Opět možno přepsat do kompaktního tvaru

```
unify(A,T) :-
    atomic(T),
    unify_const(A,T).
```

kde `unify_const/2` provede příslušný test nebo přiřazení.

unify pro složený term

3) T je složený term: dvoufázové zpracování, v první fázi test nebo založení funktoru, v druhé rekurzivní unifikace argumentů

```
unify(A,T) :-
     struct(T),
     functor(T,F,N),
     unify_struct(F,N,A),
     T =.. [_|Tl],
     unify_args(Tl,A+1).
```

Predikát `unify_struct/3` je analogický výše použitým predikátům `unify_var/2` a `unify_const/2`.

Druhá fáze:

```
unify_args([],_).
unify_args([T|Tl], A) :-
    unify(A,T),
    unify_args(Tl,A+1).
```


unify pro odkaz

4) T je odkazem: nutno použít obecnou unifikaci (není žádná informace pro parciální vyhodnocení)

```
unify(A,T) :-
    is_addr(T,P),
    unification(A,P).
```


put

Parametry procedur jsou vždy umístěny na globální zásobník predikátem `put/2` a předávány jsou pouze adresy.
Predikát `put/2` je jednodušší (nikdy nepotřebuje unifikaci)

```
put(T,B) :-
   is_addr(T,B).            % T je odkaz
put(T,B) :-
   var(T),                  % T je proměnná
   create_var(B),
   T := $addr$(B).
put(T,B) :-
   atomic(T),               % T je konstanta
   create_const(B,T).
put(T,B) :-
   struct(T),               % T je struktura
   create_struct(B,T).
```


První klauzule append/3

Parciální vyhodnocení první klauzule programu append/3

```
append(A1, A2, A3) :- unify(A1,[]),      | append([],L,L).
                      unify(A2,L),       |
                      unify(A3,L).       |
```

upraví

```
unify(A1,[]) na unify_const(A1,[])
unify(A2,L)  na L:=$addr$(A2)
unify(A3,L)  na is_addr(L,T), unification(T,A3)
```

posloupnost `L:=$addr$(A2), is_addr(L,T)` odpovídá přejmenování T na A2

⇒ není nutné vytvářet novou proměnnout T

⇒ stačí provést `unification(A2,A3)`

Výsledný tvar append/3

```
append(A1, A2, A3) :-
    unify_const(A1,[]),
    unification(A2,A3).
append(A1, A2, A3) :-
    unify_struct('.',2,A1),
    unify_var(A,A1+1),
    unify_var(X,A1+2),
    unify_var(L,A2),
    unify_struct('.',2,A3),
    unification(A1+1,A3+1),
    unify_var(Y,A3+2),

    append(A1+2,A2,A3+2).
```

```
append(A1, A2, A3) :-
      unify(A1,[]),
      unify(A2,L), unify(A3,L).
append(A1, A2, A3) :-
      unify(A1,[A|X]),



      unify(A2,L),
      unify(A3,[A|Y]),


      put(X,B1), put(L,B2), put(Y,B3),
      append(B1,B2,B3).
```

Většina původních unifikací převedena na jednodušší operace;
unifikace v posledním kroku je nezbytná (důsledkem dvojího výskytu proměnné)

Jiný příklad

`a(c,s(f),d,X) :- g(X).`

Procedurální pseudokód (testy a přiřazení) a kód abstraktního počítače:

```
procedure a(X,Y,Z,A) is             |  a(A1, A2, A3, A4) :-
    if ( X == 'c' &&                |      unify_const(c,A1),
         ( is_struct(Y,'s',1) &&     |       unify_struct(s,1,A2),
           first_arg(Y) == 'f' ) && |          unify_const(f,A2+1),
         Z == 'd'  )                |      unify_const(d,A3),
    then                            |      unify_var(A,A4),
        call g(A)                   |      g(A4).
    else                            |
        call fail                   |
end  procedure
```

tj. posloupnost testů jako v procedurálním jazyce

Vyzkoušejte si: `delete(X, [Y|T], [Y|T1]) :- delete(X, T, T1).`

Warrenův abstraktní počítač, WAM I.

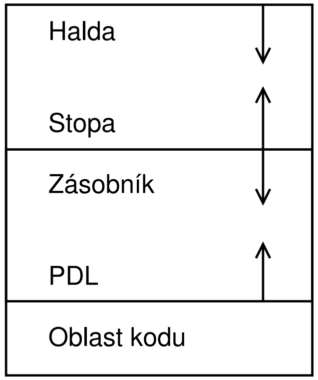
Navržen D.H.D. Warrenem v roce 1983, modifikace do druhé poloviny 80. let

Datové oblasti:

- **Oblast kódu** (programová databáze)
  - separátní oblasti pro uživatelský kód (modifikovatelný) a vestavěné predikáty (nemění se)
  - obsahuje rovněž všechny statické objekty (texty atomů a funktorů apod.)
- **Lokální zásobník *(Stack)***
- **Stopa *(Trail)***
- **Globální zásobník n. halda*(Heap)***
- **Pomocný zásobník *(Push Down List, PDL)***
  - pracovní paměť abstraktního počítače
  - použitý v unifikaci, syntaktické analýze apod.

Rozmístění datových oblastí

- Příklad konfigurace



- Halda i lokální zásobník musí růst stejným směrem
  - lze jednoduše porovnat stáří dvou proměnných srovnáním adres
    využívá se při zabránění vzniku visících odkazů

Registry WAMu

- **Stavové registry**:

  P čitač adres (**P**rogram counter)

  CP adresa návratu (**C**ontinuation **P**ointer)

  E ukazatel na nejmladší okolí (**E**nvironment)

  B ukazatel na nejmladší bod volby (**B**acktrack point)

  TR vrchol stopy (**TR**ail)

  H vrchol haldy (**H**eap)

  HB vrchol haldy v okamžiku založení posledního bodu volby (**H**eap on **B**acktrack point)

  S ukazatel, používaný při analýze složených termů (**S**tructure pointer)

  CUT ukazatel na bod volby, na který se řezem zařízne zásobník
- **Argumentové registry**: `A1,A2,...` (při předávání parametrů n. pracovní registry)
- **Registry pro lokální proměnné**: `Y1,Y2,...`
  - abstraktní znázornění lok. proměnných na zásobníku

Typy instrukcí WAMu

- **put instrukce** – příprava argumentů před voláním podcíle
  - žádná z těchto instrukcí nevolá obecný unifikační algoritmus
- **get instrukce** – unifikace aktuálních a formálních parametrů
  - vykonávají činnost analogickou instrukcím `unify` u parc. vyhodnocení
  - obecná unifikace pouze při `get_value`
- **`unify` instrukce** – zpracování složených termů
  - jednoargumentové instrukce, používají registr S jako druhý argument
  - počáteční hodnota S je odkaz na 1. argument
  - volání instrukce `unify` zvětší hodnotu S o jedničku
  - obecná unifikace pouze při `unify_value` a `unify_local_value`
- **Indexační instrukce** – indexace klauzulí a manipulace s body volby
- **Instrukce řízení běhu** – předávání řízení a explicitní manipulace s okolím

Instrukce put a get: příklad

Příklad: `a(X,Y,Z) :- b(f,X,Y,Z).`

```
get_var     A1,A5
get_var     A2,A6
get_var     A3,A7
put_const   A1,f
put_value   A2,A5
put_value   A3,A6
put_value   A4,A7
execute     b/4
```


WAM – optimalizace

1. Indexace klauzulí
2. Generování optimální posloupnosti instrukcí WAMu
3. Odstranění redundancí při generování cílového kódu.

- Příklad: `a(X,Y,Z) :- b(f,X,Y,Z).`

  naivní kód (vytvoří kompilátor pracující striktně zleva doprava) vs.
  optimalizovaný kód (počet registrů a tedy i počet instrukcí/přesunů v paměti snížen):

```
get_var     A1,A5        |    get_var     A3,A4
get_var     A2,A6        |    get_var     A2,A3
get_var     A3,A7        |    get_var     A1,A2
put_const   A1,f         |    put_const   A1,f
put_value   A2,A5        |    execute     b/4
put_value   A3,A6        |
put_value   A4,A7        |
execute     b/4          |
```

Instrukce WAMu

get **instrukce**		put **instrukce**		unify **instrukce**	
get_var	Ai,Y	put_var	Ai,Y	unify_var	Y
get_value	Ai,Y	put_value	Ai,Y	unify_value	Y
get_const	Ai,C	put_unsafe_value	Ai,Y	unify_local_value	Y
get_nil	Ai	put_const	Ai,C	unify_const	C
get_struct	Ai,F/N	put_nil	Ai	unify_nil	
get_list	Ai	put_struct	Ai,F/N	unify_void	N
		put_list	Ai		

instrukce řízení		**indexační instrukce**			
allocate		try_me_else	Next	try	Next
deallocate		retry_me_else	Next	retry	Next
call	Proc/N,A	trust_me_else	fail	trust	fail
execute	Proc/N				
proceed		cut_last		switch_on_term	Var,Const,List,Struct
		save_cut Y		switch_on_const	Table
		load_cut Y		switch_on_struct	Table

WAM – indexace

- Provázání klauzulí: instrukce XX_me_else:
  - první klauzule: try_me_else; založí bod volby
  - poslední klauzule: trust_me_else; zruší nejmladší bod volby
  - ostatní klauzule: retry_me_else; znovu použije nejmladší bod volby po neúspěchu
- Provázání podmnožiny klauzulí (podle argumentu):
  - try
  - retry
  - trust
- „Rozskokové" instrukce (dle typu a hodnoty argumentu):
  - switch_on_term Var, Const, List, Struct
    výpočet následuje uvedeným návěstím podle typu prvního argumentu
  - switch_on_YY: hashovací tabulka pro konkrétní typ (konstanta, struktura)

Příklad indexace instrukcí

Procedure

```
a(atom) :- body1.
a(1) :- body2.
a(2) :- body3.
a([X|Y]) :- body4.
a([X|Y]) :- body5.
a(s(N)) :- body6.
a(f(N)) :- body7.
```

odpovídají instrukce

```
a:    switch_on_term L1, L2, L3, L4
L2:   switch_on_const  atom :L1a
                       1    :L5a
                       2    :L6a
L3:   try              L7a
      trust            L8a
L4:   switch_on_struct s/1  :L9a
                       f/1  :L10a
L1:   try_me_else L5
L1a:  body1
L5:   retry_me_else L6
L5a:  body2
L6:   retry_me_else L7
L6a:  body3
L7:   retry_me_else L8
L7a:  body4
L8:   retry_me_else L9
L8a:  body5
L9:   retry_me_else L10
L9a:  body6
L10:  trust_me_else fail
L10a: body7
```


WAM – řízení výpočtu

- execute Proc: ekvivalentní příkazu goto
- proceed: zpracování faktů
- allocate: alokuje okolí (pro některé klauzule netřeba, proto explicitně generováno)
- deallocate: uvolní okolí (je-li to možné, tedy leží-li na vrcholu zásobníku)
- call Proc,N: zavolá Proc, N udává počet lok. proměnných (odpovídá velikosti zásobníku)
  Možná optimalizace: vhodným uspořádáním proměnných
  lze dosáhnout postupného zkracování lokálního zásobníku

  a(A,B,C,D) :- b(D), c(A,C), d(B), e(A), f.

  generujeme instrukce

```
allocate
call b/1,4
call c/2,3
call d/1,2
call e/1,1
deallocate
execute f/0
```