Poznámky z přednášek
Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta

Plánování a rozvrhování
BONUS

Peter Černo, 2010
petercerno@gmail.com

Garant: doc. RNDr. Roman Barták, Ph.D.
E-mail: Roman.Bartak@mff.cuni.cz
Domácí stránka: `http://ktiml.ms.mff.cuni.cz/~bartak/`

Anotace: Přednáška podává úvod do plánování a rozvrhování. Zaměřena je především na algoritmy pro řešení plánovacích a rozvrhovacích problémů s důrazem na použití technik splňování omezujících podmínek.

Sylabus:

1. Úvod: definice problému plánování a rozvrhování, příklady použití, řešící formalismy (prohledávací algoritmy, omezující podmínky, SAT), reprezentace plánovacích problémů (množinová, klasická).

2. Plánování ve stavovém prostoru (dopředné, zpětné, STRIPS), plánování v prostoru plánů (PSP, PoP), neoklasické plánování (plánovací graf, Graphplan).

3. Plánovaní jako SAT a CSP, plánovací heuristiky.

4. Plánování s časem a zdroji (temporální problémy, plánování s kronikami, alokace zdrojů).

5. Řešení rozvrhovacích problémů: klasické rozvrhování, Grahamova klasifikace problémů, rozvrhování jako problém splňování omezujících podmínek, podmínky popisující zdroje a precedence, rozvrhovací strategie.

6. Problémové studie.

Cíl předmětu: Naučit studenty základní techniky plánovacích a rozvrhovacích algoritmů a teorii o nich.

Literatura:

1. Brucker, Peter. Scheduling algorithms. 2nd, rev. and enl. ed. Berlin : Springer, 1998. xii, 342 s.

2. Baptiste, Philippe - Le Pape, Claude - Nuijten, Wim. Constraint-based scheduling : applying constraint programming to scheduling problems. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2001. xii, 198 s. International series in operations research and management science.

3. Ghallab, Malik - Nau, Dana - Traverso, Paolo. Automated Planning: Theory and Practice. San Francisco : Morgan Kaufmann, 2004.

This page is intentionally left blank.

25.06.2009 Th
PETER ČERNO

PLÁNOVANIE A ROZVRHOVANIE

MNOŽINOVÁ REPREZENTÁCIA

STAV SYSTÉMU JE POPÍSANÝ MNOŽINOU VÝROKOV

$\boxed{L = \{p_1, \dots, p_n\}}$ KONEČNÁ MN. VÝR. SYMBOLOV

$\boxed{\Sigma = (S, A, \gamma)}$ PLÁNOVACIA DOMÉNA NAD L

$S \subseteq P(L)$ STAV s JE $\subseteq L$.

AKCIA $a \in A$ JE $(\text{precond}(a), \text{effects}^-(a), \text{effects}^+(a))$ DISJUNKTNÉ

AK a JE POUŽITEĽNÁ NA s $\Leftrightarrow$ $\text{precond}(a) \subseteq s$, POTOM

$\Rightarrow$ PRECH. FCIA. $\gamma(s,a) = (s - \text{effects}^-(a)) \cup \text{effects}^+(a)$

$\boxed{P = (\Sigma, s_0, g)}$ PLÁNOVACÍ PROBLÉM

$s_0 \in S$ POČIATOČNÝ STAV

$g \subseteq L \rightsquigarrow S_g = \{s \in S \mid g \subseteq s\}$

$\boxed{\text{PLÁN}}$ $\pi = \langle a_1, \dots, a_k \rangle$

JE RIEŠENÍM $\Leftrightarrow$ $g \subseteq \gamma(s_0, \pi)$ REDUNDANTNÉ / MINIMÁLNE

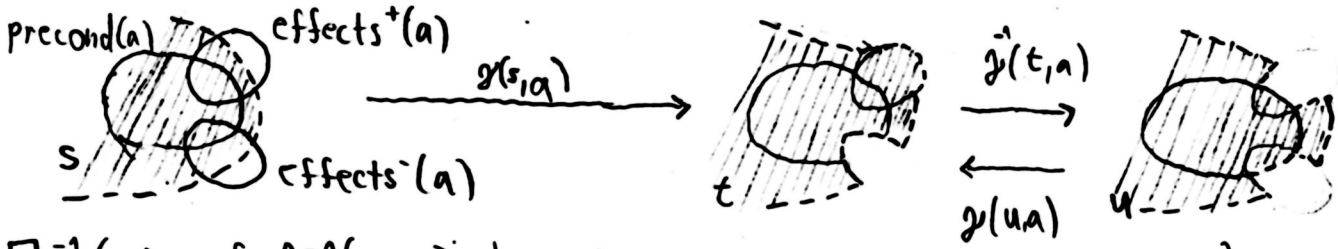
$\Gamma(s) = \{\gamma(s,a) \mid a \in A$ JE APLIKOVATEĽNÁ NA $s\}$

$\Gamma_\infty(s) = \Gamma(s) \cup \Gamma^2(s) \cup \dots$

P MÁ RIEŠENIE $\Leftrightarrow$ $S_g \cap \Gamma_\infty(s_0) \neq \emptyset$

a JE RELEVANTNÁ PRE g $\Leftrightarrow$ $g \cap \text{eff}^+(a) \neq \emptyset \wedge g \cap \text{eff}^-(a) = \emptyset$

$\Rightarrow \gamma^{-1}(g,a) = (g - \text{effects}^+(a)) \cup \text{precond}(a)$



$\Gamma^{-1}(g) = \{\gamma^{-1}(g,a) \mid a \in A$ JE RELEVANTNÁ PRE $g\}$

$\Gamma_\infty^{-1}(g) = \Gamma^{-1}(g) \cup (\Gamma^{-1})^2(g) \cup \dots$

P MÁ RIEŠENIE $\Leftrightarrow$ s_0 JE $\supseteq$ NEJAKÉHO PRVKU Z $\Gamma_\infty^{-1}(g)$.

KLASICKÁ REPREZENTÁCIA

(NEMÁME FUNKCIE)

JAZYK L = KONEČNÁ MNOŽINA PREDIKÁT. SYMBOLOV, KONŠTANT

ATÓM = PREDIKÁTOVÝ SYMBOL S ARGUMENTAMI (A) PREMENNÉ)

STAV = MNOŽINA INŠTANCIOVANÝCH ATÓMOV

< FLUENT ATOMS ... PRAVD. HODNOTA SA MENÍ
RIGID ... —||— NEMENÍ

CWA (CLOSED WORLD ASSUMPTION) = ATÓM, KT. NIE JE V STAVE EXPLICITNE UVEDENÝ, NEPLATÍ

OPERÁTOR $O = (\underbrace{name(o)}_{n(x_1,\dots,x_k)}, \underbrace{precond(o)}_{\text{LITERÁLY}}, \underbrace{effects(o)}_{\text{LITERÁLY - IBA FLUENT}})$

AKCIA = PLNE INŠTANCIOVANÝ OPERÁTOR

a JE POUŽITEĽNÁ NA $s \Leftrightarrow precond^+(a) \subseteq s \wedge precond^-(a) \cap s = \emptyset$

$\Rightarrow \gamma(s,a) = (s - effects^-(a)) \cup effects^+(a)$

PLÁNOVACIA DOMÉNA $\Sigma = (S, A, \gamma)$ NAD L, S OP. O

PLÁNOVACÍ PROBLÉM $P = (\Sigma, s_0, g)$

s SPĽŇUJE $g \Leftrightarrow g^+ \subseteq s \wedge g^- \cap s = \emptyset$,

$S_g = \{ s \in S \mid s \text{ SPĽŇUJE } g \}$

ZÁPIS PLÁNOVACIEHO PROBLÉMU $\equiv (O, s_0, g)$

a JE RELEVANTNÁ PRE $g \Leftrightarrow g \cap effects(a) \neq \emptyset \wedge$
$g^- \cap effects^+(a) = \emptyset \wedge g^+ \cap effects^-(a) = \emptyset$

$\Rightarrow \gamma^{-1}(g,a) = (g - effects(a)) \cup precond(a)$

P MÁ RIEŠENIE $\Leftrightarrow S_g \cap \Gamma_\infty(s_0) \neq \emptyset \Leftrightarrow s_0$ JE $\supseteq$ PRVKU Z $\Gamma_\infty^{-1}(g)$

ROZŠÍRENIA : SYNTAKTICKÉ (TYPY, EXISTEN. KVANTIF. CIELE)

- PODMIENENÉ OPERÁTORY (MINI-OPERÁTORY)
- DISJUNKTÍVNE PREDPOKLADY
- PRIPOJENÉ PROCEDÚRY K OPERÁTOROM
- AXIÓMY (OPATRNE PRE FLEXIBILNÉ ATÓMY - FLUENTY)

26.06.2009 Fr
PETER ČERNO

PLÁNOVANIE A ROZVRHOVANIE

PLÁNOVANIE V STAVOVOM PRIESTORE / V PRIESTORE PLÁNOV

PLÁNOVANIE SO STAVMI

FORWARD SEARCH
BACKWARD SEARCH (LIFTOVANÁ VERZIA, STRIPS)
PROBLÉMOVO ZÁVISLÉ

FORWARD-SEARCH (O, s_0, g)

$s \leftarrow s_0, \quad \pi \leftarrow \emptyset$
loop
  if s SATISFIES g then return π
  $E \leftarrow \{a \mid a$ IS GROUND INST. OF $o \in O$, a IS APPLICABLE TO $s\}$
  if $E = \emptyset$ then return failure
  nondeterministically choose $a \in E$
  $s \leftarrow \gamma(s, a), \quad \pi \leftarrow \pi . a$

KOREKTNÁ, ÚPLNÁ METÓDA,
PROBLÉM: VYSOKÝ VETVIACI FAKTOR → HEURISTIKA, OREZANIE PREHL. PRIESTORU

PODOBNE BACKWARD-SEARCH (O, s_0, g)

DETEKCIA CYKLOV: $(g_1, \dots, g_k)$, $\exists i < k : g_i \subseteq g_k$ → UKONČENIE PREHĽAD.

LIFTED-BACKWARD-SEARCH (O, s_0, g)

...
$A \leftarrow \{\boxed{(o, \theta)} \mid o$ IS STANDARDIZATION OF OPERATOR $\in O$,
  θ IS MGU FOR AN ATOM OF g AND AN ATOM OF
  effects(o), $\gamma^{-1}(\theta(g), \theta(o))$ IS DEFINED $\}$
...
nondeterministically choose $(o, \theta) \in A$
$\pi \leftarrow \theta(o) . \theta(\pi)$
$g \leftarrow \gamma^{-1}(\theta(g), \theta(o))$

KOMPLIKOVANÁ DETEKCIA CYKLOV

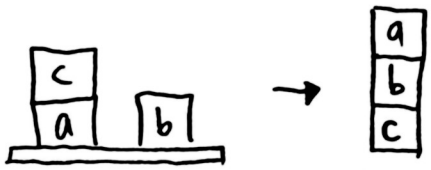
STRIPS

Z PODCIELA RIEŠI VŽDY LEN ČASŤ ZODPOVEDAJÚCU PREDPOKLADOM POSLEDNEJ PRIDANEJ AKCIE

GROUND-STRIPS(O, s, g)

$\pi \leftarrow \emptyset$
LOOP
  if s SATISFIES g then return π
  $A \leftarrow \{a \mid a$ IS GROUND INST. OF OP. $\in O$ RELEVANT FOR $g\}$
  if $A = \emptyset$ then return failure
  nondeterministically choose $a \in A$
  $\pi' \leftarrow$ GROUND-STRIPS$(O, s, \text{precond}(a))$
  if $\pi' =$ failure then return failure
  $s \leftarrow \gamma(s, \pi')$
  $s \leftarrow \gamma(s, a)$
  $\pi \leftarrow \pi . \pi' . a$

SUSSMANOVA ANOMÁLIA



unstack(c, a)
putdown(c)
pickup(a)
stack(a, b) → SPLNENIE CIEĽA on(a, b)
unstack(a, b)
putdown(a)
REDUNDANTNE
pickup(b)
stack(b, c) → SPLNENIE CIEĽA on(b, c)
pickup(a)
stack(a, b) → ALE MUSÍME ZNOVU SPLNIŤ on(a, b)

DOMÉNOVÉ ZNALOSTI PRE SVET KOCIEK & ALGORITMUS STACK-CONTAINERS

26.06.2009 Fr
PETER ČERNO

PLÁNOVANIE A ROZVRHOVANIE

PLÁNOVANIE V PRIESTORE PLÁNOV

POČIATOČNÝ STAV, CIEĽ ZAKÓDUJEME AKO ŠPECIÁLNE AKCIE

a_0 ... ŽIADNE PREDPOKLADY, EFEKT = POČIATOČNÝ STAV,
a_0 JE PRED VŠETKÝMI OSTATNÝMI AKCIAMI

a_∞ ... CIEĽ JE ZAKÓDOVANÝ AKO PREDPOKLAD, ŽIADNE EFEKTY,
a_∞ JE ZA VŠETKÝMI OSTATNÝMI AKCIAMI

PLÁNOVANIE ZALOŽENÉ NA ODSTRAŇOVANÍ KAZOV (FLAWS)

UZLY = ČIASTOČNÉ PLÁNY

ČIASTOČNÝ PLÁN $\Pi = (A, <, B, L)$

$A = \{a_1, \dots, a_k\}$ ČIASTOČNE INŠTANCIOVANÉ PLÁN. OPERÁTORY

$<$ ... ČIASTOČNÉ USPORIADANIE NA A

B ... MNOŽINA VÁZIEB $x = y$, $x \neq y$, $x \in D_i$

L ... MNOŽINA KAUZÁLNYCH VZŤAHOV $a_i \xrightarrow{p} a_j$
$a_i, a_j \in A$, $a_i < a_j$
p JE VÝRAZ, KT. JE EFEKTOM a_i A PREDPOKLADOM a_j
V B SÚ VÁZBY ZVIAZUJÚCE PRÍSLUŠNÉ PREMENNÉ V p

OTVORENÝ CIEĽ (OPEN GOAL) = PREDPOKLAD p NEJAKÉHO OPERÁTORU b, O KT. NEBOLO ROZHODNUTÉ, AKO HO SPLNIŤ, TJ. NEEXISTUJE KAUZÁLNA VÁZBA $a_i \xrightarrow{p} b$

$\Rightarrow$ NÁJDI OPERÁTOR a (EXISTUJÚCI / NOVÝ), KTORÝ MOŽNO POUŽIŤ NA SPLNENIE p (MÁ p MEDZI EFEKTAMI, MÔŽE BYŤ PRED b)

ZVIAŽ PREMENNÉ, VYTVOR KAUZÁLNU VÁZBU

HROZBA (THREAT) = AKCIA, KTORÁ MÔŽE PORUŠIŤ KAUZÁLNU VÁZBU:

KEĎ JE $a_i \xrightarrow{p} a_j$ KAUZÁLNA VÁZBA A AKCIA b MÁ EFEKT UNIFIKOVATEĽNÝ S NEGÁCIOU p A MÔŽE SA NACHÁDZAŤ MEDZI a_i A a_j, POTOM b JE HROZBA

(1) USPORIADAJ b PRED a_i

(2) USPORIADAJ b ZA a_j

(3) NAVIAŽ PREMENNÉ V b TAK, ŽE NERUŠÍ PLATNOSŤ p.

ČIASTOČNÝ PLÁN $\Pi = (A, <, B, L)$ JE RIEŠIACIM PLÁNOM PRE $P = (\Sigma, s_0, g) \Leftrightarrow$

(1) ČIAST. USP. $<$ A VÁZBY B SÚ GLOB. KONZISTENTNÉ
- V ČIAST. USP. NIE SÚ CYKLY
- MÔŽEM PREMENNEJ PRIRADIŤ HODNOTU PRÍSL. DOMÉNY TAK, ŽE NÁJDEM HODNOTY OSTATNÝCH PREM. KONZISTENTNE S B

(2) ĽUBOVOĽNÁ LINEÁRNE USPORIADANÁ POSTUPNOSŤ PLNO INŠTANCIOVANÝCH AKCIÍ A SPĽŇAJÚCICH $<$ A B VEDIE Z s_0 DO STAVU SPĽŇAJÚCEHO g.

VETA: ČIASTOČNÝ PLÁN $\Pi = (A, <, B, L)$ JE RIEŠIACI, KEĎ: (1) NEMÁ ŽIADNE KAZY (TJ. OTV. CIELE, HROZBY)
(2) ČIAST. USP. $<$ A VÁZBY B SÚ GLOB. KONZISTENTNÉ

(INDUKCIA PODĽA DĹŽKY PLÁNU)

PSP = PLAN-SPACE PLANNING (Π) DETERMIN.

```
flaws ← OpenGoals(Π) ∪ Threats(Π)
if flaws = ∅ then return Π else select φ ∈ flaws
resolvers ← Resolve(φ, Π)   (if = ∅ then failure)
choose ρ ∈ resolvers AND. Π' ← Refine(ρ, Π)
return PSP(Π')
```

NONDETERM.

26.06.2009 Fr
PETER ČERNO

PLÁNOVANIE A ROZVRHOVANIE

OTVORENÉ CIELE MÔŽEME EFEKTÍVNE ZISTIŤ UDRŽOVANÍM AGENDY PREDPOKLADOV AKCIÍ

VŠETKY HROZBY MOŽNO NÁJSŤ PREISKÚMANÍM VŠETKÝCH TROJÍC AKCIÍ $O(n^3)$, ALEBO INKREMENTÁLNE:

→ PRIDANIE AKCIE ... $O(n^2)$

→ PRIDANIE KAUZÁLNEJ VÄZBY ... $O(n)$

POUŽÍVAME IBA KONZISTENTNÉ ZJEDNOTENIA PLÁNU

→ KONZISTENCIA USP.: DETEKCIA CYKLOV / TRANZIT. UZÁVER

→ KONZISTENCIA B:

AK NIE JE ¬ ... EFEKTÍVNE NAPR. POMOCOU AC

AK JE ¬ ... NP-ÚPLNÝ PROBLÉM

POZOR! PRIESTOR PLÁNOV NIE JE KONEČNÝ

PoP(Π, agenda) POPULÁRNA INŠTANCIA PSP

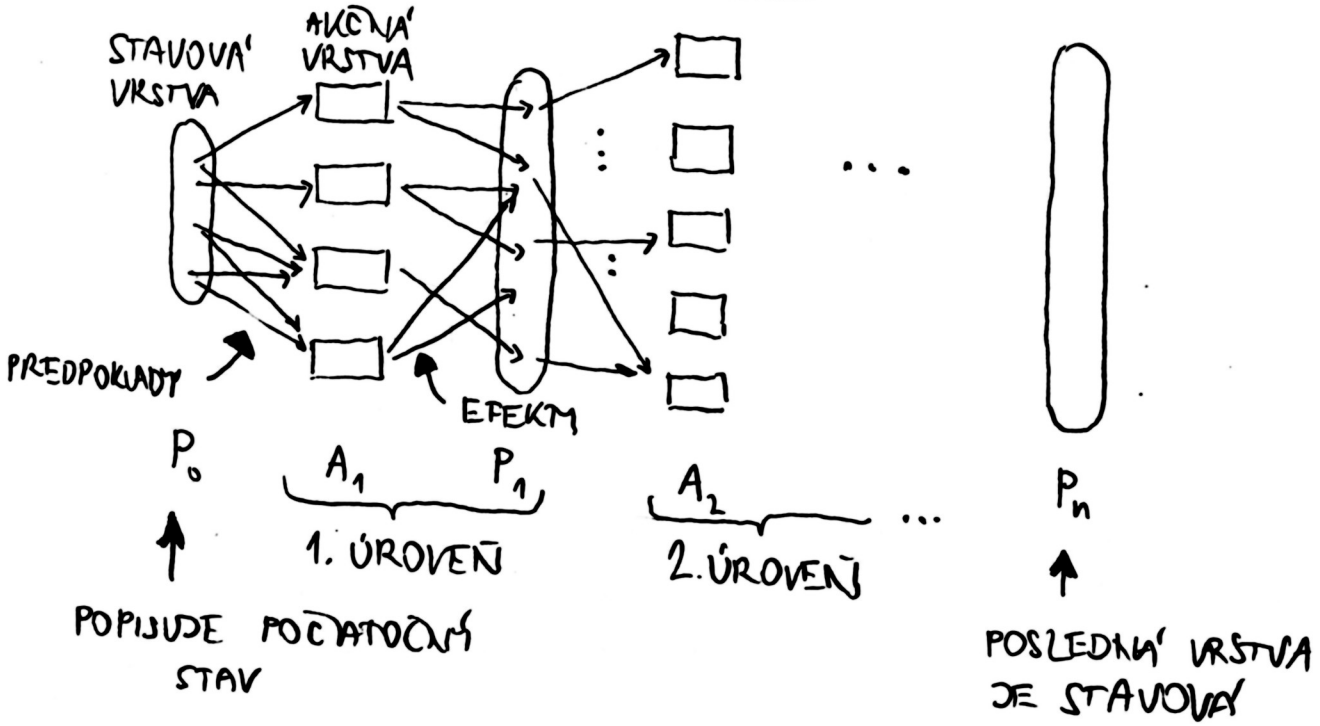
```
if agenda = ∅ then return Π
select (a_j, p) in and remove it from agenda
relevant ← PROVIDERS(p, Π)  (if = ∅ then failure)
nondeterm. choose a_i ∈ relevant
L ← L ∪ {(a_i -p-> a_j)}
UPDATE B
if a_i is new in A then
    UPDATE A WITH a_i, UPDATE < WITH (a_i < a_j), (a_0 < a_i < a_∞)
    UPDATE agenda WITH ALL PRECONDITIONS OF a_i
foreach threat on (a_i -p-> a_j) or due to a_i do
    nondeterm. choose resolver and refine Π
return PoP(Π, agenda)
```

PLÁNOVANIE S PLÁNOVACÍM GRAFOM

NAMIESTO STRATÉGIE NAJMENŠÍCH ZÁVÁZKOV (LEAST-COMMITMENT) POUŽÍVAME STRATÉGIU SILNÝCH ZÁVÁZKOV
- AKCIE SÚ PLNE INŠTANCIOVANÉ
- JE ZVOLENÉ ICH MIESTO V PLÁNE

STROM DOSIAHNUTEĽNOSTI (HĽBKY d) $O(k^d)$ UZLOV
⇝ GRAF DOSIAHNUTEĽNOSTI (NEPRAKTICKY VEĽKÝ)
POSKYTUJE NUTNÚ A POSTAČUJÚCU PODMIENKU DOSIAHNUTEĽNOSTI DANÉHO STAVU

PLÁNOVACÍ GRAF POSKYTUJE IBA NUTNÚ PODM. DOSIAHN.
JE ORIENTOVANÝ VRSTVENÝ GRAF
KAŽDÁ VRSTVA OBSAHUJE BUĎ (EXKLUZÍVNE)
- INŠTANCIOVANÉ ATÓMY ≡ STAVOVÁ VRSTVA
- AKCIE ≡ AKČNÁ VRSTVA



HRANY: VEDÚ Z ATÓMOV DO AKCIE, PRE KTORÚ SÚ TO PREDPOKLADY
Z AKCIE DO ATÓMOV POPISUJÚCICH EFEKTY
- HRANY PRE NEG. EFEKTY SÚ OZNAČENÉ ZVLÁŠŤ
- NEGATÍVNE EFEKTY SA ZO STAVU NEMAŽÚ

27.06.2009 Sa
PETER ČERNO

PLÁNOVANIE A ROZVRHOVANIE

AKCIE (a, b) SÚ NEZÁVISLÉ $\Leftrightarrow$

$$effects^-(a) \cap (precond(b) \cup effects^+(b)) = \emptyset \wedge$$
$$\wedge\ effects^-(b) \cap (precond(a) \cup effects^+(a)) = \emptyset$$

NECH π JE MNOŽINA NAVZÁJOM NEZÁVISLÝCH AKCIÍ

π JE POUŽITEĽNÁ NA s $\Leftrightarrow$

$$precond(\pi) = \bigcup \{ precond(a) \mid a \in \pi \} \subseteq s$$

APLIKÁCIA π NA s:

$$\gamma(s, \pi) = (s - effects^-(\pi)) \cup effects^+(\pi)$$

VETA: $\gamma(s, \pi) = \gamma(s, \langle a_1, \dots, a_k \rangle)$, $\forall \langle a_1, \dots, a_k \rangle$ PERM. π.

VRSTVENÝ PLÁN $\Pi = \langle \pi_1, \dots, \pi_k \rangle$

JE RIEŠENÍM PLÁN. PROBLÉMU (O, s_0, g) $\Leftrightarrow$

- KAŽDÁ π_i NEZÁVISLÁ
- π_1 POUŽITEĽNÁ NA s_0, π_2 NA $\gamma(s_0, \pi_1)$, ...
- $g \subseteq \gamma(s_0, \langle \pi_1, \dots, \pi_k \rangle)$

no-op AKCIA PRE ATÓM p ... α_p

$$precond(\alpha_p) = effect^+(\alpha_p) = \{p\},\ effect^-(\alpha_p) = \emptyset$$

MUTUAL EXCLUSION (MUTEX)

- DVE ZÁVISLÉ AKCIE SA NEMÔŽU VYSKYTNÚŤ NARAZ V PRVEJ AKČNEJ VRSTVE ($\Rightarrow$ ICH POZITÍVNE EFEKTY NEMÔŽU BYŤ NARAZ V PRVEJ STAVOVEJ VRSTVE) ... IBA AK ...
- DVA ATÓMY NEMÔŽU BYŤ SPOLOČNE V JEDNEJ VRSTVE, KEĎ IDE O POZ. A NEG. EFEKT 1 AKCIE ... IBA AK ...

- DVE <u>AKCIE</u> a A b SÚ <u>MUTEX</u> V ÚROVNI A_i, KEĎ
  (1) a A b SÚ <u>ZÁVISLÉ</u>, <u>ALEBO</u>
  (2) <u>PREDPOKLAD a JE MUTEX PREDPOKLADU b</u> V ÚROVNI P_{i-1}

  ⇝ ZNAČÍME μA_i

- DVA <u>ATÓMY</u> p A q SÚ <u>MUTEX</u> V ÚROVNI P_i, KEĎ
  (1) <u>KAŽDÁ AKCIA</u> V A_i, KTORÁ MÁ p AKO POZITÍVNY EFEKT, <u>JE MUTEX KAŽDEJ AKCIE</u>, KTORÁ MÁ q AKO POZITÍVNY EFEKT, <u>A</u>
  (2) V A_i NIE JE <u>ŽIADNA AKCIA</u>, KTORÁ BY MALA p I q AKO POZITÍVNY EFEKT

  ⇝ ZNAČÍME μP_i

<u>GRAPHPLAN</u>

(1) EXPANZIA - PRIDÁVA VRSTVY DO PLÁNOV. GRAFU
(2) EXTRAKCIA - POKÚSI SA VYBRAŤ VRSTVENÝ PLÁN

<u>EXPAND</u>$(\langle P_0, A_1, \mu A_1, P_1, \mu P_1, \dots, A_{i-1}, \mu A_{i-1}, P_{i-1}, \mu P_{i-1} \rangle)$

$A_i \leftarrow \{a \in A \mid \text{precond}(a) \subseteq P_{i-1} \wedge \text{precond}^2(a) \cap \mu P_{i-1} = \emptyset\}$

$P_i \leftarrow \bigcup_{a \in A_i} \text{effects}^+(a)$

$\mu A_i \leftarrow \{(a,b) \in A_i^2,\ a \neq b \mid (a,b)$ SÚ ZÁVISLÉ, ALEBO
$\exists\, p \in \text{precond}(a),\ q \in \text{precond}(b) : (p,q) \in \mu P_{i-1}\}$

$\mu P_i \leftarrow \{(p,q) \in P_i^2,\ p \neq q \mid \forall a,b \in A_i\ \cancel{a \neq b}$
$p \in \text{effects}^+(a) \wedge q \in \text{effects}^+(b) \Rightarrow (a,b) \in \mu A_i$

27.06.2009 Sa
PETER ČERNO

PLÁNOVANIE A ROZVRHOVANIE

ÚROVEŇ PEVNÉHO BODU

: $\exists k \; \forall i > k$

$P_i = P_k$, $\mu P_i = \mu P_k$, $A_i = A_k$, $\mu A_i = \mu A_k$

NÁJDEME NAJMENŠIE k TAKÉ, ŽE: $|P_{k-1}| = |P_k|$, $|\mu P_{k-1}| = |\mu P_k|$

EXTRAKCIA PLÁNU

SPÄTNE Z ÚROVNE P_i OBSAHUJÚCEJ $\forall$ CIEĽOVÉ ATÓMY
JEDNÁ SA O PREHĽADÁVANIE AND/OR GRAFU

NOGOOD

CIEĽ NIE JE MOŽNÉ SPLNIŤ, TJ. MNOŽINA ÚROKOV AKO CELOK JE NEKOMPATIBILNÁ

KEĎ SA DO DANEJ ÚROVNE DOSTANEME NESKÔR S ROVNAKÝM CIEĽOM, VÍ VIEME, ŽE SA HO NEPODARÍ SPLNIŤ (JEHO SPLNENIE ZÁLEŽÍ IBA NA VRSTVÁCH S MENŠÍM POREDOVÝM ČÍSLOM)

NESPLNENÉ CIEĽE SI PRE KAŽDÚ VRSTVU PAMÄTÁME FORMOU TABUĽKY ∇, TZV. NOGOOD

EXTRACT (G, g, i)

SNAŽÍ SA SPLNIŤ CIEĽ g NA ÚROVNI i

```
if i = 0 then return <>
if g ∈ ∇(i) then return failure
π_i ← GP-SEARCH(G, g, ∅, i)
if π_i ≠ failure then return π_i
∇(i) ← ∇(i) ∪ {g}
return failure
```

HĽADÁ MNOŽINU AKCIÍ SPĽŇAJÚCU DANÝ CIEĽ

GP-SEARCH (G, g, π_i, i)

```
if g = ∅ then
  π ← EXTRACT(G, ∪_{a∈π_i} precond(a), i-1)
  if π = failure then return failure
  return π.⟨π_i⟩
else
  SELECT ANY p ∈ g
  resolvers ← {a ∈ A_i | p ∈ effects⁺(a) ∧
      ∀b ∈ π_i : (a,b) ∉ μA_i}
  if resolvers = ∅ then return failure
  nondeterministically choose a ∈ resolvers
  return GP-SEARCH(G, g - effects⁺(a), π_i ∪ {a}, i)
```

AKCIE SA DO π_i PRIDÁVAJÚ JEDNA PO DRUHEJ TAK, ABY π_i NEOBSAH. MUTEXY

GRAPHPLAN (A, s_0, g)

```
i ← 0, ∇ ← ∅, P_0 ← s_0, G ← ⟨P_0⟩
while (g ⊈ P_i or g² ∩ μP_i ≠ ∅) ∧ ¬FIXEDPOINT(G) do
  i ← i+1, EXPAND(G)
if g ⊈ P_i or g² ∩ μP_i ≠ ∅ then return failure
π ← EXTRACT(G, g, i)
if FIXEDPOINT(G) then η ← |∇(k)| else η ← 0
while π = failure do
  i ← i+1, EXPAND(G)
  π ← EXTRACT(G, g, i)
  if π = failure ∧ FIXEDPOINT(G) ∧ η = |∇(k)|
    then return failure
  η ← |∇(k)|
return π
```

27.06.2009 Sa
PETER ČERNO

PLÁNOVANIE A ROZVRHOVANIE

PLÁNOVANIE AKO SAT

ATÓMY ZAKÓDUJEME AKO VÝROKOVÉ PREMENNÉ + PRIDÁME AS OZNAČENIE STAVU + MAXIMÁLNA DĽŽKA PLÁNU = n

⇝ PREMENNÉ (FLUENTS) L POPISUJÚCE MOŽNÉ STAV, NAPR. at(r1, l1, i)

⇝ PREMENNÉ POPISUJÚCE AKCIE A, NAPR. move(r1, l1, l2, i)

PLANOVACÍ PROBLÉM KÓDUJEME AKO KONJUNKCIU:

POČIATOČNÝ STAV (ÚPLNÝ POPIS):

$$\bigwedge\{p_0 \mid p \in s_0\} \wedge \bigwedge\{\neg p_0 \mid p \in L - s_0\}$$

CIEĽ (ČIASTOČNÝ POPIS):

$$\bigwedge\{p_n \mid p \in g^+\} \wedge \bigwedge\{\neg p_n \mid p \in g^-\}$$

PRE KAŽDÚ AKCIU JEJ ZMENY V i-TOM KROKU:

$$a_i \Rightarrow \bigwedge\{p_i \mid p \in precond(a)\} \wedge \bigwedge\{e_{i+1} \mid e \in effects(a)\}$$

AXIÓM ÚPLNÉHO VYLÚČENIA

PRE KAŽDÚ DVOJICU RÔZNYCH AKCIÍ a, b: $\neg a_i \vee \neg b_i$

PROBLÉM RÁMCA

KLASICKÝ AXIÓM RÁMCA:

PRE KAŽDÚ AKCIU a POPÍSEME VLASTNOSTI p, KTORÉ SA NEMENIA ($p \notin effects(a)$):

$$a_i \Rightarrow (p_i \Leftrightarrow p_{i+1})$$

EŠTE MUSÍME ZARUČIŤ, ŽE NEJAKÁ AKCIA JE VYBRANÁ:

$$\bigvee\{a_i \mid a \in A\}$$

AXIÓMY RÁMCA S VYSVETLENÍM

PRAVDIVOSTNÁ HODNOTA FLUENT PREMENNEJ SA MENÍ, IBA KEĎ TO SPÔSOBILA NEJAKÁ AKCIA

$$\neg p_i \wedge p_{i+1} \Rightarrow \bigvee \{a_i \mid p \in effects^+(a)\}$$

$$p_i \wedge \neg p_{i+1} \Rightarrow \bigvee \{a_i \mid p \in effects^-(a)\}$$

POTREBUJEME <u>AXIÓM ÚPLNÉHO VYLÚČENIA</u> $\rightsquigarrow$ VEDIE K ÚPLNE USPORIADANÝM PLÁNOM

STAČÍ <u>AXIÓM KONFLIKTNÉHO VYLÚČENIA</u>, TJ. ABY V 1 KROKU NEBOLI DOHROMADY ZÁVISLÉ AKCIE

LEPŠIE KÓDOVANIE

$move(r1, loc1, loc2) \rightsquigarrow move1(r1) \wedge move2(loc1) \wedge move3(loc2)$

[NAMIESTO $3 \times 3 \times 3$ PREM. MÁME $3+3+3$ PREMENNÝCH]

PREMENNÉ MÔŽEME ZDIEĽAŤ AJ MEDZI AKCIAMI RÔZNEHO TYPU

PLÁNOVANIE AKO CSP

REPREZENTÁCIA SO STAV. F...:
(1) STAVOVÉ PREMENNÉ
(2) NEMENNÉ VZŤAHY
(3) OPERÁTORY

HĽADÁME PLÁN <u>DO DANEJ DĹŽKY</u> k

PRE KAŽDÚ INŠTANCIOVANÚ <u>STAVOVÚ PREMENNÚ</u> x_i BUDEME MAŤ CSP PREMENNÚ $x_i(j)$ $\quad 0 \le j \le k$

PRÍKLAD: $rloc(r1, j) \in \{l1, l2, l3\} \quad 0 \le j \le 4$

PRE KAŽDÉ j, $0 \le j \le k-1$, MÁME <u>AKČNÚ PREMENNÚ</u> $act(j)$

PRÍKLAD: $act(j) \in \{move(r1, l1, l2), \ldots, \underline{\underline{no\text{-}op}}\} \quad 0 \le j \le 3$

27.06.2009 Sa
PETER ČERNO

PLÁNOVANIE A ROZVRHOVANIE

POČIATOČNÝ A KONCOVÝ STAV KÓDUJEME FORMOU UNÁRNYCH OBMEDZUJÚCICH PODMIENOK

PRÍKLAD: a) $rloc(r1,0) = l1$, $rload(r1,0) = nil$, $cpos(c1,0) = l1, \ldots$

b) $cpos(c1,4) = l2$

AKCIE KÓDUJEME FORMOU PODMIENOK ZVÄZUJÚCICH AKČNÚ PREMENNÚ $act(j)$ S OKOLNÝMI STAVOVÝMI PREMENNÝMI $x_i(j)$, $x_i(j+1)$

PREDPOKLAD AKCIE a TVARU $x_i = v_i$ SA PRELOŽÍ DO:

$$act(j) = a \Rightarrow x_i(j) = v_i, \quad 0 \le j \le k-1$$

PRIRADENIE $x_i \leftarrow v_i$ Z EFEKTU AKCIE SA PRELOŽÍ DO:

$$act(j) = a \Rightarrow x_i(j+1) = v_i \quad 0 \le j \le k-1$$

AXIÓMY RÁMCA

- KEĎ NIE JE STAVOVÁ PREMENNÁ x_i V EFEKTE AKCIE a (x_i JE VZHĽADOM K a INVARIANTNÁ), POTOM:

$$act(j) = a \Rightarrow x_i(j) = x_i(j+1), \quad 0 \le j \le k-1$$

CSP TECHNIKY MOŽNO POUŽIŤ AKO SÚČASŤ EXISTUJÚCICH PLÁNOVACÍCH ALGORITMOV:

(1) PLÁNOVANIE V PRIESTORE PLÁNOV – TEST KONZISTENCIE ČIASTOČNÉHO PLÁNU

(2) PLÁNOVANIE S PLÁNOVACÍM GRAFOM – PLÁNOVACÍ GRAF ZAKÓDOVANÝ AKO CSP

GRAPHPLAN AKO CSP

PREMENNÉ PRE ATÓMY - AKÁ AKCIA PRIDALA DANÝ ATÓM

$P_{j,m}$ (ATÓM P_j V STAVOVEJ VRSTVE m)

DOMÉNA = AKCIE, KTORÉ MAJÚ ATÓM AKO POZITÍVNY EFEKT

$\perp$ PRE NEAKTÍVNY ATÓM

$P_{4,m} = a \Rightarrow P_{1,m-1} \neq \perp \wedge P_{2,m-1} \neq \perp \wedge P_{3,m-1} \neq \perp$

AKCIA a MÁ POZITÍVNY EFEKT P_4 A PREDPOKLADY P_1, P_2, P_3

PODMIENKA JE PRIDANÁ PRE KAŽDÝ POZITÍVNY EFEKT

$P_{i,m} = \perp \vee P_{j,m} = \perp$ MUTEX MEDZI P_i A P_j

$P_{i,m} \neq a \vee P_{j,m} \neq b$ MUTEX MEDZI a, b ; P_i, P_j SÚ POZ. EF.

$P_{i,k} \neq \perp$ P_i JE CIEĽOVÝ ATÓM

[ŽIADNE PARALELNÉ AKCIE] [ŽIADNE PRÁZDNE VRSTVY]

GRAPHPLAN AKO BCSP (SAT)

BOOLEAN PREMENNÉ PRE AKČNÉ UZLY $A_{j,m}$, VÝR. UZLY $P_{j,n}$

$A_{i,m} \Rightarrow P_{j,m-1}$ P_j JE PREDPOKLADOM AKCIE a_i

$P_{i,m} \Leftrightarrow \left(\bigvee_{P_i \in effects^+(a_j)} A_{j,m}\right) \vee \left(P_{i,m-1} \wedge \left(\bigwedge_{P_i \in eff^-(a_j)} \neg A_{j,m}\right)\right)$

AKCIE NO-OP SA TU NEPOUŽÍVAJÚ !

$\neg A_{i,m} \vee \neg A_{j,m}$ MUTEX AKCIÍ a_i, a_j VO VRSTVE m

$\neg P_{i,n} \vee \neg P_{j,n}$ MUTEX ATÓMOV P_i, P_j VO VRSTVE n

$P_{i,k} = true$ P_i JE CIEĽOVÝ ATÓM V POSL. k-TEJ STAV. VR.

$P_{i,0} = true$ P_i JE ATÓM V POČIATOČNOM STAVE

[ŽIADNE PARALELNÉ AKCIE] [ŽIADNE PRÁZDNE VRSTVY]

28.06.2009 54
PETER ČERNO

PLÁNOVANIE A ROZVRHOVANIE

ČAS ... MNOŽINA SPOJITÁ ($\mathbb{R}$) / DISKRÉTNA ($\mathbb{Z}$)
KVALITATÍVNE ... RELATÍVNE VZŤAHY
KVANTITATÍVNE ... ABSOLÚTNE HODNOTY

KVALITATÍVNY PRÍSTUP

ČASOVÉ REFERENCIE - BODY ZMENY (OKAMŽIKY), ČASOVÉ PERIÓDY (INTERVALY)
RELATÍVNE VZŤAHY → ALGEBRA OKAMŽIKOV

$P = \{<, =, >\}$ ... PRIMITÍVNE VZŤAHY ⇝ MÔŽEME SPOJIŤ:
$R = \{\emptyset, \{<\}, \{=\}, \{>\}, \{<, =\}, \{>, =\}, \{<, >\}, \{<, =, >\}\}$
VZŤAH $r \in R$ MEDZI t A t' ZAPISUJEME $[t\ r\ t']$
OPERÁCIE NAD R: $\cap, \cup, \bullet$

MNOŽINA OKAMŽIKOV X + MN. BIN. VZŤAHOV $r_{i,j} \in R$ TVORÍ SIEŤ PODMIENOK (X, C)

(X, C) JE KONZISTENTNÁ $\Leftrightarrow$ KAŽDÉMU OKAMŽIKU MÔŽEME PRIRADIŤ REÁLNE ČÍSLO TAK, ŽE $\forall$ VZŤAHY PLATIA

VETA: (X, C) JE KONZISTENTNÁ $\Leftrightarrow \exists$ MNOŽINA PRIMITÍVNYCH VZŤAHOV $p_{i,j} \in r_{i,j}$: $\forall i,j,k: p_{i,j} \in p_{i,k} \bullet p_{k,j}$

STAČÍ UTVORIŤ TRANZITÍVNY UZÁVER NAPR. POMOCOU ALGORITMU KONZISTENCIE PO CESTE (PC)

KEĎ NIEKDE DOSTANEME VZŤAH $\emptyset$ ⇝ SIEŤ NIE JE KONZ.

PC NEMUSÍ ODSTRÁNIŤ VŠETKY PRIMITÍVNE VZŤAHY

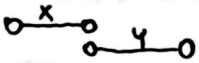
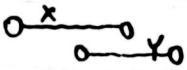
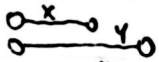
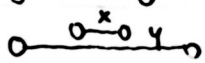
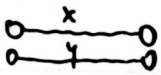
→ ALGEBRA INTERVALOV

INTERVAL JE DANÝ DVOJICOU OKAMŽIKOV i^-, i^+ TAKÝCH, ŽE $i^- < i^+$

(2^13 rozn.)

PRIMITÍVNE VZŤAHY

⇝ OPÄŤ MOŽEME KOMBINOVAŤ

x BEFORE y		$x^+ < y^-$
x MEETS y		$x^+ = y^-$
x OVERLAPS y		$x^- < y^- < x^+$ & $x^+ < y^+$
x STARTS y		$x^- = y^-$ & $x^+ < y^+$
x DURING y		$y^- < x^-$ & $x^+ < y^+$
x FINISHES y		$y^- < x^-$ & $x^+ = y^+$
x EQUALS y		$x^- = y^-$ & $x^+ = y^+$
B', M', O', S', D', F'	SYMETRICKÉ VZŤAHY	

OPERÁCIE: $\cap$, $\cup$, $\bullet$

(X, C) JE KONZISTENTNÁ $\Leftrightarrow$ EXISTUJÚ REÁLNE $x_i^- < x_i^+$ PRE KAŽDÝ INTERVAL x_i TAK, ŽE $\forall$ VZŤAHY SÚ SPLNENÉ

<u>VETA</u>: (X, C) JE KONZISTENTNÁ $\Leftrightarrow$ $\exists$ MNOŽINA PRIMITÍVNYCH VZŤAHOV $p_{i,j} \in r_{i,j}$ T.Ž. $\forall i,j,k: p_{i,j} \in p_{i,k} \bullet p_{k,j}$

PC UŽ NIE JE ÚPLNÁ KONZ. TECHNIKA!

PROBLÉM KONZISTENCIE SIETE PODMIENOK S INTERV. JE NP-C.

KVANTITATÍVNY PRÍSTUP

ZÁKLADNÝMI PRIMITÍVAMI SÚ OPÄŤ OKAMŽIKY

ČASOVÁ PODMIENKA $r_{ij} = [a_{ij}, b_{ij}] \equiv a_{ij} \leq t_i - t_j \leq b_{ij}$

$r_{ij} \bullet r_{jk} = [a_{ij} + a_{jk}, b_{ij} + b_{jk}]$

$r_{ij} \cap r'_{ij} = [\max\{a_{ij}, a'_{ij}\}, \min\{b_{ij}, b'_{ij}\}]$

SIMPLE TEMPORAL NETWORK (STN)

TEMPORAL CONSTRAINT NETWORK (TCSP)

ALGORITMUS PC, FLOYD-WARSHALL

29.06.2009 Mo
PETER ČERNO

PLÁNOVANIE A ROZVRHOVANIE

STAVOVÁ PREMENNÁ ≡ FUNKCIA ZÁVISLÁ NA ČASE
PO ČASTIACH KONŠTANTNÁ FCIA., MOŽEME POPÍSAŤ POMOCOU:

ČASOVÉ VÝROKY : UDALOSŤ & TRVAJÚCA OKOLNOSŤ

$x@t : (v_1, v_2) \equiv \exists t_0 \forall \tau \; t_0 < \tau < t : x(\tau) = v_1 \wedge x(t) = v_2, \; v_1 \neq v_2$

$x@[t_1, t_2) : u \equiv \forall t \; t_1 \leq t < t_2 : x(t) = u$

KRONIKA $\Phi = (F, C)$

F... MNOŽINA ČASOVÝCH VÝROKOV
C... MNOŽINA
OBJEKTOVÝCH PODMIENOK : $x \in D$, $x = y$, $x \neq y$, NEMENNÉ VZTAHY
ČASOVÝCH PODMIENOK : ALGEBRA OKAMŽIKOV

ČASOVÁ OS ≡ KRONIKA PRE JEDNU PREMENNÚ

→ NESMIE V NEJ BYŤ ŽIADNA DVOJICA KONFLIKTNÝCH ČASOVÝCH VÝROKOV → SEPARÁCNE PODMIENKY

PRE $x@[t_1, t_2) : v_1$ A $x@[t_3, t_4) : v_2$ MÁME:
$t_2 \leq t_3, \; t_4 \leq t_1, \; v_1 = v_2$

PRE $x@t : (v_1, v_2)$ A $x@[t_1, t_2) : v$ MÁME:
$t < t_1, \; t_2 < t, \; (t_1 = t \wedge v = v_2), \; (t_2 = t \wedge v = v_1)$

PRE $x@t : (v_1, v_2)$ A $x@t' : (v_1', v_2')$ MÁME:
$t \neq t', \; (v_1 = v_1' \wedge v_2 = v_2')$

ČASOVÁ OS $\Phi = (F, C)$ PRE PREM. x JE KONZISTENTNÁ ⟺ C JE KONZISTENTNÁ A PRE KAŽDÚ DVOJICU ČASOVÝCH VÝROKOV Z F EXISTUJE SEP. PODM., KT. JE DÔSLEDKOM C

KRONIKA JE KONZ. ⟺ ∀ JEJ ČASOVÉ OSI SÚ KONZ.

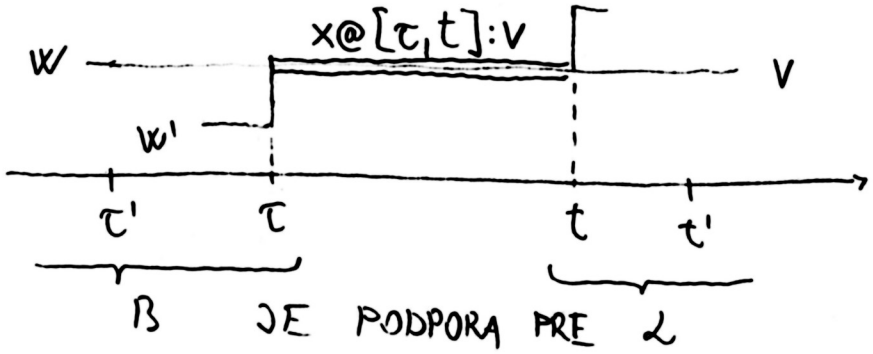
KONZISTENTNÁ KRONIKA $\Phi = (F, C)$ PODPORUJE ČASOVÝ VÝROK α

$\Leftrightarrow$ JE V F VÝROK β NASTAVUJÚCI HODNOTU v PRE α

$$\alpha = \begin{cases} x@t : (v, v') \\ x@[t, t') : v \end{cases} \qquad \beta = \begin{cases} x@\tau : (w', w) \\ x@[\tau', \tau) : w \end{cases}$$

A EXISTUJÚ SEPARÁCNÉ PODMIENKY c TAK, ŽE

$\Phi \cup (\{\alpha, x@[\tau, t) : v\}, \{w = v, \tau < t\} \cup c)$ JE KONZ.



$\hookrightarrow = \delta =$ POMOCNÍK (ENABLER) PRE α V Φ

KONZISTENTNÁ KRONIKA $\Phi = (F, C)$ PODPORUJE MNOŽINU ČASOVÝCH VÝROKOV ε $\Leftrightarrow$ KAŽDÝ VÝROK $\alpha_i \in \varepsilon$ JE PODPOROVANÝ KRONIKOU $(F \cup \varepsilon - \{\alpha_i\}, C)$ POMOCNÍKOM δ_i TAK, ŽE $\Phi \cup \phi$ JE KONZ. KR. $(\phi = \bigcup_i \delta_i)$.

ϕ JE POMOCNÍK PRE ε (NEMUSÍ BYŤ URČENÝ JEDNOZNAČNE)

KONZIST. KRONIKA $\Phi = (F, C)$ PODPORUJE KRONIKU $\Phi' = (F', C')$ $\Leftrightarrow$

Φ PODPORUJE F' A EXISTUJE POMOCNÍK $\phi \in \Theta(\Phi'/\Phi)$

[KDE $\Theta(\Phi'/\Phi) = \{\phi \cup (\emptyset, C') \mid \phi$ JE POMOCNÍK PRE $F'\}$]

TAKÝ, ŽE $\Phi \cup \phi$ JE KONZISTENTNÁ KRONIKA

Φ' JE DÔSLEDKOM Φ $\Leftrightarrow$ Φ PODPORUJE Φ' A EXISTUJE POMOCNÍK $\phi \in \Theta(\Phi'/\Phi)$ TAKÝ, ŽE $\phi \subseteq \Phi$.

29.06.2009 M.
PETER ČERNO

PLÁNOVANIE A ROZVRHOVANIE

PLÁNOVACÍ OPERÁTOR $o = (name(o), (F(o), C(o)))$

$name(o) \equiv o(t_s, t_e, t_1, \dots, v_1, v_2, \dots)$

$(F(o), C(o))$ JE KRONIKA

NIE SÚ ROZLÍŠENÉ PREDPOKLADY A EFEKTY

OPERÁTOR APLIKUJEME NA KRONIKU

VÝSLEDOK APLIKÁCIE NIE JE JEDNOZNAČNÝ

AKCIA $\equiv$ ČIASTOČNE INŠTANCIOVANÝ OPERÁTOR

JE APLIK. NA KRONIKU $\Phi \Leftrightarrow \Phi$ PODPORUJE KR. $(F(a), C(a))$

$\mathcal{A}(\Phi, a) = \{ \Phi \cup \phi \mid \phi \in \Theta(a / \Phi) \}$

MN. AKCIÍ $\pi = \{a_1, \dots, a_n\}$ JE APLIK. NA KR. $\Phi \Leftrightarrow$

Φ PODPORUJE KR. $\Phi_\pi = \cup_i (F(a_i), C(a_i))$

$\mathcal{A}(\Phi, \pi) = \{ \Phi \cup \phi \mid \phi \in \Theta(\Phi_\pi / \Phi) \}$.

PLÁNOVACÍ PROBLÉM $P = (O, \Phi_0, \Phi_g)$

- O .. MN. OPERÁTOROV

Φ_0 ... KONZ. KRONIKA POPISUJÚCA NEMENNÉ RELÁCIE, POČIATOČNÝ STAV, OČAKÁVANÝ VÝVOJ NEZ. NA PLÁN. AKCIÁCH

Φ_g ... KONZ. KRONIKA REPREZENTUJÚCA CIEĽ

RIEŠIACI PLÁN PRE P JE MN. AKCIÍ $\pi = \{a_1, \dots, a_n\}$

Φ_g JE DÔSLEDKOM NEJAKEJ KRONIKY Z $\mathcal{A}(\Phi_0, \pi)$.

PLÁNOVACIA PROCEDÚRA JE ODVODENÁ OD PLÁNOVANIA V PRIESTORE PLÁNOV

PRE $P = (O, \Phi_0, \Phi_g)$ ZAČNEME S KRONIKOU $\Phi = (F_0, C_0 \cup C_g)$
MNOŽINOU OTV. CIEĽOV $G = F_g$, PRÁZDNYM PLÁNOM $\pi = \emptyset$,
PRÁZDNOU MNOŽINOU HROZIEB $K = \emptyset$

<u>CP</u>(Φ, G, K, π)

if $G = K = \emptyset$ then return π
PERFORM THE FOLLOWING STEPS IN ANY ORDER:
(1) if $G \neq \emptyset$ then
SELECT ANY $\alpha \in G$
if $\Theta(\alpha / \Phi) \neq \emptyset$ then
return CP$(\Phi, G - \{\alpha\}, K \cup \{\Theta(\alpha / \Phi)\}, \pi)$
else
relevant $\leftarrow \{a \mid a$ CONTAINS SUPPORT FOR $\alpha\}$
if relevant $= \emptyset$ then return failure
NONDETERM. CHOOSE $a \in$ relevant
return CP$(\Phi \cup (F(a), C(a)), G \cup F(a),$
$K \cup \{\Theta(a / \Phi)\}, \pi \cup \{a\})$
(2) if $K \neq \emptyset$ then
SELECT ANY $C \in K$
threat-resolvers $\leftarrow \{\phi \in C \mid \phi$ CONSISTENT WITH $\Phi\}$
if threat-resolvers $= \emptyset$ then return failure
NONDETERM. CHOOSE $\phi \in$ threat-resolvers
return CP$(\Phi \cup \phi, G, K - C, \pi)$

29.06.2009 Po
PETER ČERNO

PLÁNOVANIE A ROZVRHOVANIE

MNOŽINU IDENTICKÝCH ZDROJOV MÔŽEME MODELOVAŤ PREMENNOU UDÁVAJÚCOU POČET DOSTUPNÝCH ZDROJOV

KAPACITNÁ PREMENNÁ $resources \times time \to \{0, 1, \dots, Q\}$

ČASOVÉ VÝROKY PRE ZDROJE :

POKLES KAPACITY $z@t : -q$ $(\equiv z@[t, \infty) : q)$

NAVÝŠENIE KAPACITY $z@t : +q$ $(\equiv z@0 : +q \wedge z@[0, t) : +q)$

POŽIČANIE KAPACITY $z@[t, t') : q$ $(\equiv z@t : -q \wedge z@t' : +q)$

V POPISE DOMÉNY MUSÍME ŠPECIFIKOVAŤ max KAP. $\forall$ ZDROJOV

BUDEME PRACOVAŤ S AKCIAMI, KT. SI POŽIČIAVAJÚ KAPACITU

MNOŽINA ČASOVÝCH VÝROKOV R_z PRE ZDROJ z JE KONFLIKTNÁ $\Leftrightarrow$ $\exists$ PODMNOŽINA

$\{ z@[t_i, t_i') : q_i \mid i \in I \} \subseteq R_z$ TAKÁ, ŽE

(1) VÝROKY Z TEJTO MNOŽINY SA MÔŽU PREKRÝVAŤ $[\bigcap_{i \in I} [t_i, t_i') \neq \emptyset]$

(2) $\sum_{i \in I} q_i > Q$

KONFLIKT $\equiv$ MOŽNÉ PREKROČENIE KAPACITY ZDROJA

KRONIKA JE KONZISTENTNÁ $\Leftrightarrow$

(1) $\forall$ ČASOVÉ VÝROKY NAD STAV. PREMENNÝMI SÚ KONZ.

(2) ŽIADNA MN. ČAS. VÝR. NAD KAPAC. PREM. NIE JE KONFLIKTNÁ

VETA : INTERVALY Z MNOŽINY I SA MÔŽU PREKRÝVAŤ $\Leftrightarrow$ SA MÔŽU PREKRÝVAŤ PO DVOJICIACH

$\rightsquigarrow$ MOŽNO REPREZENTOVAŤ GRAFOM

HĽADAJME KLIKU U : $\sum_{i \in U} q_i > Q$

MCS - MINIMÁLNE KRITICKÉ MNOŽINY

$\equiv$ NAJDEME TAKÉ KLIKY VZHĽADOM K INKLÚZII

VRCHOLY OČÍSLUJEME

VSTUPOM p ALGORITMU JE DOTERAZ NÁJDENÁ ČASŤ KLIKY (NA ZAČ. PRÁZDNA) → clique(p); A KANDIDÁTI NA ZARADENIE DO KLIKY (NA ZAČ. ∀ VRCHOLY) → pending(p).

MCS - EXPAND (p)

INVARIANT:
∀ VRCHOLY v pending(p) SÚ SPOJENÉ SO ∀ VRCHOLMI v clique(p)

foreach $v_i \in$ pending(p) do
  add a new node m_i successor of p
  pending(m_i) ← $\{v_j \in$ pending(p) $\mid j<i \wedge \{v_i, v_j\} \in E\}$
  clique(m_i) ← clique(p) ∪ $\{v_i\}$
  if clique(m_i) is over-consuming then MCS ← MCS ∪ clique(m_i)
  else if pending(m_i) ≠ ∅ then MCS-EXPAND(m_i)

OPRAVA KONFLIKTOV

MAJME MCS $U = \{ z@[t_i, t_i') : q_i \mid i \in I \}$.
POTOM ĽUBOVOĽNÁ PODMIENKA $t_i' < t_j$, $i,j \in I$ ODSTRAŇUJE ZDROJOVÝ KONFLIKT.

NIEKTORÉ Z TÝCHTO PODMIENOK SÚ V KONFLIKTE S OSTATNÝMI PODMIENKAMI

NIEKTORÉ SÚ PRÍLIŠ SILNÉ (VYNÚTA ODSTRÁNENIE ĎALŠEJ HRANY Z KLIKY)

CRP(Φ, G, K, $\mathcal{M}$, π)

ALGORITMUS PRE PLÁNOVANIE S KRONIKAMI ROZŠÍRIME O PRÁCU S MIN. KONFLIKTNÝMI MNOŽINAMI (ULOŽENÝMI V $\mathcal{M}$).

29.06.2009 Mo
PETER ČERNO

PLÁNOVANIE A ROZVRHOVANIE

HEURISTIKY

SLÚŽIA PRE VÝBER ĎALŠIEHO UZLU V PREHĽADÁVANÍ
ZALOŽENÉ NA RIEŠENÍ RELAXOVANÉHO PROBLÉMU
PRÍPUSTNÁ HEURISTIKA - POSKYTUJE DOLNÝ ODHAD $h(n) \leq h^*(n)$

ZÁKLADNÁ HEURISTIKA PRE PLÁNOVANIE SO STAVMI
BUDE ODHADOVAŤ POČET AKCIÍ DO CIEĽOVÉHO STAVU

$\Delta_0(s,p) = 0$ PRE $p \in s$
$\Delta_0(s,g) = 0$ PRE $g \subseteq s$
$\Delta_0(s,p) = +\infty$ PRE $p \notin s \wedge \forall a \in A: p \notin effects^+(a)$
$\Delta_0(s,p) = \min_a \{ 1 + \Delta_0(s, precond(a)) \mid p \in effects^+(a) \}$

$\Delta_0(s,g) = \sum_{p \in g} \Delta_0(s,p)$

DELTA(s)

```
foreach p do if p ∈ s then Δ0(s,p) ← 0, else Δ0(s,p) ← ∞
U ← s
repeat until no change occurs :
  foreach a s.t. precond(a) ⊆ U do
    U ← U ∪ effects+(a)
    foreach p ∈ effects+(a) do
      Δ0(s,p) ← min { Δ0(s,p), 1 + Σ_{q∈precond(a)} Δ0(s,q) }
```

... NIE JE PRÍPUSTNÁ

PRVÝ POKUS:

...

$\Delta_1(s,g) = \max \{ \Delta_0(s,p) \mid p \in g \}$

$\rightarrow$ Δ_1 NIE JE TAK INFORMOVANÁ AKO Δ_0

DRUHÝ POKUS:

...

$\Delta_2(s,p) = \min_a \{ 1 + \Delta_2(s, \text{precond}(a)) \mid p \in \text{effects}^+(a) \}$

$\Delta_2(s, \{p,q\}) = \min \{$

$\min_a \{ 1 + \Delta_2(s, \text{precond}(a)) \mid \{p,q\} \subseteq \text{effects}^+(a) \},$

$\min_a \{ 1 + \Delta_2(s, \{q\} \cup \text{precond}(a)) \mid p \in \text{effects}^+(a) \},$

$\min_a \{ 1 + \Delta_2(s, \{p\} \cup \text{precond}(a)) \mid q \in \text{effects}^+(a) \} \}$

$\Delta_2(s,g) = \max_{p,q} \{ \Delta_2(s, \{p,q\}), \{p,q\} \subseteq g \}$

HEURISTIC-FWD-SEARCH (π, s, g, A)

if s satisfies g then return π

options $\leftarrow \{ a \in A \mid$
  a is applicable to $s \}$

$\boxed{\text{foreach } a \in \text{options do}}$
$\boxed{\quad \text{Delta}(\gamma(s,a))}$

while options $\neq 0$ do

  $a \leftarrow \text{argmin} \{ \Delta_0(\gamma(s,a), g) \mid$
    $a \in \text{options} \}$

  options $\leftarrow$ options $- \{a\}$

  $\pi' \leftarrow$ HEURISTIC-FWD-SEARCH
  $(\pi.a, \gamma(s,a), g, A)$

  if $\pi' \neq$ failure then
    return π'

return failure

HEURISTIC-BCWD-SEARCH (π, s_0, g, A)

if s_0 satisfies g then return π

options $\leftarrow \{ a \in A \mid$
  a is relevant for $g \}$

while options $\neq \emptyset$ do

  $a \leftarrow \text{argmin} \{ \Delta_0(s_0, \gamma^{-1}(g,a)) \mid$
    $a \in \text{options} \}$

  options $\leftarrow$ options $- \{a\}$

  $\pi' \leftarrow$ HEURISTIC-BCWD-SEARCH
  $(a.\pi, s_0, \gamma^{-1}(g,a), A)$

  if $\pi' \neq$ failure then
    return π'

return failure

29.06.2009 Mo
PETER ČERNO

PLÁNOVANIE A ROZVRHOVANIE

HEURISTIKY PRE PLÁNOVANIE S PLÁNMI

PREHĽADÁVANIE AND-OR GRAFU

VOĽBA KAZU K OPRAVE:

FAF (FEWEST ALTERNATIVES FIRST) HEURISTIKA

NAJSKÔR SA OPRAVUJÚ KAZY S MENŠÍM POČTOM ALTERNATÍVNYCH SPÔSOBOV OPRAVY

VOĽBA OPRAVY:

NECH $\{\pi_1, \dots, \pi_m\}$ SÚ ČIASTOČNÉ PLÁNY ZÍSKANÉ RÔZNYMI OPRAVAMI A g_π JE MNOŽINA OTV. CIEĽOV V π

(0) PREFERUJEME PLÁN S MENŠÍM POČTOM OTV. CIEĽOV

(1) AND-OR GRAF PRE π DO DANEJ HĽBKY k (NÁROČNÉ)

(2) POMOCOU PLÁNOVACIEHO GRAFU:

MÁME PLÁNOVACÍ GRAF PRE PÔVODNÝ CIEĽ

NÁJDEME OTVORENÝ CIEĽ p V π, KT. SA DO GRAFU PRIDAL POSLEDNÝ A NA CESTE Z s_0 DO p SPOČÍTAME POČET AKCIÍ $\notin \pi$ $\rightarrow \eta(\pi)$

RIADIACE PRAVIDLÁ (CONTROL RULES)

JEDNODUCHÉ TEMPORÁLNE LOGIKY (+ MODÁLNE OP.)

$\phi_1 \mathcal{U} \phi_2$ ... ϕ_2 PLATÍ TERAZ, ALEBO NESKÔR, DOKEDY ϕ_1

$\Box \phi$ ... ϕ PLATÍ TERAZ A POTOM STÁLE

$\Diamond \phi$ ... ϕ PLATÍ TERAZ ALEBO NESKÔR

$\bigcirc \phi$ ... ϕ PLATÍ V NASL. STAVE

GOAL(ϕ) ... ϕ PLATÍ V CIEĽOVOM STAVE

INTERPRETÁCIA MODÁLNEJ FORMULE ... (S, s_i, g)

$S = \langle s_0, s_1, \dots \rangle$ POST. STAVOV, $s_0 \in S$ AKT. STAV, g CIEĽOVÁ FORM.

PLÁN $\pi = \langle a_1, \dots, a_n \rangle$ DÁVA $S_\pi = \langle s_0, s_1, \dots, s_n \rangle$, $s_{i+1} = \delta(s_i, a_{i+1})$

$\rightsquigarrow \langle s_0, s_1, \dots, s_{n-1}, s_n, s_n, s_n, \dots \rangle$

$(S, s_i, g) \models \phi$ DEFINUJEME TAKTO:

$(S, s_i, g) \models \phi \iff s_i \models \phi$ PRE ATÓM ϕ

...

$(S, s_i, g) \models \Box \phi \iff (S, s_j, g) \models \phi$ PRE $\forall j \geq i$

...

PROGRES

POKROK RIADIACEJ FORMULE ZO STAVU s_i DO s_{i+1}

FORMULA $progr(\phi, s_i) \equiv$ PRAVDIVÁ V s_{i+1}, KEĎ JE ϕ PRAV. V s_i

(1) ϕ NEOBSAHUJE MODÁLNE OP.

$prog(\phi, s_i) = true$ KEĎ $s_i \models \phi$, INAK $false$

(2) LOGICKÉ SPOJKY: $progr(\phi_1 \wedge \phi_2, s_i) = progr(\phi_1, s_i) \wedge \dots$

(3) KVANTIFIKÁTORY

(4) MODÁLNE OP.:

$progr(\phi_1 \cup \phi_2, s_i) = ((\phi_1 \cup \phi_2) \wedge progr(\phi_1, s_i)) \vee progr(\phi_2, s_i)$

$progr(\Box \phi, s_i) = (\Box \phi) \wedge progr(\phi, s_i)$

$progr(\Diamond \phi, s_i) = (\Diamond \phi) \vee progr(\phi, s_i)$

$progr(\bigcirc \phi, s_i) = \phi$

progress ZÍSKAME Z progr MAZANÍM

$(S, s_i, g) \models \phi \iff (S, s_{i+1}, g) \models progress(\phi, s_i)$

KEĎ $(S, s_0, g) \models \phi$ POTOM PRE KAŽDÝ PREFIX S' OD S

PLATÍ $progres(\phi, S') \neq false$.

29.06.2009 Po
PETER ČERNO

PLÁNOVANIE A ROZVRHOVANIE

ROZVRHOVANIE - OPTIMÁLNA ALOKÁCIA ZDROJOV DANEJ MNOŽINE ÚLOH V ČASE

GRAHAMOVA NOTÁCIA (POUŽÍVAJÚ SA IBA UNÁRNE ZDROJE)

$\alpha \mid \beta \mid \gamma$

- α → CHARAKT. ZDROJOV
- β → CHARAKT. ÚLOH
- γ → KRITÉRIUM OPTIMALIZÁCIE

JEDNOZNAČNÉ / ALT. / MULTI-OP. MODEL
(IBA UNÁRNE ZD.)

- MAKESPAN C — $\max\{e(a) \mid a \in A\}$
- LATENESS L — $e(a) - \delta(a)$
- EARLINESS E — $\max(0, \delta(a) - e(a))$
- TARDINESS T — $\max(0, e(a) - \delta(a))$
- ABS. ODCH., ŠTVORCOVÁ ODCH., ONESKORENÁ ÚLOHA U

ROZVRHOVANIE S JEDNÝM ZDROJOM

$\boxed{1 \mid r_j \mid L_{max}}$

JEDEN ZDROJ, KAŽDÁ ÚLOHA MÁ TERMÍN DOSTUPNOSTI (RELEASE DATE) A TERMÍN DOKONČENIA (DUE DATE).
CIEĽ: MINIM. MAXIMÁLNE PREKROČENIE TERMÍNU (LATENESS)

OBECNE: NP-ŤAŽKÝ PROBLÉM

POLYNOMIÁLNE ÚLOHY:

- VŠETKY ÚLOHY MAJÚ IDENTICKÝ TERMÍN DOSTUPNOSTI ($r_j = r$)
  EDD (EARLIEST DUE DATE): ÚLOHY SA USPORIADAJÚ VZOSTUPNE PODĽA TERMÍNU DOKONČENIA
- IDENTICKÝ TERMÍN DOKONČENIA ($\delta_j = \delta$)
  USP. VZOSTUPNE PODĽA TERMÍNU DOSTUPNOSTI
- POVOLENÁ PREEMPCIA

NAJSKÔR VIBERIEME ÚLOHY S NAJMENŠÍM TERMÍNOM DOSTUPNOSTI Z NICH ZAČNEME VYKON. ÚLOHU S NAJMENŠÍM TERM. DOKONČENIA VŽDY BEŽÍ ÚLOHA, KT. V DANOM ČASE MÔŽE BEŽAŤ A MÁ NAJMENŠÍ TERMÍN DOKONČENIA (EDD)

OBECNÝ PROBLÉM $1|r_j|L_{max}$

METÓDA VETVÍ A MEZÍ (BRANCH & BOUND)

VETVENIE ZODPOVEDÁ ÚLOHÁM, KT. MÔŽEME PRIDAŤ DO ROZVRHU NA ĎALŠIE MIESTO

DOLNÝ ODHAD RIEŠENIA ZÍSKAME RELAXÁCIOU ZNÍŽKU PROBLÉMU NA $1|r_j, preempt|L_{max}$

OPTIMÁLNY PREEMPTÍVNY ROZVRH NIEBUDE MAŤ NIKDY VÄČŠIE MAX. ONESKORENIE, NEŽ NEPREEMPTÍVNY

ROZVRHOVANIE A PARALELNÉ ZDROJE

- IDENTICKÉ ZDROJE
- UNIFORMNÉ ZDROJE (DOBA SPRAC. NÁSOBENÁ KOEF. RÝCHLOSTI)
- RÔZNE ZDROJE

PREEMPTÍVNA ÚLOHA MÔŽE PO PRERUŠ. POKRAČ. NA INOM ZDROJI

$$\boxed{P_m | preempt | C_{max}}$$

MINIMALIZÁCIA MAKESPANU $\max\{e(a) \mid a \in A\}$ PREEM. ÚLOH S m IDENTICKÝMI ALTERNATÍVNYMI ZDROJMI

- DOLNÝ ODHAD MAKESPANU $LB = \max\{\max_i p_i, \frac{1}{m}\sum_i p_i\}$
- ROZVRH S TÝMTO MAKESPANOM MOŽNO ZOSTROJIŤ V ČASE $O(n)$
- RADÍME ÚLOHY V ĽUBOVOĽNOM PORADÍ NA JEDEN ZDROJ
- KEĎ DOSIAHNEME LB, ÚLOHA SA ROZDELÍ A ZAČNE BEŽAŤ OD ZAČIATKU NA ĎALŠOM ZDROJI
- VĎAKA $p_i \leq LB$ SA DVE ČASTI ROZDELENEJ ÚLOHY NEBUDÚ PREKRÝVAŤ

29.06.2009 Mo
PETER ČERNO

PLÁNOVANIE A ROZVRHOVANIE

$\boxed{P_m \mid prec \mid C_{max}}$

MINIMALIZÁCIA MAKESPANU n NEPREEMPTÍVNYCH ÚLOH S m IDENTICKÝMI ALTERNATÍVNYMI ZDROJMI, KDE MEDZI ÚLOHAMI EXISTUJÚ PRECEDENČNÉ VZŤAHY

$n \leq m$ ... METÓDA KRITICKEJ CESTY
$2 \leq m < n$ ... NP-ŤAŽKÝ PROBLÉM

METÓDA KRITICKEJ CESTY

VOĽNÁ ÚLOHA - MÔŽE SA ONESKORIŤ BEZ VPLYVU NA MAKESPAN
KRITICKÁ ÚLOHA - NEMÔŽE SA ONESKORIŤ
KRITICKÁ CESTA - MNOŽINA KRITICKÝCH ÚLOH

POSTUP RIEŠENIA:

- DOPREDNÁ FÁZA:

  MINIMÁLNE ŠTARTOVÉ (est), KONCOVÉ (ect) ČASY, + C_{max}
- ÚLOHY, KT. NEMAJÚ PREDCHODCU: $est_i = 0$, $ect_i = p_i$
- ÚLOHY, KT. ∀ PREDCHODCI UŽ BOLI SPRACOVANÍ:

  $est_i = \max_{j \ll i} ect_j$, $ect_i = est_i + p_i$

  $C_{max} = \max_i ect_i$
- SPÄTNÁ FÁZA:

  MAXIMÁLNE ŠTARTOVNÉ (lst), KONCOVÉ (lct) ČASY
- ÚLOHY, KT. NEMAJÚ NÁSLEDNÍKA: $lct_i = C_{max}$, $lst_i = C_{max} - p_i$
- ÚLOHY, KT. ∀ NÁSLEDNÍCI UŽ BOLI SPRACOVANÍ:

  $lct_i = \min_{i \ll j} lst_j$, $lst_i = lct_i - p_i$

ÚLOHY, KDE $est_i = lst_i$ SÚ KRITICKÉ
KRITICKÁ CESTA JE REŤAZEC KRITICKÝCH ÚLOH ZAČÍNAJÚCI V ČASE 0 A KONČIACI V ČASE C_{max}

MULTI-OPERAČNÉ ROZVRHOVANIE

ÚLOHA - ROZDELENÁ DO MENŠÍCH OPERÁCIÍ
- PRECEDENČNÉ VZTAHY MEDZI OPERÁCIAMI
- ZDROJE SÚ PRE OP. JEDNOZNAČNE URČENÉ

JOB-SHOP - OP. SÚ LIN. USPORIADANÉ
FLOW-SHOP - ∀ ÚLOHY MAJÚ ROVNAKÝ POČET & PORADIE OP.
OPEN-SHOP - FLOW-SHOP BEZ USPORIADANIA

PRI MINIMALIZÁCII MAKESPANU U FLOW-SHOP PROBLÉMU EXISTUJE OPT. ROZVRH, KDE JE PORADIE NA PRVÝCH DVOCH ZDROJOCH TOTOŽNÉ

$\boxed{F2 \mid \mid C_{max}}$ FLOW-SHOP PROBLÉM NA 2 ZDROJOCH

STAČÍ NÁJSŤ OPTIMÁLNE PORADIE ÚLOH

$U := \{ j \mid p_{1j} < p_{2j} \}$ USPORIADANE VZOSTUPNE PODĽA p_{1j}

$V := \{ j \mid p_{1j} \geq p_{2j} \}$ USPORIADANE ZOSTUPNE PODĽA p_{2j}

ÚLOHY Z V PRIDAJTE ZA U.

JOB-SHOP PROBLÉM JE ŠPECIFIKOVANÝ MNOŽ. m ZDROJOV, n ÚLOH, OBJ. FCIOU.

$\boxed{J2 \mid n_i \leq 2 \mid C_{max}}$

JOB-SHOP PROBLÉM S 2 ZDROJMI, MAXIMÁLNE 2 OPERÁCIAMI NA ÚLOHU A MINIMALIZÁCIOU MAKESPANU

29.06.2009 Mo
PETER ČERNO

PLÁNOVANIE A ROZVRHOVANIE

→ REDUKCIA NA FLOW-SHOP S DVOMA ZDROJMI:

I_1 ... ÚLOHY, KTORÝCH JEDINÁ OP. BEŽÍ NA M_1
I_2 ... —||— M_2
$I_{1,2}$ ... ÚLOHY, KT. PRVÁ OP BEŽÍ NA M_1, DRUHÁ NA M_2
$I_{2,1}$ ... —||— M_2, —||— M_1

NÁJDEME OPT. POSTUPNOSŤ ÚLOH $R_{1,2}$, $R_{2,1}$
PRE FLOW-SHOP PROBLÉMY S ÚLOHAMI $I_{1,2}$, $I_{2,1}$

M_1 : $I_{1,2}$ PODĽA $R_{1,2}$, I_1, $I_{2,1}$ PODĽA $R_{2,1}$
M_2 : $I_{2,1}$ PODĽA $R_{2,1}$, I_2, $I_{1,2}$ PODĽA $R_{1,2}$

ASPOŇ 1 ZO ZDROJOV PRACUJE BEZ PRERUŠENIA
(PODĽA TOHO, ∃ $|M_1 : I_{1,2} \cdot I_1| \geq / \leq |M_2 : I_{2,1} \cdot I_2|$)

$\boxed{Jm || C_{max}}$ JE NP-ÚPLNÝ PROBLÉM

DISJUNKTÍVNY GRAF

UZLY = OPERÁCIE

OP. ÚLOH SÚ LIN. USPORIADANÉ

ORIENTOVANÉ HRANY: (+ VRCHOLY S, T)

KONJUNKTÍVNE HRANY POPISUJÚ PRECEDENCIE

DISJUNKTÍVNE HRANY SPÁJAJÚ OPERÁCIE RÔZNYCH ÚLOH VYKONÁVANÉ NA ROVNAKOM ZDROJI (SÚ ⟷ A TVORIA V GRAFE KLIKY)

HĽADANIE ROZVRHU:

(1) Z KAŽDÉHO PÁRU DISJ. HRÁN SA VYBERIE JEDNA HRANA TAK, ABY VO VZNIKNUTOM GRAFE NEBOLI CYKLY

(2) MAKESPAN = DĹŽKA NAJDLHŠEJ CESTY V GRAFE Z $S \rightsquigarrow T$

CIEĽ: MINIMALIZOVAŤ DĹŽKU NAJDLHŠEJ CESTY (KRITICKÁ CESTA)

HEURISTICKÝ ALGORITMUS

(1) AKÝ ZDROJ ROZVRHOVAŤ AKO 1., 2., ...

(2) AKO NÁJSŤ ROZVRH PRE ZVOLENÝ ZDROJ

NECH JE ČASŤ PROBLÉMU VYRIEŠENÁ (KONJ. HRANY + NIEKTORÉ VYBRANÉ DISJUNKTÍVNE HRANY)

PRE KAŽDÝ ZDROJ X KT. NIE JE ROZVRHNUTÝ VYRIEŠIME PROBLÉM $1 \mid r_j \mid L_{max}$ KDE:

RELEASE DATE r_i = DĹŽKA NAJDLHŠEJ CESTY Z S DO i

DUE DATE d_i = NAJDLHŠIA CESTA (S,T) − NAJDLHŠIA CESTA (i,T) + p_i

ZDROJ, KTORÝ MÁ NAJVÄČŠIE L_{max} ⇝ ÚZKE HRDLO

→ JEHO ROZVRH PRIDÁME DO RIEŠENIA

VYLEPŠENIE: PREROZVRHNUTIE UŽ HOTOVÝCH ZDROJOV

VEZMEME ZDROJ X, JEHO DISJ. HRANY ODSTRÁNIME

ZNOVU VYRIEŠIME PROBLÉM $1 \mid r_j \mid L_{max}$

= ALGORITMUS SHIFTING BOTTLENECK

NEGARANTUJE NÁJDENIE OPT. RIEŠENIA

30.06.2009 Tu
PETER ČERNO

PLÁNOVANIE A ROZVRHOVANIE

ROZVRHOVANIE AKO CSP

PREMENNÉ: POZÍCIA AKTIVITY A V ČASE A PRIESTORE
ČAS: start(A), [p(A), end(A)]
ZDROJ: resource(A)

DOMÉNY: TERMÍN DOSTUPNOSTI, UZÁVIERKA, ALTERNAT. ZDROJE

PODMIENKY: USP. AKTIVÍT, OHRANIČ. KAPACITY ZDROJOV
ČASOVÉ VZŤAHY: start(A) + p(A) = end(A)
USPORIADANIE: end(B) ≤ start(A) PRE B << A
OHRANIČ. KAP. ZDROJOV: A << B v B << A

ZDROJ → PRE ROZVRH. = STROJ (PRIESTOR) PRE SPRAC AKTIVITY
ZDROJ → PRE PLÁN. = MATERIÁL (NAPR. RUKA JE VOLNÁ)

ZDROJE: UNÁRNE, KUMULATÍVNE, PRODUKOV. / SPOTREBOV. ZDROJE

UNÁRNY ZDROJ

AKTIVITY SA NEMÔŽU PREKRÝVAŤ

$p(\Omega) = \sum_{A \in \Omega} p(A)$

$\min(\text{start}(\Omega)) = \min_{A \in \Omega}\{\text{start}(A)\}$

PRAVIDLÁ: EDGE-FINDING

$\min(\text{start}(\Omega)) + p(\Omega) + p(A) >$
$\max(\text{end}(\Omega \cup \{A\})) \Rightarrow A << \Omega$

$A << \Omega \Rightarrow \text{end}(A) \leq \min\{\max(\text{end}(\Omega')) - p(\Omega') \mid \Omega' \subseteq \Omega\}$

PRAVIDLO not-first:

$\min(\text{start}(A)) + p(A) + p(\Omega) > \max(\text{end}(\Omega)) \Rightarrow \neg A << \Omega$

$\neg A << \Omega \Rightarrow \text{start}(A) \geq \min\{\text{end}(B) \mid B \in \Omega\}$

PRAVIDLO <u>not-last</u> :

$\min(\text{start}(\Omega)) + p(\Omega) + p(A) > \max(\text{end}(A)) \Rightarrow \neg\, \Omega << A$

$\neg\, \Omega << A \Rightarrow \text{end}(A) \leq \max\{\text{start}(B) \mid B \in \Omega\}$

KUMULATÍVNE ZDROJE

KAŽDÁ AKTIVITA VYUŽÍVA ISTÚ <u>KAPACITU ZDROJA</u> - $\text{cap}(A)$

AKTIVITY MÔŽU BYŤ SPRACOVÁVANÉ PARALELNE

<u>KAPACITA</u> ZDROJA MÔŽE BYŤ PREMENNÁ V ČASE

$$\forall t \quad \sum_{A_i : \text{start}(A_i) \leq t \leq \text{end}(A_i)} \text{cap}(A_i) \leq \text{MaxCapacity}$$

t ... DISKR. ČAS

<u>TABUĽKA PRE AKTIVITU A</u> : $X(A,t)$:

$X(A_i, t) \Leftrightarrow \text{start}(A_i) \leq t \leq \text{end}(A_i)$ (*)

$\forall t \quad \sum_{A_i} X(A_i, t) \cdot \text{cap}(A_i) \leq \text{MaxCapacity}$ (*)

<u>FILTRÁCIA</u>:

UPPER BOUND

$\text{start}(A) \geq \min\{t : \text{ub}(X(A,t)) = 1\}$

$\text{end}(A) \leq 1 + \max\{t : \text{ub}(X(A,t)) = 1\}$

$X(A,t) = 0 \wedge t < \text{ect}(A) \Rightarrow \text{start}(A) > t$

$X(A,t) = 0 \wedge \text{lst}(A) \leq t \Rightarrow \text{end}(A) \leq t$

$\text{lst}(A) \leq t < \text{ect}(A) \Rightarrow X(A,t) = 1$

30.06.2009 Tu
PETER ČERNO

PLÁNOVANIE A ROZVRHOVANIE

ALTERNATÍVNE ZDROJE

PRE KAŽDÝ ZDROJ → DUPLIKÁT AKTIVITY

- NEÚSPECH U DUPLIKÁTU ZNAMENÁ ODSTRÁNENIE ZDROJA Z DOMÉNY PREMENNEJ $res(A)$
  ≡ ZMAZANIE ZODPOVEDAJÚCEHO DUPLIKÁTU
- PÔVODNÁ AKTIVITA SA ZÚČASTNÍ PRECED. PODM.
- OHRANIČENIA ČASU DUPL. SA PROPAGUJE DO ORIGINÁLU A NAOPAK.

NECH A_u JE DUPLIKÁT AKTIVITY A ALOKOVANÝ NA ZDROJ $u \in res(A)$. FILTRÁCIA:

$u \in res(A) \Rightarrow start(A) \leq start(A_u)$

$u \in res(A) \Rightarrow end(A_u) \leq end(A)$

$start(A) \geq \min\{start(A_u) : u \in res(A)\}$

$end(A) \leq \max\{end(A_u) : u \in res(A)\}$

PRÁZDNE OKNO PRE $A_u \Rightarrow res(A) \setminus \{u\}$

AK JE ČAS RELATÍVNY ⇒ TECHNIKY EDGE-FINDING A AGREGOVANÝCH POŽIADAVIEK NIČ NEODVODIA

PRODUKOVATEĽNÉ / SPOTREBOVATEĽNÉ ZDROJE

AKTIVITA A PRODUKUJE KVANTITU $prod(A)$

> 0 ... PRODUKCIA

< 0 ... SPOTREBA

OPTIMISTICKÝ ZDROJOVÝ PROFIL orp

MAXIMÁLNA MOŽNÁ ÚROVEŇ ZDROJA V ČASE, KEDY SA A ZAČNE SPRACOVÁVAŤ

$$orp(A) = InitLevel + prod(A) + \sum_{B \ll A} prod(B) + \sum_{B ?? A \,\&\, prod(B) > 0} prod(B)$$

PESIMISTICKÝ ZDROJOVÝ PROFIL prp

MINIMÁLNA MOŽNÁ ÚROVEŇ ZDROJA ...

$$prp(A) = InitLevel + prod(A) + \sum_{B \ll A} prod(B) + \sum_{B ?? A \,\&\, prod(B) < 0} prod(B)$$

FILTRÁCIA orp :

$$orp(A) < MinLevel \Rightarrow fail$$

PRE B T.Ž. $B ?? A$, $prod(B) > 0$:

$$orp(A) - \left[prod(B) + \sum_{B \ll C \,\&\, C ?? A \,\&\, prod(C) > 0} prod(C)\right] < MinLevel \Rightarrow B \ll A$$

FILTRÁCIA prp :

$$prp(A) > MaxLevel \Rightarrow fail$$

PRE B T.Ž. $B ?? A$, $prod(B) < 0$:

$$prp(A) - \left[prod(B) + \sum_{B \ll C \,\&\, C ?? A \,\&\, prod(C) < 0} prod(C)\right] > MaxLevel \Rightarrow B \ll A$$

30.06.2009 Tu
PETER ČERNO

PLÁNOVANIE A ROZVRHOVANIE

ROZVRHOVACIE STRATÉGIE

KRITICKÉ ROZHODNUTIA NAJSKÔR (VIRIEŽ ÚZKE HRDLÁ)
PREFERUJ ALTERNATÍVY S VÄČŠOU FLEXIBILITOU

SLACK (TOLERANCIA) = FORMÁLNY POPIS FLEXIBILITY

- $slack(A \ll B) = max(end(B)) - min(start(A)) - p(\{A,B\})$

$slack(\{A,B\}) = max\{slack(A \ll B), slack(B \ll A)\}$

$slack(\Omega) = max(end(\Omega)) - min(start(\Omega)) - p(\Omega)$

USPORIADANIE VETVÍ $A \ll B \vee \neg A \ll B$

AKÉ AKTIVITY MAJÚ BYŤ USP. PRVÉ?
S MINIMÁLNYM $slack(\{A,B\})$

- AKÉ PORADIE MÁ BYŤ ZVOLENÉ?
MAXIMALIZUJÚCE $slack(A \,??\, B)$

$O(n^2)$ BODOV VOLBY

VETVENIE PRVÝ / POSLEDNÝ $(A \ll \Omega \vee \neg A \ll \Omega)$ ALEBO $(\Omega \ll A \vee \neg \Omega \ll A)$

MÁME HĽADAŤ PRVÚ ALEBO POSL. AKT.?
→ ROZHODNI SA PODĽA MENŠEJ MNOŽINY KANDIDÁTOV

AKÁ AKTIVITA MÁ BYŤ VYBRANÁ?
(a) PRVÁ → NAJMENŠÍ $min(start(A))$
(b) POSLEDNÁ → NAJVÄČŠÍ $max(end(A))$

$O(n)$ BODOV VOLBY

ZDROJOVÝ SLACK = SLACK MN. AKTIVÍT DANÉHO ZDROJA

VOLÍME ZDROJ, NA KTOROM BUDU AKT. USPORIADANÉ
→ MINIMÁLNY SLACK (ÚZKE HRDLO)

VOLÍME ZDROJ PRE DANÚ AKTIVITU
→ MAXIMÁLNY SLACK (FLEXIBILITA)