PLANNING (Nuove Diapositive)

La pianificazione automatica **(planning)** rappresenta un'importante attività di problem solving che consiste nel sintetizzare una sequenza di azioni che eseguite da un agente a partire da uno stato "iniziale" del mondo provocano il raggiungimento di uno stato "desiderato".

PLANNING

Dati:

- uno stato iniziale
- un insieme di azioni eseguibili
- un obiettivo da raggiungere (**goal**)

  un problema di pianificazione consiste nel determinare un **piano**, ossia un insieme (parzialmente o totalmente) ordinato di azioni necessarie per raggiungere il goal.

Pianificare è:

- una applicazione di per se'
- un'attività comune a molte applicazioni quali
  - diagnosi: pianificazione di test o azioni per riparare (riconfigurare) un sistema
  - scheduling
  - robotica

Esempio

Pianificare è una attività che tutti gli esseri umani svolgono nel loro quotidiano.

Supponiamo di avere come obiettivo (**goal**) di seguire una lezione di Intelligenza Artificiale e di essere attualmente a casa e di possedere una macchina (**stato iniziale**).

Al fine di raggiungere lo scopo prefisso dobbiamo fare una serie di **azioni** in una certa sequenza:

1. prendere materiale necessario per gli appunti,
2. prendere le chiavi della macchina,
3. uscire di casa,
4. prendere la macchina,
5. raggiungere la facoltà,
6. entrare in aula e così via.

Pianificare ci permette di fare le azioni giuste nella sequenza giusta: non possiamo pensare di invertire l'ordine delle azioni 2 e 3.

Esempio

Per alcune di queste azioni non è necessario pianificare l'ordine (il piano può contenere un ordinamento parziale). Invertendo l'ordine delle azioni 1 e 2 si ottiene un piano corretto analogo al precedente.

Ci possono essere piani alternativi per raggiungere lo stesso obiettivo (posso pensare di andare in facoltà a piedi o in autobus).

Es di piano alternativo

1. prendere materiale necessario per gli appunti,
2. prendere biglietto autobus,
3. uscire di casa,
4. raggiungere la fermata,
5. salire sull'autobus,
6. raggiungere la facoltà,
7. entrare in aula e così via.

La Pianificazione Automatica: alcuni concetti base

Un **pianificatore automatico** è un *agente intelligente* che opera in un certo dominio e che date:

1. una rappresentazione dello stato iniziale
2. una rappresentazione del goal
3. una descrizione formale delle azioni eseguibili

sintetizza dinamicamente il piano di azioni necessario per raggiungere il goal a partire dallo stato iniziale.

Rappresentazione dello stato

Occorre fornire al pianificatore un modello del sistema su cui opera.

In genere lo stato è rappresentato in forma dichiarativa con una congiunzione di formule atomiche che esprime la situazione di partenza.

Es: on(book,table) ∧ name(book,xyz) ∧ atHome(table)

Lo stato di un sistema spesso può essere osservato solo in modo parziale per una serie di motivi:

- perché alcuni aspetti non sono osservabili;
- perché il dominio è troppo vasto per essere rappresentato nella sua interezza (limitate capacità computazionali per la rappresentazione);
- perché le osservazioni sono soggette a rumore e quindi si hanno delle osservazioni parziali o imperfette;
- perché il dominio è troppo dinamico per consentire un aggiornamento continuo della rappresentazione.

Rappresentazione del goal

Per rappresentare il goal si utilizza lo stesso linguaggio formale con cui si esprime lo stato iniziale. In questo caso la congiunzione rappresenta una descrizione parziale dello stato finale che si vuole raggiungere: descrive solo le condizioni che devono essere verificate affinché il goal sia soddisfatto.

Rappresentazione delle azioni

È necessario fornire al pianificatore una descrizione formale delle azioni eseguibili detta ***Teoria del Dominio***.

Ciascuna azione è identificata da un nome e modellata in forma dichiarativa per mezzo di ***precondizioni*** e ***postcondizioni***.

Le precondizioni rappresentano le condizioni che devono essere verificate affinché l'azione possa essere eseguita; le postcondizioni rappresentano gli effetti dell'azione stessa sul mondo.

Spesso la Teoria del Dominio è costituita da operatori con variabili che definiscono **classi di azioni**. A diverse istanziazioni delle variabili corrispondono diverse azioni.

Esempio: mondo dei blocchi

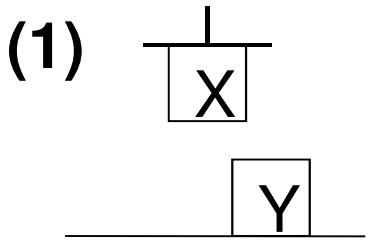
Problema: spostare blocchi su un tavolo con un braccio

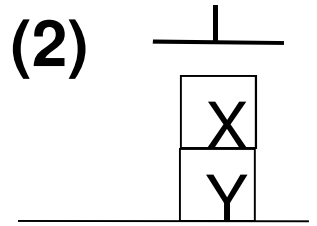
Azioni:

STACK(X,Y)

SE: holding(X) and clear(Y)

ALLORA: handempty and clear(X) and on(X,Y);

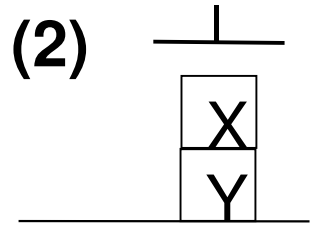


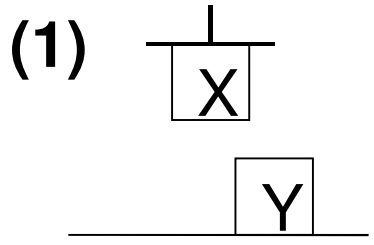


UNSTACK(X,Y)

SE: handempty and clear(X) and on(X,Y)

ALLORA: holding(X) and clear(Y);



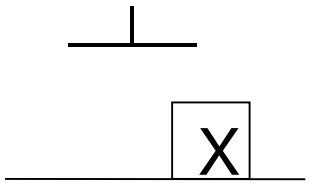


Esempio: mondo dei blocchi

PICKUP(X)

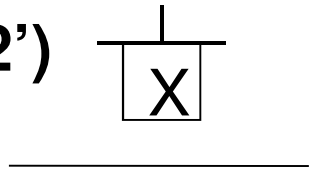
SE: ontable(X) and clear(X) and handempty

(1')



ALLORA: holding(X);

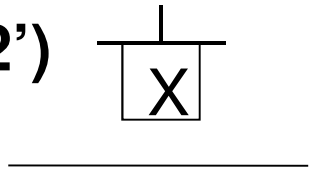
(2')



PUTDOWN(X)

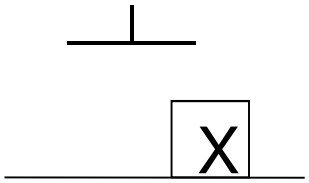
SE: holding(X)

(2')



ALLORA: ontable(X) and clear(X) and handempty.

(1')



Pianificazione

Processo per il calcolo dei diversi passi di una procedura di soluzione di un problema di pianificazione:

- *non decomponibile*

  ci può essere interazione fra i sottoproblemi

- *reversibile*

  le scelte fatte durante la **generazione** del piano sono revocabili (backtracking).

Un pianificatore è **completo** quando riesce sempre a trovare la soluzione se esiste.

Un pianificatore è **corretto** quando la soluzione trovata porta dallo stato iniziale al goal finale in modo consistente con eventuali vincoli.

Esecuzione

Processo di applicazione della procedura di soluzione

- *irreversibile*

  l'esecuzione delle azioni determina spesso un cambiamento di stato non reversibile,

- *non deterministica*

  il piano può avere un effetto diverso quando applicato al mondo reale che è spesso impredicibile. In questo caso è possibile rifare il piano solo parzialmente, oppure invalidarlo tutto a seconda del problema.

Pianificazione classica

Tipo di pianificazione *off-line* che produce l'intero piano prima di eseguirlo lavorando su una rappresentazione istantanea (*snapshot*) dello stato corrente.

È basata su alcune assunzioni forti:

- tempo atomico di esecuzione delle azioni
- determinismo degli effetti
- stato iniziale completamente noto a priori
- esecuzione del piano unica causa di cambiamento del mondo

Pianificazione reattiva

Metodo di pianificazione *on-line*

- considera l'ambiente non deterministico e dinamico
- è capace di osservare il mondo sia in fase di pianificazione sia in fase di esecuzione
- spesso alterna il processo di pianificazione a quello di esecuzione reagendo ai cambiamenti di stato

Cosa vedremo (Fondamenti di AI):

- Tecniche di Pianificazione Classica
  - Planning Deduttivo
    - Situation Calculus
      - Formalizzazione di Green
      - Formalizzazione di Kowalsky
  - Planning mediante ricerca
    - Ricerca nello spazio degli stati ⇨ Planning Lineare
      - STRIPS
- Esercitazioni Prolog/Strips forward

- Il seguito (planning non lineare/reattivo/condizionale/basato su grafi) nel Corso di Sistemi Intelligenti.

Planning Deduttivo

La tecnica di **pianificazione deduttiva** utilizza la logica per rappresentare stati, goal e azioni e genera il piano come dimostrazione di un teorema

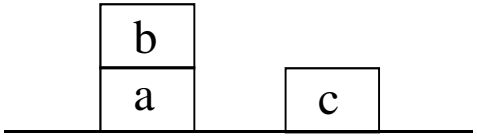
Situation Calculus *(fine anni '60)*

Formalizzazione del linguaggio (basato sulla logica dei predicati del primo ordine) in grado di rappresentare stati e azioni in funzione del tempo

- **Situation**: "fotografia" del mondo e delle proprietà (*fluent*) che valgono in un determinato istante/stato s
  - Esempio: mondo dei blocchi

    on(b,a,s)

    ontable(c,s)



- **Azioni**: definiscono quali fluent saranno veri come risultato di un'azione. Esempio

  on(X,Y,S) and clear(X,S) $\rightarrow$

  (ontable(X,do(putOnTable(X),S))) *and*

  (clear(Y,do(putOnTable(X),S)))

Situation Calculus

- ***Costruzione di un piano**: deduzione, dimostrazione di un goal*
  - *Esempio*

    :- ontable(b,S). Significa: esiste uno stato S in cui e' vero ontable(b)

    YES per S=putOntable(b,s0)

- ***Vantaggi**: elevata espressività, permette di descrivere problemi complessi*

- ***Problema**: frame problem*

Frame problem

Occorre specificare esplicitamente tutti i fluent che cambiano dopo una transizione di stato e anche quelli che NON cambiano (*assiomi di sfondo*: “Frame axioms”).

Al crescere della complessità del dominio il numero di tali assiomi cresce enormemente.

Il problema della rappresentazione della conoscenza diventa intrattabile

Pianificazione come deduzione (GREEN)

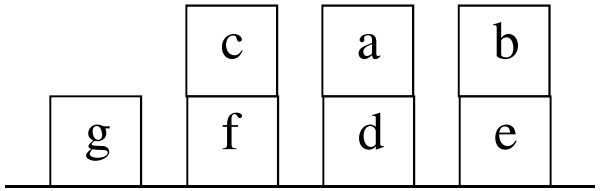
Green usa il *situation calculus* per costruire un pianificatore basato sul metodo di risoluzione.

Si cerca la prova di una formula contenente una variabile di stato che alla fine della dimostrazione sarà istanziata al piano di azioni che permette di raggiungere l'obiettivo

Esempio

- I seguenti assiomi descrivono tutte le relazioni vere nello stato iniziale s0

A.1 *on(a,d,s0).*
A.2 *on(b,e,s0).*
A.3 *on(c,f,s0).*
A.4 *clear(a,s0).*
A.5 *clear(b,s0).*
A.6 *clear(c,s0).*
A.7 *clear(g,s0).*
A.8 *diff(a,b)*
A.9 *diff(a,c)*
A.10 *diff(a,d)…*



Esempio

- Le azioni si esprimono con assiomi nella forme a clausole

L'azione *move(X,Y,Z)*

clear(X,S) and clear(Z,S) and on(X,Y,S) and diff(X,Z)
→ *clear(Y,do(move(X,Y,Z),S)), on(X,Z,do(move(X,Y,Z),S))*.

che sposta un blocco X da Y a Z, partendo dallo stato S e arriva allo stato *do(move(X,Y,Z),S)*) si esprime con i seguenti assiomi (*effect axioms)*

A.11 *~clear(X,S)* or *~clear(Z,S)* or *~on(X,Y,S)* or *~diff(X,Z) or clear(Y,do(move(X,Y,Z),S)).*

A.12 *~clear(X,S)* or *~clear(Z,S)* or *~on(X,Y,S)* or *~diff(X,Z) or on(X,Z,do(move(X,Y,Z),S))*.

Esempio

Dato un goal vediamo un esempio di come si riesce a trovare una soluzione usando il metodo di risoluzione:

GOAL:- on(a,b,S1)

~on(a,b,S1)

(A.12) {X/a,Z/b,S1/do(move(a,Y,b),S)}

~clear(a,S) or ~clear(b,S) or ~on(a,Y,S) or ~diff(a,b)

(A.4)	*(A.5)*	*(A.1)*	*(A.8)*
{S/s0},	*{S/s0},*	*{S/s0, Y/d}*	*true*

~on(a,b,S1) porta a una contraddizione quindi on(a,b,S1) risulta dimostrato con la sostituzione S1/do(move(a,d,b),s0).

Supponiamo di voler risolvere un problema un po' più complesso

Goal: on(a,b,S), on(b,g,S).

Soluzione*: S/do(move(a,d,b),do(move(b,e,g),s0)).*

Per poterlo risolvere occorre una descrizione completa dello stato risultante dall'esecuzione di ciascuna azione.

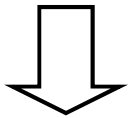
Frame problem

Per descrivere un'azione oltre agli effect axioms occorre specificare tutti i fluent che NON sono invalidati dall'azione stessa (*frame axioms)*. Nel nostro esempio occorrono i seguenti assiomi:

on(U,V,S) and diff(U,X) → on(U,V,do(move(X,Y,Z),S))

clear(U,S) and diff(U,Z) → clear(U,do(move(X,Y,Z),S))

Occorre esplicitare un frame axioms per ogni relazione NON modificata dall'azione.



Se il problema è complicato la complessità diventa inaccettabile

Formulazione di Kowalsky

Rappresenta una formulazione più semplice:

- Viene utilizzato il predicato *holds(rel, s/a)* per indicare tutte le relazioni *rel* vere in un certo stato *s* o rese vere da una certa azione *a*
- Il predicato *poss(s)* indica che uno stato *s* è possibile ovvero raggiungibile.
- Si utilizza il predicato *pact(a,s)* per affermare che è lecito compiere una determinata azione *a* in un particolare stato *s*, ovvero le precondizioni per svolgere l'azione sono soddisfatte in s.

Se uno stato S è possibile e se le precondizioni *pact* di un'azione U sono soddisfatte in quello stato, allora anche lo stato prodotto do(U,S) è possibile:

poss(S) and pact(U,S) → poss(do(U,S))

Formulazione di Kowalsky

Quelli che nella formulazione di Green sono predicati qui diventano termini. In pratica, guadagnamo i vantaggi di una formulazione del II ordine mantenendoci in un sistema del I ordine.

In questo modo abbiamo bisogno di una singola frame assertion per ogni azione (vantaggio rispetto a Green)

Nell'esempio precedente l'unica frame assertion che deve essere esplicitata è:

$holds(V,S) \wedge diff(V,clear(Z)) \wedge diff(V,on(X,Y)) \rightarrow holds(V,do(move(X,Y,Z),S)))$

che afferma che tutti i termini differenti da *clear(Z)* e *on(X,Y)* valgono ancora in tutti gli stati prodotti dall'esecuzione di *move*.

Esempio

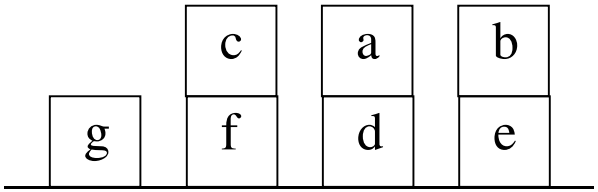
Goal

:- *poss(S), holds(on(a,b),S), holds(on(b,g),S)*.

Usiamo PROLOG per risolverlo

Stato iniziale

poss(s0).
holds(on(a,d),s0).
holds(on(b,e),s0).
holds(on(c,f),s0).
holds(clear(a),s0).
holds(clear(b),s0).
holds(clear(c),s0).
holds(clear(g),s0).



Esempio

Effetti dell'azione move(X,Y,Z):

holds(clear(Y),do(move(X,Y,Z),S)). holds(on(X,Z),do(move(X,Y,Z),S)).

Clausola che esprime le precondizioni dell'azione move(X,Y,Z):

pact(move(X,Y,Z),S):-

holds(clear(X),S), holds(clear(Z),S), holds(on(X,Y),S), X\=Z.

Clausola per esprimere le condizioni di frame:

holds(V,do(move(X,Y,Z),S)):- holds(V,S), V\=clear(Z), V\=on(X,Y).

Clausola per esprimere la raggiungibilità di uno stato:

poss(do(U,S)):- poss(S), pact(U,S).

Soluzione

:- *poss(S), holds(on(b,g),S), holds(on(a,b),S)*.

Yes per *S = do(move(a, d, b), do(move(b, e, g), s0))*

Pianificazione come ricerca

- *Quello che cambia è lo spazio di ricerca, definito da che cosa sono gli stati e gli operatori:*
  - *Pianificazione deduttiva come* theorem proving*: stati come insiemi di formule e operatori come regole di inferenza*
  - *Pianificazione nello spazio degli stati: stati come descrizioni di situazioni e operatori come modifiche dello stato*
  - *Pianificazione nello spazio dei piani: stati come piani parziali e operatori di raffinamento e completamento di piani (non la vedremo in questo corso)*

Planning classico non deduttivo

La pianificazione classica non deduttiva

- utilizza linguaggi specializzati per rappresentare stati, goal e azioni
- gestisce la generazione del piano come un problema di ricerca (*search*).

La ricerca può essere effettuata:

- nello **spazio degli stati** o situazioni

  Nell'albero di ricerca ogni nodo rappresenta uno stato e ogni arco un'azione.

- nello **spazio dei piani**

  Nell'albero di ricerca ogni nodo rappresenta un piano parziale e ogni arco un'operazione di raffinamento del piano

Ricerca nello spazio degli stati: Planning Lineare

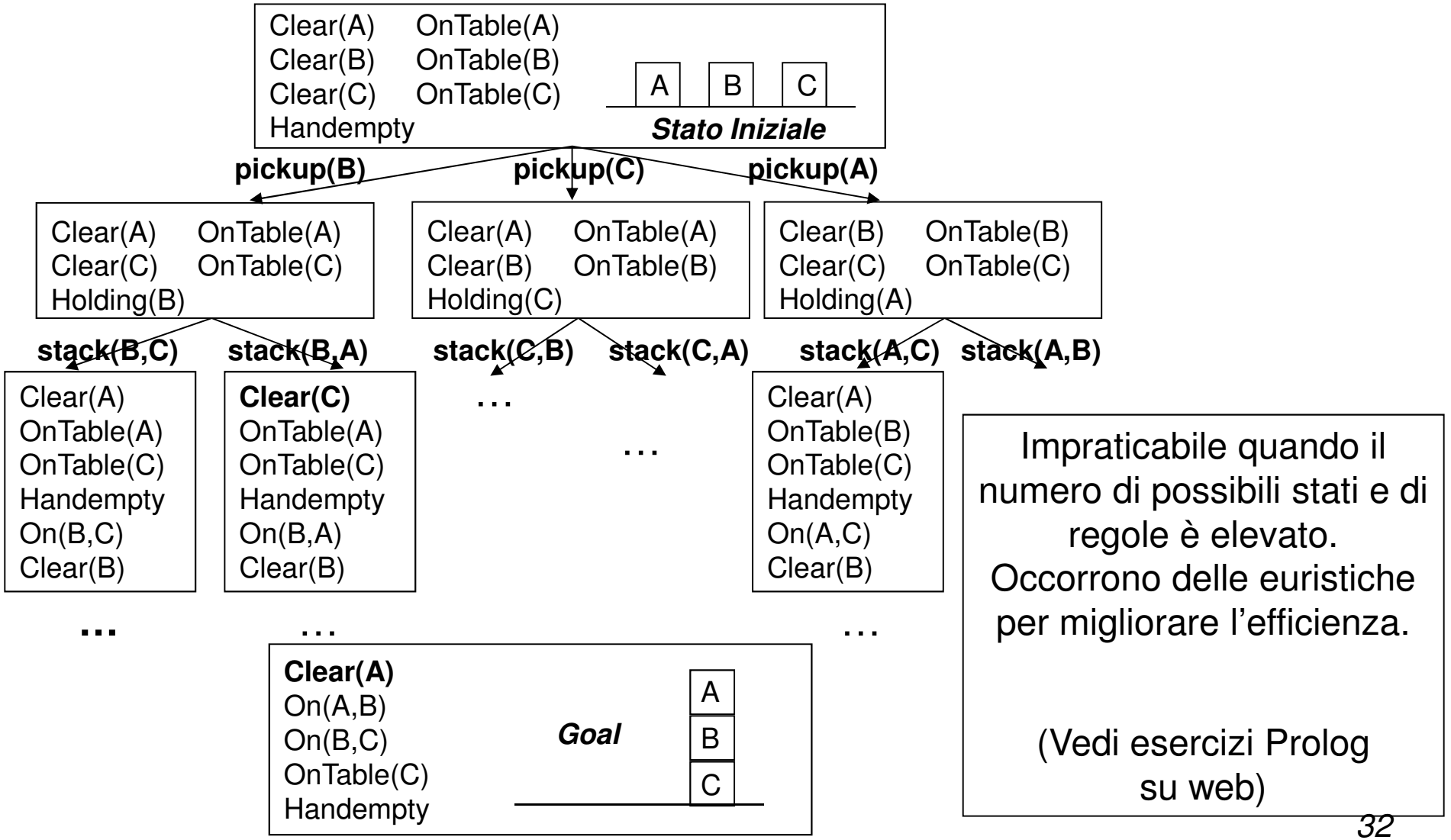
Un **pianificatore lineare** riformula il problema di pianificazione come problema di ricerca nello spazio degli stati e utilizza le strategie di ricerca classiche:

L'algoritmo di ricerca può essere:

- **Forward**: se la ricerca avviene in modo progressivo partendo dallo stato iniziale fino al raggiungimento di uno stato che soddisfa il goal.
- **Backward**: quando la ricerca è attuata in modo regressivo a partire dal goal fino a *ridurre* il goal in sottogoal soddisfatti dallo stato iniziale.

Problema: definire come si effettua la *riduzione di un goal in sottogoal* (GOAL REGRESSION) tenendo conto della forma delle regole

Ricerca Forward: un esempio



Impraticabile quando il numero di possibili stati e di regole è elevato.
Occorrono delle euristiche per migliorare l'efficienza.

(Vedi esercizi Prolog su web)

Ricerca backward: Goal Regression

La **regressione** è il meccanismo di base per ridurre un goal in sottogoal in un planner backward attraverso le regole

Dati un goal *G* e una regola *R*

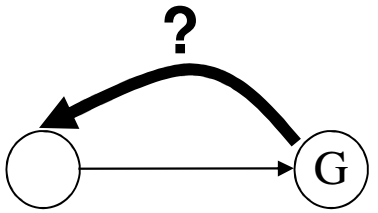
PRECOND: *Plist*

DELETE: *Dlist*

ADD: *Alist*

la Regressione di *G* attraverso *R* ***Regr[G, R]*** è:

- Regr[G,R] = true se G∈ Alist
- Regr[G,R] = false se G∈ Dlist
- Regr[G,R] = G altrimenti



Esempio

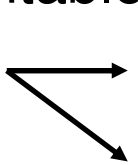
Data R1:*unstack(X,Y)*

PRECOND: handempty, on(X,Y), clear(X)

DELETE: handempty, on(X,Y), clear(X)

ADD: holding(X), clear(Y)

si ha:

- Regr[holding(b), R1] = true
- Regr[handempty,R1]=false
- Regr[ontable(c),R1]=ontable(c)
- Regr[clear(c), R1] = 

= Y = c ∨ clear(c)

X=c and
FALSE

Riduzione di goal in sottogoal

Dato il goal *G:[G1, G2, …, Gn*] e la regola *R*

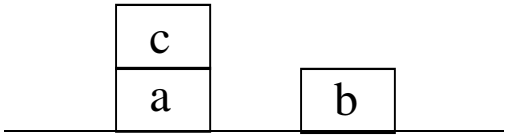
R: PRECOND: *Plist = P1, P2, …Pm*
DELETE: *Dlist = D1, D2, …, Dk*
ADD: *Alist = A1, A2, … Al*

Il sottogoal che si ottiene da G attraverso R è dato dalla congiunzione:

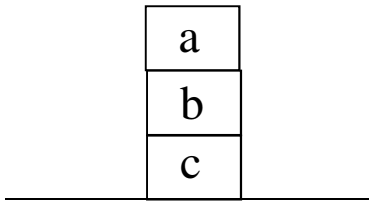
Regr[G1, R], Regr[G2, R], …, Regr[Gn,R],
D1, D2, …,Dk, P1, P2, … Pm

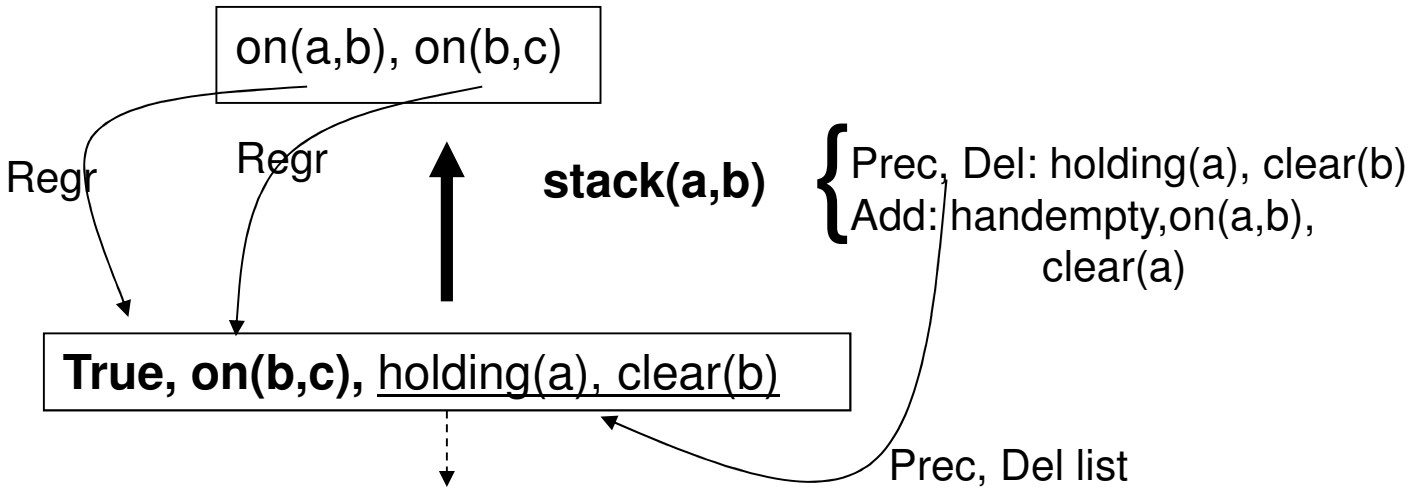
Esempio

Stato iniziale: clear(b), clear(c), on(c,a),
handempty, ontable(a), ontable(b)



Goal: on(a,b), on(b,c)





Nuova lista di goal da soddisfare

Algoritmo backward

- Data la lista G:[G1,G2,…,Gn] di tutti i goal e sottogoal del problema ancora da soddisfare e l'insieme delle regole R:[R1,R2,…,Rm], applica la regression per ogni Rj tale che ∃ Gi per cui Gi∈ Addlist(Rj) fino a raggiungere un sottogoal soddisfatto dallo stato iniziale.
- Se Regr[Gi,Rj]=false allora taglia quel ramo

Esempio precedente. Date le azioni:

pickup(X)
PRECOND: ontable(X), clear(X), handempty
DELETE: ontable(X), clear(X), handempty
ADD: holding(X)

putdown(X)
PRECOND: holding(X)
DELETE: holding(X)
ADD: ontable(X), clear(X), handempty

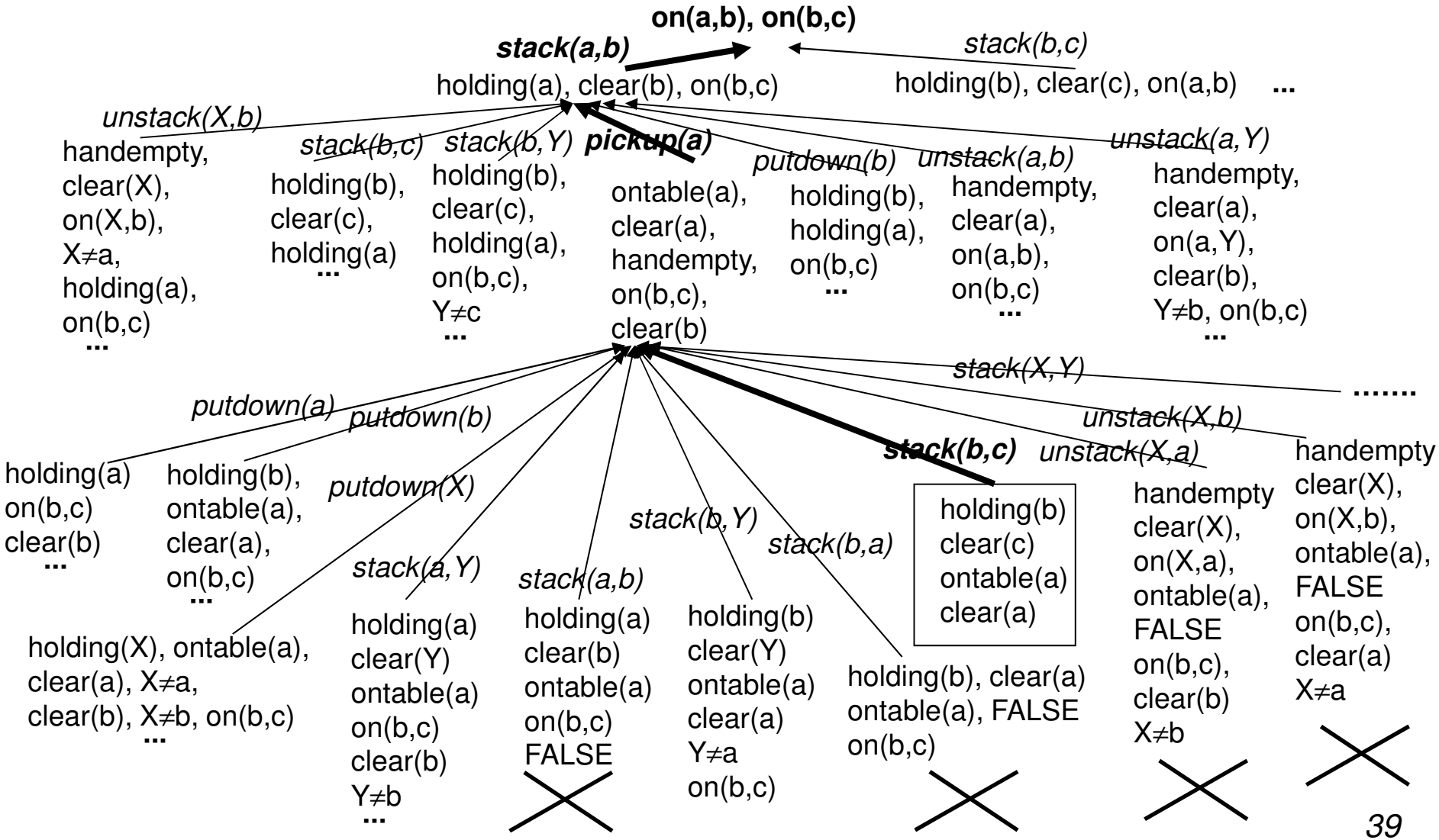
Algoritmo backward

stack(X,Y)
PRECOND: holding(X), clear(Y)
DELETE: holding(X), clear(Y)
ADD: handempty, on(X,Y), clear(X)

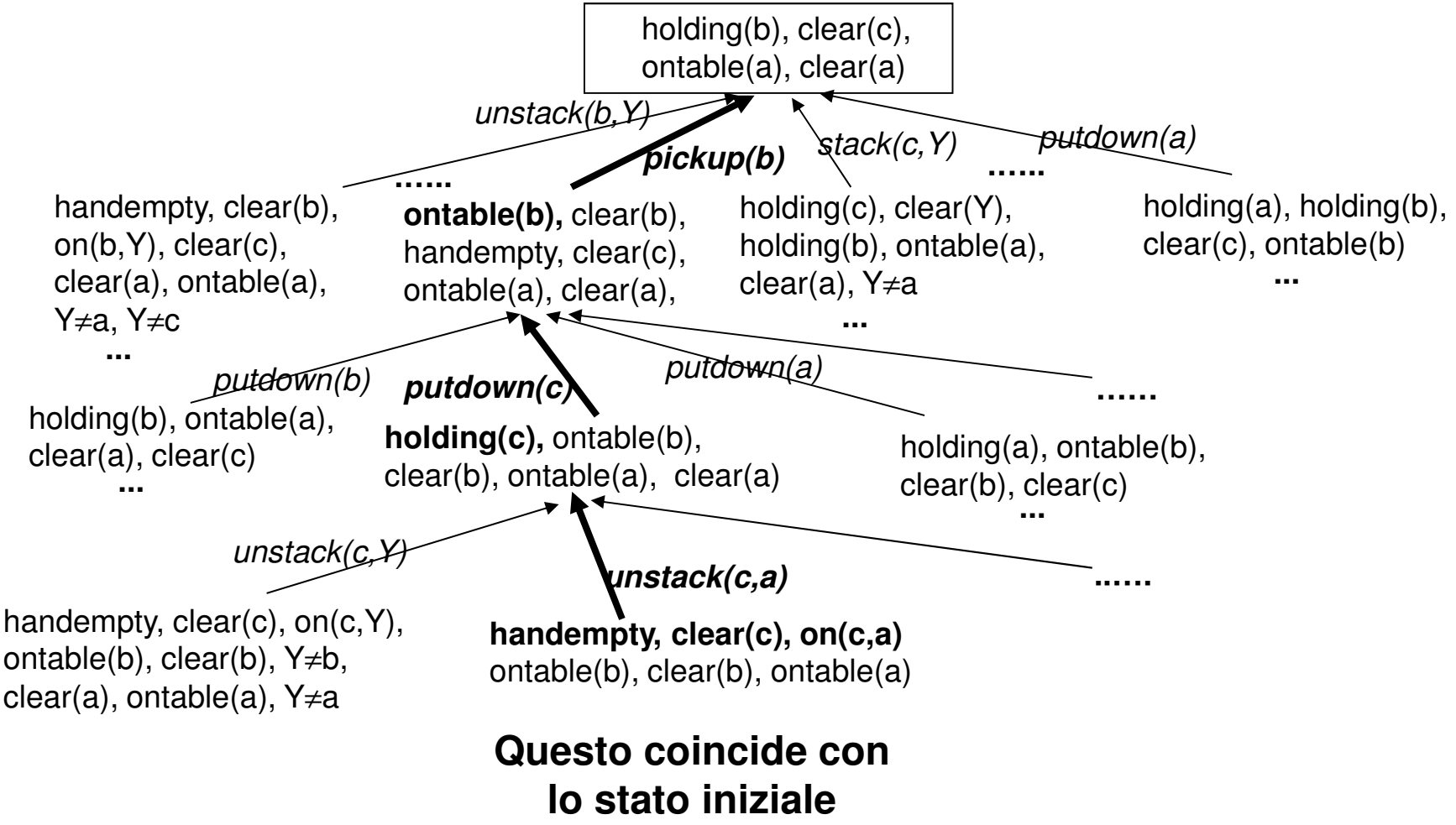
unstack(X,Y)
PRECOND: handempty, on(X,Y), clear(X)
DELETE: handempty, on(X,Y), clear(X)
ADD: holding(X), clear(Y)

viene generato il grafo completo mostrato nelle prossime slide

Esempio di grafo completo



Esempio di grafo completo



Questo coincide con lo stato iniziale

STRIPS

STRIPS - Stanford Research Institute Problem Solver

Antenato degli attuali sistemi di pianificazione. (primi anni ’70)

- Linguaggio per la rappresentazione di azioni. Sintassi molto più semplice del Situation Calculus (meno espressività, più efficienza).
- Algoritmo per la costruzione di piani.

Linguaggio Strips

- Rappresentazione dello stato
  - Insieme di fluent che valgono nello stato

    Esempio: *on(b,a), clear(b), clear(c), ontable(c)*
- Rappresentazione del goal
  - Insieme di fluent (simile allo stato)
  - Si possono avere variabili

    Esempio: *on(X,a)*

Linguaggio Strips

- Rappresentazione delle azioni (3 liste)
  - PRECONDIZIONI: fluent che devono essere veri per applicare l'azione
  - DELETE List: fluent che diventano falsi come risultato dell'azione
  - ADD List: fluent che diventano veri come risultato dell'azione

Esempio *Move(X, Y, Z)*

Precondizioni*: on(X,Y), clear(X), clear(Z)*

Delete List*: clear(Z), on(X,Y)*

Add list*: clear(Y), on(X,Z)*

A volte ADD e DELETE list sono rappresentate come **EFFECT** list con atomi positivi e negativi

Esempio *Move(X, Y, Z)*

Precondizioni*: on(X,Y), clear(X), clear(Z)*

Effect List*: ¬clear(Z), ¬on(X,Y), clear(Y), on(X,Z)*

Frame problem risolto con la **Strips Assumption**:

tutto ciò che non è specificato nella ADD e DELETE list resta immutato

AZIONI in STRIPS (1)

pickup(X)
PRECOND: ontable(X), clear(X), handempty
DELETE: ontable(X), clear(X), handempty
ADD: holding(X)

putdown(X)
PRECOND: holding(X)
DELETE: holding(X)
ADD: ontable(X), clear(X), handempty

AZIONI IN STRIPS (2)

stack(X,Y)
PRECOND: holding(X), clear(Y)
DELETE: holding(X), clear(Y)
ADD: handempty, on(X,Y), clear(X)

unstack(X,Y)
PRECOND: handempty, on(X,Y), clear(X)
DELETE: handempty, on(X,Y), clear(X)
ADD: holding(X), clear(Y)

Algoritmo STRIPS

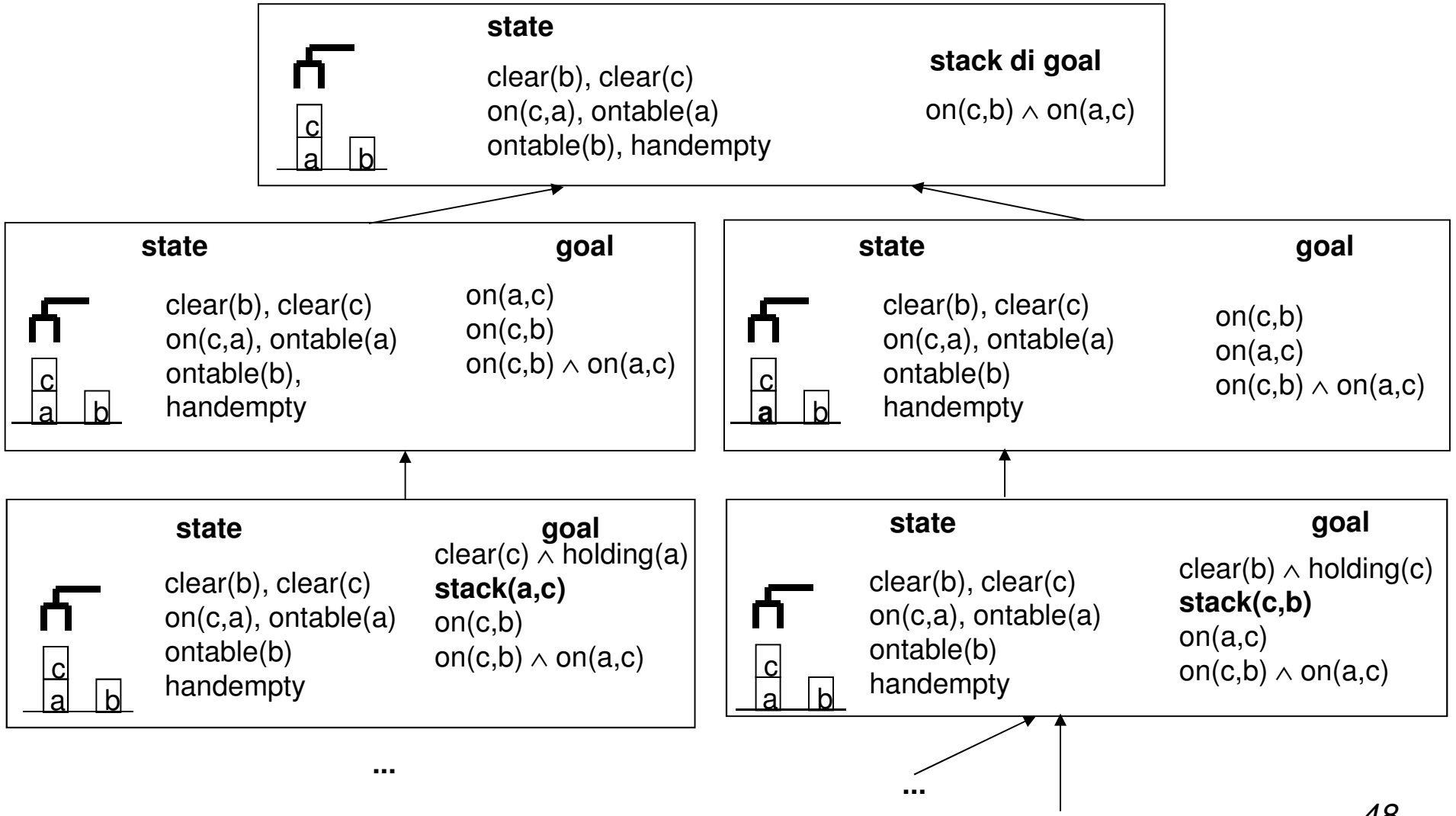
- Planner lineare basato su ricerca backward
- Assume che lo stato iniziale sia completamente noto (**Closed World Assumption**)
- Utilizza due strutture dati
  - stack di goal
  - descrizione S dello stato corrente
- Algoritmo
  - Inizializza stack con la congiunzione di goal finali
  - while stack non è vuoto do
    if top(stack) = A and $A\theta \subseteq S$ (si noti che A puo essere un and di goals o un atomo)
    then pop(a) ed esegui sost θ sullo stack
    else if top(stack) = a
    then
    – seleziona regola R con a ∈ Addlist(R),
    – pop(a), push(R), push(Precond(R));
    else if top(stack) = a1 ∧ a2 ∧ … ∧ an
    (*) then push(a1),…, push(an)
    else if top(stack) = R
    then pop(R) e applica R trasformando S

(*) si noti che l'ordine con cui i sottogoal vengono inseriti nello stack rappresenta un punto di scelta non deterministica. La congiunzione rimane sullo stack e verrà riverificata dopo - interacting goals)

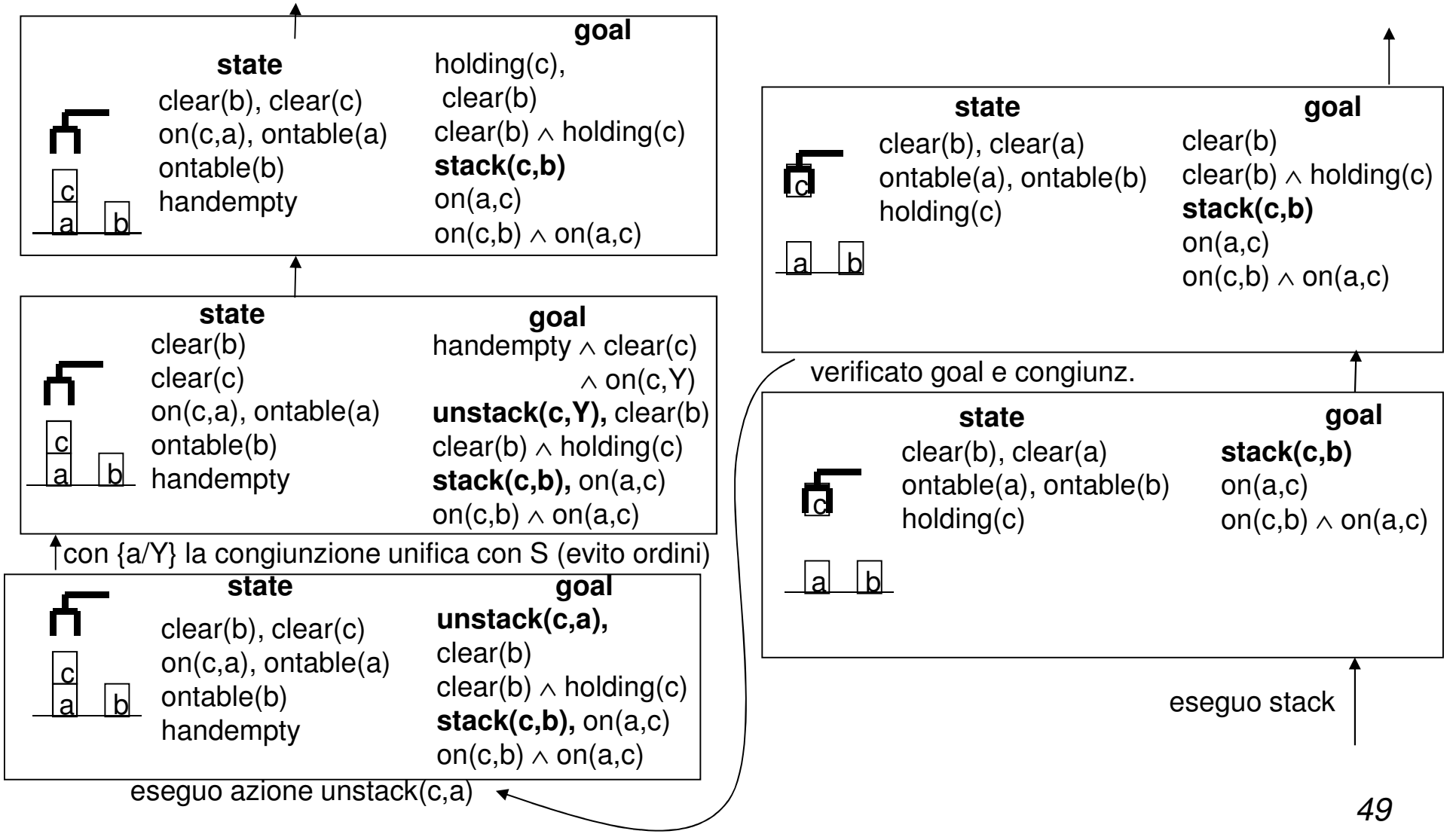
Considerazioni sull'algoritmo

1. Il goal è la prima pila di obiettivi.
2. Suddividere il problema in sottoproblemi: ciascuno per un componente dell'obiettivo originale. Tali sottoproblemi possono interagire
3. Abbiamo tanti possibili ordini di soluzione.
4. Ad ogni passo del processo di risoluzione si cerca di risolvere il goal in cima alla pila.
5. Quando si ottiene una sequenza di operatori che lo soddisfa la si applica alla descrizione corrente dello stato ottenendo una nuova descrizione.
6. Si cerca poi di soddisfare l'obiettivo che è in cima alla pila partendo dalla situazione prodotta dal soddisfacimento del primo obiettivo.
7. Il procedimento continua fino allo svuotamento della pila.
8. Quando in cima alla pila si incontra una congiunzione si verifica che tutte le sue componenti siano effettivamente soddisfatte nello stato attuale. Se una componente non è soddisfatta (problema dell'interazione tra goal è spiegato più avanti) si reinserisce nella pila e si continua.

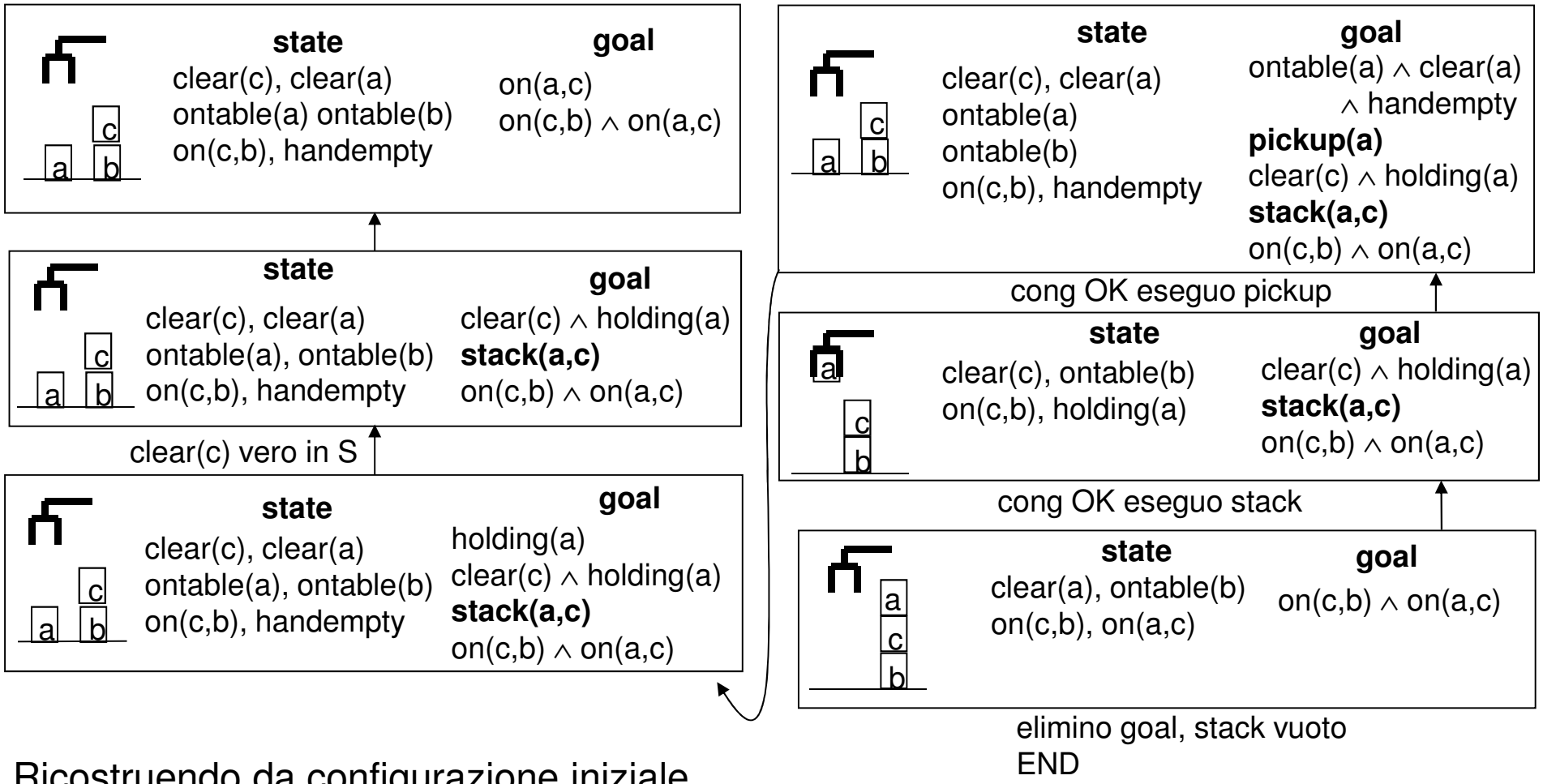
Esempio


state
clear(b), clear(c)
on(c,a), ontable(a)
ontable(b), handempty
stack di goal
on(c,b) ∧ on(a,c)
state
clear(b), clear(c)
on(c,a), ontable(a)
ontable(b),
handempty
goal
on(a,c)
on(c,b)
on(c,b) ∧ on(a,c)
state
clear(b), clear(c)
on(c,a), ontable(a)
ontable(b)
handempty
goal
on(c,b)
on(a,c)
on(c,b) ∧ on(a,c)
state
clear(b), clear(c)
on(c,a), ontable(a)
ontable(b)
handempty
goal
clear(c) ∧ holding(a)
stack(a,c)
on(c,b)
on(c,b) ∧ on(a,c)
state
clear(b), clear(c)
on(c,a), ontable(a)
ontable(b)
handempty
goal
clear(b) ∧ holding(c)
stack(c,b)
on(a,c)
on(c,b) ∧ on(a,c)
...
...

Esempio


state
clear(b), clear(c)
on(c,a), ontable(a)
ontable(b)
handempty
goal
holding(c),
clear(b)
clear(b) ∧ holding(c)
stack(c,b)
on(a,c)
on(c,b) ∧ on(a,c)
state
clear(b)
clear(c)
on(c,a), ontable(a)
ontable(b)
handempty
goal
handempty ∧ clear(c)
∧ on(c,Y)
unstack(c,Y), clear(b)
clear(b) ∧ holding(c)
stack(c,b), on(a,c)
on(c,b) ∧ on(a,c)
con {a/Y} la congiunzione unifica con S (evito ordini)
state
clear(b), clear(c)
on(c,a), ontable(a)
ontable(b)
handempty
goal
unstack(c,a),
clear(b)
clear(b) ∧ holding(c)
stack(c,b), on(a,c)
on(c,b) ∧ on(a,c)
eseguo azione unstack(c,a)
state
clear(b), clear(a)
ontable(a), ontable(b)
holding(c)
goal
clear(b)
clear(b) ∧ holding(c)
stack(c,b)
on(a,c)
on(c,b) ∧ on(a,c)
verificato goal e congiunz.
state
clear(b), clear(a)
ontable(a), ontable(b)
holding(c)
goal
stack(c,b)
on(a,c)
on(c,b) ∧ on(a,c)
eseguo stack

Esempio



Ricostruendo da configurazione iniziale a finale ho una soluzione:

1. unstack(c,a)
2. stack(c,b)
3. pickup(a)
4. stack(a,c)

Problemi (1)

1. **Grafo di ricerca molto vasto.** Nell'esempio abbiamo visto un cammino ma in realtà ci sono varie alternative
   - scelte non deterministiche ordinamento dei goal
   - più operatori applicabili per ridurre un goal

Soluzione: Strategie euristiche

- strategie di ricerca
- strategie per scegliere quale goal ridurre e quale operatore
  - **MEANS-ENDS ANALYSIS**
    - cercare la differenza più significativa tra stato e goal
    - ridurre quella differenza per prima

Problemi (2)

2. **Problema dell'interazione tra goal.** Quando due (o più) goal inter-agiscono ci possono essere problemi di interazione tra le due soluzioni.

Goal G1, G2

- pianifico azioni per G2
- poi per risolvere G1 potrei dover smontare tutto, compreso lo stato che avevo prodotto con G2 risolto

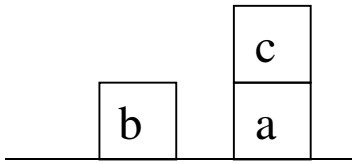
- Soluzione completa:
  - provare tutti gli ordinamenti dei goal e dei loro sottogoal.

- Soluzione pratica (Strips):
  - provare a risolverli indipendentemente
  - verificare che la soluzione funzioni
  - se non funziona, provare gli ordinamenti possibili uno alla volta

Esempio: Anomalia di Sussmann

Stato iniziale (come esempio precedente):

clear(b),
clear(c),
on(c,a),
ontable(a),
ontable(b),
handempty

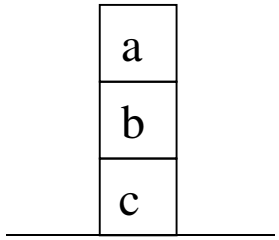


Goal: on(a,b),on(b,c)

Possibili stack iniziali:

(1)
on(a,b)
on(b,c)
on(a,b) ∧ on(b,c)

(2)
on(b,c)
on(a,b)
on(a,b) ∧ on(b,c)



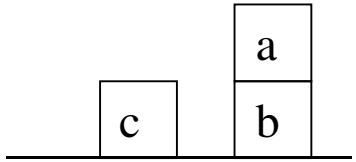
Decidiamo di scegliere (1)

Esempio: Anomalia di Sussmann

Applicando il procedimento di soluzione di STRIPS otteniamo:

1. unstack(c,a)
2. putdown(c)
3. pickup(a)
4. stack(a,b)

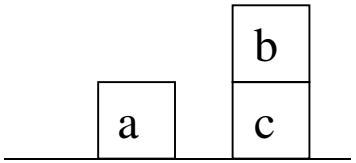
Stato attuale:



Adesso lavoriamo al soddisfacimento del secondo goal on(b,c).

5. unstack(a,b)
6. putdown(a)
7. pickup(b)
8. stack(b,c)

Stato attuale:



Esempio: Anomalia di Sussmann

La congiunzione on(a,b) ∧ on(b,c) non è valida.

Allora reinseriamo on(a,b) nello stack di goals (è la differenza rispetto allo stato attuale).

Otteniamo:

9. pickup(a)
10. stack(a,b)

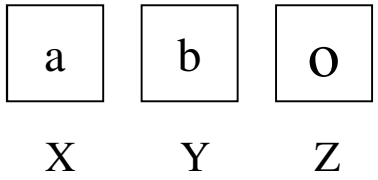
Abbiamo ottenuto quello che volevamo, ma in modo scarsamente efficiente.

Problemi (3)

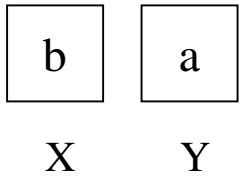
3. Perdita di informazioni:

Supponiamo di voler utilizzare STRIPS per generare un piano che attui lo scambio di valore fra due celle di memoria o registri X e Y.

Stato iniziale:
cont(x,a) and cont(y,b) and cont(z,o)



Stato finale:
cont(x,b) and cont(y,a)



Operazione di assegnamento:

ASSIGN(X,Y,T,S)
Precondition: cont(Y,S) and cont(X,T)
Delete: cont(X,T)
Add: cont(X,S)

Problemi (3)

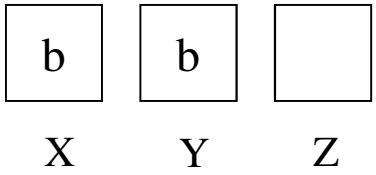
Goal stack:

cont(x,b),
cont(y,a),
cont(x,b) $\wedge$ cont(y,a)

Per ridurre il goal cont(x,b) applica ASSIGN con Y/y e T/a

cont(y,b) $\wedge$ cont(x,a), **assign(x,y,a,b),**

Dopo l'esecuzione lo stato diventa:



cont(x,b), cont(y,b), cont(z,o)

Il goal cont(y,a) rimasto nello stack non potrà mai essere soddisfatto.

Proprietà distruttiva dello statement di assegnamento!

STRIPS è troppo "ansioso" di risolvere l'obiettivo e quindi distrugge inesorabilmente il contenuto di una cella di memoria!

Soluzione: Pianificazione Non Lineare

I pianificatori non lineari sono algoritmi di ricerca che gestiscono la generazione di un piano come un problema di ricerca nello spazio dei piani e non più degli stati.

- L'algoritmo non genera più il piano come una successione lineare (completamente ordinata) di azioni per raggiungere i vari obiettivi.

- Si vedra`nel Corso di Sistemi Intelligenti.

- POP (partial Order Planning)

Planning in pratica

- Molte applicazioni in domini complessi:
  - Pianificatori per Internet (ricerca di informazioni, sintesi di comandi Unix)

  http://www.cs.washington.edu/research/projects/softbots/www/softbots.html
  - Gestione di strumentazione spaziale

  http://rax.arc.nasa.gov/
  - Robotica

  http://www.robocup.org/
  - Graphplan sviluppato dalla Carnegie Mellon University

  http://www.cs.cmu.edu/~avrim/graphplan.html
  - Piani di produzione industriale
  - Logistica

- Algoritmi visti presentano problemi di efficienza in caso di domini con molti operatori

- Tecniche per rendere più efficiente il processo di pianificazione

↓

PLANNING GERARCHICO

Pianificazione Gerarchica

I pianificatori gerarchici sono algoritmi di ricerca che gestiscono la creazione di piani complessi a diversi livelli di astrazione, considerando i dettagli più semplici solo dopo aver trovato una soluzione per i più difficili.

- Linguaggio che permette di definire operatori a diversi livelli di astrazione:
  - *Valori di criticità assegnati alle precondizioni*
  - *Operatori "atomici"/Macro operatori*

Tutti gli operatori sono definiti ancora con PRECONDIZIONI ed EFFETTI.

- Algoritmo di pianificazione gerarchica più diffusi:
  - *STRIPS-Like*
  - *Partial-Order*

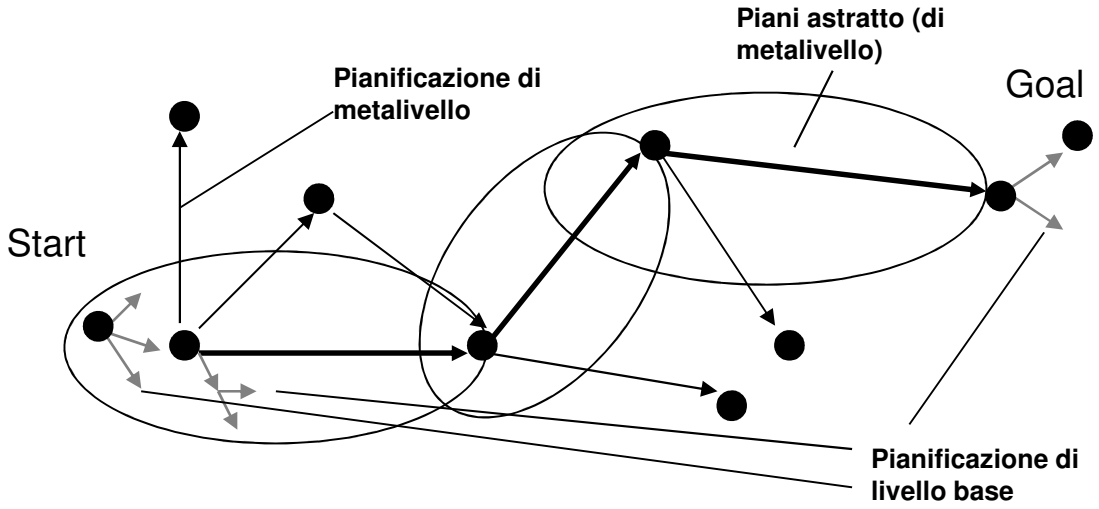
Dato un goal il pianificatore gerarchico effettua una ricerca di "meta-livello" per generare un piano anch'esso detto "di meta livello" che porta da uno stato molto vicino allo stato iniziale ad uno stato molto vicino al goal.

Pianificazione Gerarchica

Questo piano viene poi rifinito con una ricerca di più basso livello che tiene conto dei dettagli fin qui tralasciati.

Quindi un algoritmo gerarchico deve essere in grado di:

- pianificare a livello alto (*meta-livello*)
- espandere piani astratti in piani concreti
  - pianificando parti astratte in termini di azioni più specifiche (pianificazione di *livello base*)
  - espandendo piani già precostruiti



ABSTRIPS

Pianificatore Gerarchico che usa la definizione delle azioni di Strips dove in più a ciascuna precondizione è associato un **valore di criticità** che consiste nella sua difficoltà di raggiungimento.

La pianificazione procede a livelli in una gerarchia di spazi di astrazione in ciascuno dei quali vengono ignorate le precondizioni di livelli di difficoltà inferiore.

ABSTRIPS esplora interamente lo spazio di un determinato livello di astrazione prima di passare ad un livello più dettagliato: **ricerca in lunghezza**.

Ad ogni livello di astrazione viene generato un piano completo

Esempi applicativi:

- costruzione di un palazzo,
- organizzazione di un viaggio,
- progetto di un programma top-down.

ABSTRIPS: Metodologia di soluzione

1. Viene fissato un valore di soglia.
2. Si considerano vere tutte le precondizioni il cui valore di criticità è minore del valore di soglia.
3. Si procede come STRIPS(*) per la ricerca di un piano che soddisfi tutte le precondizioni con valore di criticità superiore o uguale al valore di soglia.
4. Si usa poi lo schema di piano completo così ottenuto come guida e si abbassa il valore di soglia di 1.
5. Si estende il piano con gli operatori che soddisfano le precondizioni. di livello di criticità maggiore o uguale al nuovo valore di soglia.
6. Si abbassa il valore di soglia fino a che si sono considerate tutte le precondizioni delle regole originarie.

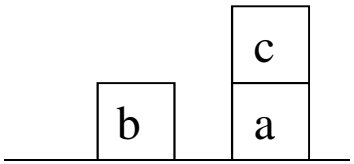
È importante assegnare bene i valori di criticità delle precondizioni!!!

(*) Ad ogni livello possiamo utilizzare un planner diverso, non necessariamente STRIPS.

Esempio (Algoritmo Strips-Like)

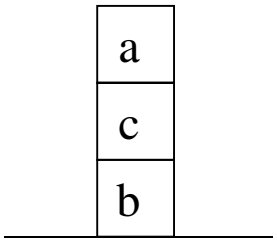
- Stato iniziale:

clear(b)
clear(c)
on(c,a)
handempty
ontable(a)
ontable(b)



- Goal:

on(c,b) $\wedge$ *on(a,c)*



Specifichiamo una gerarchia di goal e precondizioni assegnando dei valori di criticità (che riflettono il grado di difficoltà nel soddisfarli):

on **(3)**
ontable, clear, holding **(2)**
handempty **(1)**

Esempio (Algoritmo Strips-Like)

Utilizziamo le regole STRIPS:

pickup(X)
PRECOND: *ontable(X), clear(X), handempty*
DELETE: *ontable(X), clear(X), handempty*
ADD: *holding(X)*

putdown(X)
PRECOND: *holding(X)*
DELETE: *holding(X)*
ADD: *ontable(X), clear(X), handempty*

stack(X,Y)
PRECOND: *holding(X), clear(Y)*
DELETE: *holding(X), clear(Y)*
ADD: *handempty, on(X,Y), clear(X)*

unstack(X,Y)
PRECOND: *handempty, on(X,Y), clear(X)*
DELETE: *handempty, on(X,Y), clear(X)*
ADD: *holding(X), clear(Y)*

Esempio (Algoritmo Strips-Like)

- Al **primo livello** di astrazione si considerano solo le precondizioni con valore di criticità 3 e si ottiene il seguente goal stack:

on(c,b)
on(a,c)
on(c.b) ∧ on(a,c)

- L'azione *stack(c,b)* viene aggiunta al piano per soddisfare *on(c,b)*.
- Visto che le sue precondizioni hanno tutte valore di criticità minore di 3 vengono considerate soddisfatte.

Per cui viene generato una nuova descrizione di stato simulando l'azione *stack(c,b)*.

state description	**goal stack**
clear(b) clear(c) ontable(a) ontable(b) **on(c,b)** handempty on(c,a)	on(a,c) on(c,b) ∧ on(a,c)

Nota: nella descrizione dello stato vengono aggiunti o cancellati solo i letterali delle ADD e DELETE list con valore di criticità maggiore o uguale a 3. Ci possono quindi essere contraddizioni nella descrizione dello stato ma questo non causa problemi.

Esempio (Algoritmo Strips-Like)

- Si aggiunge al piano l'azione *stack(a,c)* con cui si effettua lo stesso procedimento visto per *stack(c,b)*. Si ottiene il piano completo di livello 1:

1. **stack(a,c)**
2. **stack(c,b)**

- Passiamo la soluzione al **livello 2**: si riconsidera la descrizione di stato iniziale e il goal stack di partenza diventa:

holding(c)
clear(b)
holding(c) $\wedge$ clear(b)
stack(c,b)
holding(a)
clear(c)
holding(a) $\wedge$ clear(c)
stack(a,c)
on(c,b) $\wedge$ on(a,c)

Esempio (Algoritmo Strips-Like)

- la condizione *holding(c)* è soddisfacibile con un'azione *unstack(c,X)* per cui lo stack diventa

clear(c)
on(c,X)
clear(c) and on(c,X)
unstack(c,X)
clear(b)
holding(c) $\wedge$ clear(b)
stack(c,b)
holding(a)
clear(c)
holding(a) $\wedge$ clear(c)
stack(a,c)
on(c,b) $\wedge$ on(a,c)

- le precondizioni di *unstack(c,X)* da considerare a livello 2 (*clear(c)* e *on(c,X)*) sono tutte soddisfatte nello stato iniziale con la sostituzione *X/a*.

Esempio (Algoritmo Strips-Like)

Simulando l'azione *unstack(c,a)* si ottiene:

state description	**goal stack**
clear(b) clear(a) ontable(a) ontable(b) handempty holding(c)	clear(b) holding(c) ∧ clear(b) **stack(c,b)** holding(a) clear(c) holding(a) ∧ clear(c) **stack(a,c)** on(c,b) ∧ on(a,c)

E così via fino ad ottenere il piano completo:

1. **unstack(c,a)**
2. **stack(c,b)**
3. **pickup(a)**
4. **stack(a,c)**

Esempio (Algoritmo Strips-Like)

- A **livello 3** abbiamo il seguente goal stack:

  handempty $\wedge$ clear(c) $\wedge$ on(c,a)
  unstack(c,a)
  holding(c) $\wedge$ clear(b)
  stack(c,b)
  handempty $\wedge$ clear(a) $\wedge$ ontable(a)
  pickup(a)
  holding(a) $\wedge$ clear(c)
  stack(a,c)
  on(c,b) $\wedge$ on(a,c)

Tutte le precondizioni sono già state soddisfatte ai livelli di astrazione precedenti a parte *handempty*.

La ricerca di una soluzione a livello 3 in questo caso risulta semplicemente una verifica della soluzione trovata a livello 2 che risulta essere corretta anche a livello 3.

Nota: A livello 1 sarebbe stato altrettanto valido il piano

1. **stack(a,c)**
2. **stack(c,b)**

che si sarebbe ottenuto considerando i due goal in ordine inverso. Ma ai livelli più bassi questo piano sarebbe fallito causando backtracking.

Esecuzione

I pianificatori visti finora permettono di costruire piani che vengono poi eseguiti da un agente "**esecutore**".

Possibili problemi in esecuzione:

- Esecuzione di un'azione in condizioni diverse da quelle previste dalle sue precondizioni
  - conoscenza incompleta o non corretta
  - condizioni inaspettate
  - trasformazioni del mondo per cause esterne al piano
- Effetti delle azioni diversi da quelli previsti
  - errori dell'esecutore
  - effetti non deteministici, impredicibili

Occorre che l'esecutore sia in grado di *percepire* i cambiamenti e *agire* di conseguenza

Esecuzione

Alcuni pianificatori fanno l'ipotesi di *mondo aperto* (**Open World Assumption**) ossia considerano l'informazione non presente nella rappresentazione dello stato come *non nota* e *non falsa* diversamente dai pianificatori che lavorano nell'ipotesi di mondo chiuso (*Closed World Assumption*)

Alcune informazioni non note possono essere cercate tramite azioni di "raccolta di informazioni" (**azioni di sensing**) aggiunte al piano.

Le ***azioni di sensing*** sono modellate come le azioni causali.

Le precondizioni rappresentano le condizioni che devono essere vere affinché una certa osservazione possa essere effettuata, le postcondizioni rappresentano il risultato dell'osservazione.

Due possibili approcci:

- Planning Condizionale
- Integrazione fra Pianificazione ed Esecuzione

Planning Condizionale

Un **pianificatore condizionale** è un algoritmo di ricerca che genera diversi piani alternativi per ciascuna fonte di incertezza del piano.

Un **piano condizionale** è quindi costituito da:

- Azioni causali,
- Azioni di sensing per le verifiche
- Diversi piani parziali alternativi di cui uno solo verrà eseguito a seconda dei risultati delle verifiche.

Problemi dei pianificatori condizionali

Esplosione computazionale dell'albero di ricerca nel caso di problemi con un numero di contesti alternativi elevato.

Un piano completo che tenga conto di ogni possibile contingenza potrebbe richiedere molta memoria.

Non sempre è possibile conoscere a priori tutti i contesti alternativi

Spesso si combina l'approccio condizionale con l'**approccio probabilistico** dove si assegnano dei valori di probabilità alle varie alternative e si pianifica solo per quelle più probabili.

Planning Reattivo (Brooks - 1986)

Abbiamo descritto fino qui un processo di pianificazione deliberativo nel quale prima di eseguire una qualunque azione viene costruito l'intero piano.

I pianificatori **reattivi** sono algoritmi di pianificazione on-line, capaci di interagire con il sistema in modo da affrontare il problema della dinamicità e del non determinismo dell'ambiente:

- osservano il mondo in fase di pianificazione per l'acquisizione di informazione non nota
- monitorano l'esecuzione delle azioni e ne verificano gli effetti
- spesso alternano il processo di pianificazione a quello di esecuzione reagendo ai cambiamenti di stato

Discendono dai *sistemi reattivi "puri"* che evitano del tutto la pianificazione ed utilizzano semplicemente la situazione osservabile come uno stimolo per reagire.

Sistemi reattivi puri

Hanno accesso ad una base di conoscenza che descrive quali azioni devono essere eseguite ed in quali circostanze. Scelgono le azioni una alla volta, senza anticipare e selezionare un'intera sequenza di azioni prima di cominciare.

Esempio -Termostato utilizza le semplici regole:
1) Se la temperatura T della stanza è K gradi sopra la soglia T0, accendi il condizionatore;
2) Se la temperatura della stanza è K gradi sotto T0, spegni il condizionatore.

Vantaggi:

- Sono capaci di interagire con il sistema reale. Essi operano in modo robusto in domini per i quali è difficile fornire modelli completi ed accurati.
- Non usano modelli, ma solo l'immediata percezione del mondo e per questo sono anche estremamente veloci nella risposta.

Svantaggio:

Il loro comportamento in domini che richiedono di ragionare e deliberare in modo significativo è deludente (es. scacchi) in quanto non sono in grado di generare autonomamente piani.

Pianificatori ibridi

I moderni pianificatori reattivi detti **ibridi** integrano **approccio generativo** e **approccio reattivo** al fine di sfruttare le capacità computazionali del primo e la capacità di interagire con il sistema del secondo affrontando così il problema dell'esecuzione.

Un pianificatore **ibrido:**

- genera un piano per raggiungere il goal
- verifica le precondizioni dell'azione che sta per eseguire e gli effetti dell'azione appena eseguita
- smonta gli effetti di un'azione (importanza della reversibilità delle azioni) e ripianifica in caso di fallimenti
- corregge i piani se avvengono azioni esterne impreviste.