Pianificazione

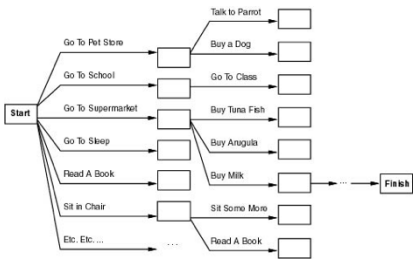
Maria Simi, 2010-2011

Il filo conduttore [AIMA]

- *Agente per il problem solving*: agente che decide la sequenza di azioni prima di agire (ambiente *accessibile*)
- *Agente basato su conoscenza*: mantiene una rappresentazione esplicita degli stati e dell'effetto delle azioni (ambiente complesso e parzialmente accessibile)
- *Agente pianificatore*: è un agente che pianifica utilizzando conoscenza esplicita delle azioni e del loro effetto e quindi è anche un agente KB

Un esempio

Goal: Possedere del latte, delle banane e un trapano



Pianificazione vs problem solving

- Un *PS agent*
  - *Azioni* : capacità di generare i successori di uno stato
  - *Obiettivi*: goal test (la rappresentazione del goal è implicita)
  - *Pianificazione*: ottenere, mediante un processo di ricerca euristica, una sequenza di azioni che portano dallo stato iniziale allo stato goal
- Un agente *pianificatore*
  - ha una rappresentazione esplicita dell'obiettivo, delle azioni e loro effetto
  - può decomporre il goal in sotto-goal indipendenti
  - ha libertà nella costruzione del piano
- Un agente pianificatore può essere più efficiente

Di cosa parleremo

- Pianificazione come dimostrazione di teoremi
  - Il calcolo di situazioni
  - Il *frame problem*
  - Problemi di rappresentazione collegati e inefficienza
- Pianificazione con algoritmi specializzati
  - Rappresentazione delle azioni in PDDL (Planning Domain Definition Language)
  - Pianificazione come ricerca in uno spazio di stati
    - Pianificazione a progressio e regressione
    - Grafi di pianificazione
  - Pianificazione come ricerca in uno spazio di piani

Il caso proposizionale

- Problemi di rappresentazione nel mondo del Wumpus
  - Proprietà immutabili (atemporali)

    $B_{1,1} \Leftrightarrow P_{1,2} \vee P_{2,1}$
  - Proprietà dipendenti dal tempo (fluenti)

    $L^0_{1,1}$ $HaFreccia^0$ $RivoltoEst^0$ $Brezza^2$ $Avanti^0$
  - Descrivere come cambia il mondo:

    $L^0_{1,1} \wedge RivoltoEst^0 \wedge Avanti^0 \Rightarrow (L^1_{2,1} \wedge \neg L^1_{1,1})$

Pianificazione in Prop

- Soluzione ibrida
  - La formalizzazione logica usata per inferire lo stato nel mondo in un certo istante (es. se locazione OK)
  - La KB viene aggiornata ad ogni azione
- Impostare come problema SAT
  - Init^0 tutto ciò che è vero al tempo 0
  - tutte le transizioni: *transizione^i per* $i \leq t$
  - l'asserzione goal: HaOro^t ∧ Uscito^t
  - se trova un modello abbiamo il piano … o quasi

SATPLAN

- Non sappiamo quanto è lungo il piano: SATPLAN prova con valori crescenti di *t*
- Bisogna assicurarsi anche di assiomatizzare …
  - il fatto che l'agente non può essere in due locazioni diverse o abbia due orientamenti diversi allo stesso tempo
  - criteri affinché le azioni siano possibili
  - mutua esclusione di azioni: per evitare che vengano svolte due azioni allo stesso tempo (almeno quando esse sono incompatibili) $\neg A^t_i \vee \neg A^t_j$

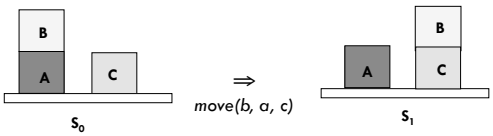
Il calcolo di situazioni in FOL

- Una particolare ontologia che tratta di azioni e cambiamento:
  - Situazioni: fotografie del mondo in un certo istante, stato risultante da una azione (vs istanti di tempo)
  - Proprietà dipendenti dalla situazione (fluenti)
  - Azioni
  - Cambiamento per effetto di azioni
- Il calcolo di situazioni è una formalizzazione in FOL di questa ontologia [Mc Carthy, 69]

Calcolo di situazioni nel mondo dei blocchi

- Situazioni: *s*, s_0, s_1, s_2 … e *funzioni che denotano situazioni*
- Proprietà o funzioni che variano da una situazione all'altra (fluenti): *On*, *Table*, *Clear* … *Hat*
  - *On*(*a*, *b*) diventa *On*(*a*, *b*, s)
  - *Hat*(a) diventa *Hat*(a, s)
  - Le proprietà immutabili vengono rappresentate come prima
- Azioni: sono modellate come funzioni (termini)
  - *move*(*a*, *b*, *c*) è una funzione che denota l'azione di spostare il blocco A da B a C (istanza dell'operatore *generico move*)
- Sequenze di azioni

Situazioni risultanti dalle azioni



- Effetto delle azioni: funzione *Risultato*: $A \times S \rightarrow S$
  - *Risultato*(*move*(*a*, *b*, c), s_0) denota la situazione risultante dall'azione *move*(*a*, *b*, c) compiuta in s_0
- Effetto di sequenze di azioni: *RisultatoSeq*: $[A^*] \times S \rightarrow S$
  - RisultatoSeq([ ], *s*) = *s*
  - *RisultatoSeq*([*a* | *seq*], *s*) = *RisultatoSeq*(*seq*, *Risultato*(*a*, *s*))

Assiomi per l'effetto delle azioni

- Sono del tipo: *precondizioni* ⇒ *effetto*

  $\forall x\ \forall y\ \forall z\ \forall s\ On(x, y, s) \wedge Clear(x, s) \wedge Clear(z, s) \wedge x \neq z \Rightarrow$

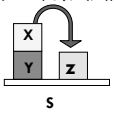
  $On(x, z, Risultato(Move(x, y, z), s)) \wedge Clear(y, Risultato(Move(x, y, z), s))$
- Altri effetti collaterali, ad esempio

  $\neg\ Clear(z, Risultato(Move(x, y, z), s))$

  sono ricavabili da *vincoli di stato* del tipo

  $\forall x\ \forall s\ Clear(x, s) \Leftrightarrow \neg \exists y\ On(y, x, s)$

  "Un blocco è libero sse non c'è niente sopra"



- Ma non basta! Nel nuovo stato …

  y è o no sul tavolo? *x* è o no libero?

C'è un problema ...

- Nello stato risultante non si sa niente delle cose che *non cambiano*, che erano vere (o false) prima dell'azione e che rimangono vere (o false) perché non influenzate.

  E queste sono la maggioranza!
- Esempi

1. Se *Table*(a, s) non si deriva *Table*(a, *Risultato*(*move*(b, a, c), s)) eppure si sposta solo b!
2. Se l'agente si sposta nel mondo del Wumpus la sua locazione cambia (effetto primario) ma nel nuovo stato non so se il Wumpus è ancora vivo, se l'agente ha ancora la sua freccia …

Il *frame problem*

- Il problema del *contorno* (*frame problem*): uno dei problemi più classici dell'AI [McCarthy-Hayes, 1969]
- Analogia col mondo dell'animazione: il *frame problem* è il problema di distinguere il *background* (che rimane fisso) dal *foreground* (ciò che cambia).
- Dobbiamo introdurre tutta una serie di assiomi solo per dire ciò che non cambia

Assiomi *frame*

- *Clear* rispetto a *move*:

  $Clear(x, s) \wedge x \neq w \Rightarrow Clear(x, Risultato(Move(y, z, w), s))$

  Un blocco rimane libero se l'azione non ci sposta qualcosa sopra

  $\neg Clear(x, s) \wedge x \neq z \Rightarrow \neg Clear(x, Risultato(Move(y, z, w), s))$

  Un blocco rimane occupato a meno che non sia liberato dall'azione
- In maniera analoga per ogni coppia fluente-azione

  F fluenti e *A* azioni ⇒ O(*AF*) assiomi

  Troppi!!!
- Problema di rappresentazione del *frame*

Assioma di stato successore

- Si possono anche scrivere in maniera più compatta in un modo che combina *effetto* e *frame* axiom, tramite un assioma di *stato-successore*:

  Precondizioni ⇒ *Azione possibile*

  Azione possibile ⇒

  [*Fluente vero dopo* ⇔ [*un'azione possibile l'ha reso vero* oppure

  era vero e nessun azione possibile l'ha reso falso]]

  Esempio:

  $Clear(x, Risultato(a, s)) \Leftrightarrow$

  $[(a=Move(y, x, z)) \vee (a=Unstack(y, x)) \vee (a=Noop)] \vee$

  $[Clear(x, s) \wedge (a \neq Move(z, w, x)) \wedge (a \neq Stack(z,x))]$
- Meglio!: due assiomi per ogni fluente … ma un problema più sostanziale è la complessità computazionale

Approccio non-monotono al *frame* problem

- *L'idea*: implementare una nozione di *persistenza:* in assenza di informazione in contrario (per *default*) le cose rimangono come erano.
- Un unico *frame axiom* con una rappresentazione reificata (di *meta-livello*):

  $\forall p, a, s\ True(p, s) \wedge \neg Ab(p, a, s) \Rightarrow True(p, Do(a, s))$
  - *Ab* sta per '*Abnormal*'
  - $\neg Ab(p, a, s)$ vale a meno che $Ab(p, a, s)$ non sia derivabile
- La teoria dovrà avere gli assiomi necessari per derivare tutte le anormalità, ad esempio:

  $Ab(Clear(x), Do(Stack(y, x), s))$

Problemi correlati

- Il problema della *qualificazione:* in casi reali non è semplice elencare tutte le precondizioni rilevanti:

  $Clear(x) \wedge Clear(y) \wedge Clear(z) \wedge y \neq z \wedge \neg Pesante(x) \wedge \neg Incollato(x) \wedge \neg Bollente(x) \wedge \ldots \Rightarrow$ *possibile move*(x, y, z)
- Il problema della *ramificazione*: quali delle proprietà derivate persistono e quali no?
  - Sappiamo che gli oggetti appoggiati su un tavolo sono nella stanza in cui si trova il tavolo
  - Se si sposta il tavolo da una stanza all'altra anche gli oggetti sopra il tavolo devono cambiare locazione ma i *frame axiom* potrebbero far persistere la vecchia locazione

Pianificazione come dimostrazione di teoremi

- Per generare una sequenza di azioni *p* per raggiungere l'obiettivo G, si cerca di dimostrare che

  $\exists p$ G(RisultatoSeq(p, s_0))
- Il pianificatore di Green usa un dimostratore di teoremi basato sulla refutazione
- Complesso per varie sorgenti di non determinismo:
  - lunghezza incognita della sequenza delle azioni
  - *frame axiom* che deducono molte cose irrilevanti
  - strategie *ad hoc* necessarie, ma fanno perdere la completezza
- Un theorem prover generale è *inefficiente* e *semidecibile*
- Nessuna garanzia sull'efficienza del piano generato

Pianificatori specializzati

- Un linguaggio specializzato per la pianificazione (PDDL)
- Rappresentazione specializzata per gli stati:
  - un insieme di formule atomiche *ground* positive (*fluenti*), prive di funzioni
  - tutto ciò che non è detto viene considerato falso (assunzione di mondo chiuso) e costanti diverse corrispondono a oggetti diversi (assunzione di nome unico)

  Es. On(a, b), Clear(a), Table(b)

  NOTA: niente variabili, niente negazioni, niente vincoli di stato
- Rappresentazione del goal
  - congiunzione di formule atomiche ground positive

    Es. On(b, a) ∧ On(c, b)

Rappresentazione per le azioni

- Azioni: espresse mediante schemi di azione con variabili:

  Stack(x, y):
  Precondizioni: Clear(x), Table(x), Clear(y)
  Effetti: On(x, y), ¬Table(x), ¬Clear(y)
  [Add-list: On(x, y) *effetto positivo*
  Delete-list: Table(x), Clear(y)] *effetto negativo*

  Unstack(x, y):
  Precondizioni: Clear(x), On(x, y)
  Effetti: Table(x), Clear(y), ¬On(x, y)
  [Add-list: Table(x), Clear(y) *effetto positivo*
  Delete-list: On(x, y)] *effetto negativo*

Rappresentazione per le azioni

- Tutte le variabili nella precondizione e nell'effetto devono apparire come parametri dell'azione
- Le precondizioni possono contenere letterali positivi e negativi, soddisfatti se i letterali non sono nello stato
- Nota: *i letterali non menzionati nell'effetto si intendono non modificati*
  - Conseguenza 1: il *frame problem* non è più un problema
  - Conseguenza 2: vanno menzionati esplicitamente tutti i cambiamenti; anche quelli che sarebbero "derivabili" in un linguaggio che consentisse di esprimere vincoli di stato

Pianificazione con PDDL

- Decidibilità: garantita in pianificazione classica (con PDDL); il numero di stati è finito se non ci sono le funzioni.
- Complessità del problema di decidere se esiste un piano (PlanSAT): NP. Senza precondizioni negative è nella classe P.
- Complessità di trovare un piano di lunghezza k o inferiore (bounded PlanSAT): NP-completo
- Ma esistono euristiche efficaci.

Pianificazione come ricerca

- Lo spazio di ricerca è definito da che cosa sono gli stati e gli operatori:
  - Pianificazione 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 azioni come modifiche dello stato
    - In avanti (a progressione)
    - All' indietro (a regressione)
  - Pianificazione nello spazio dei piani: stati come piani parziali e operatori di raffinamento e completamento di piani

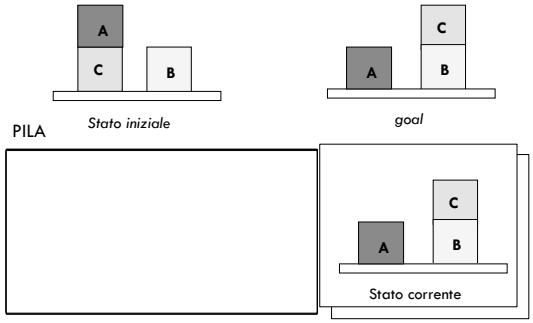
Pianificazione all'indietro

- Si cerca un'azione a tale che uno dei suoi effetti contribuisca all'obiettivo g. Lo stato precedente è:

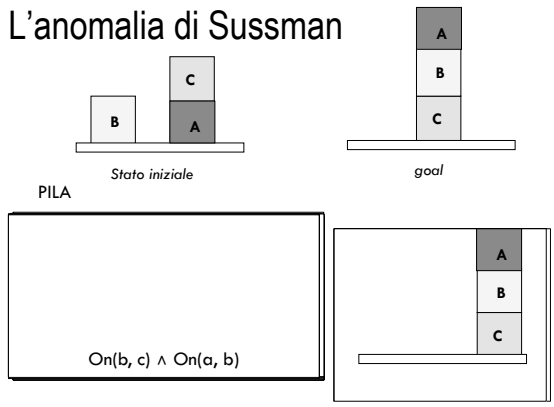
  g' = (g – ADD(a)) U Precondizioni(a)

  anche parzialmente istanziate (con variabili)
- Un esempio storico è STRIPS: un pianificatore a regressione nello spazio degli stati
  - Utilizza una pila in cui all'inizio viene messo il goal; ha una nozione di stato corrente, all'inizio lo stato iniziale
  - Ad ogni passo, per risolvere un goal, cerca di utilizzare un operatore che rende vero il goal e di renderne vere le pre-condizioni (che diventano dei sotto-goal)

Esempio di funzionamento di STRIPS



L'anomalia di Sussman



L'anomalia di Sussman

- Il piano generato è:

  [Unstack(c), Stack(a, b), Unstack(a),
  Stack(b, c), Stack(a ,b)]
- Un altro piano generabile è:

  [Stack(b, c), Unstack(b), Unstack(c),
  Stack(a, b), Unstack(a), Stack(b, c), Stack(a, b)]
- Il piano ideale non ottenibile con pianificazione "lineare" (con ipotesi di indipendenza)

  [Unstack(c), Stack(b, c), Stack(a, b)]

Ricerca in avanti

- Apparentemente più inefficiente
  - si tende ad esplorare stati irrilevanti per la soluzione
  - le azioni da esplorare possono essere molte
- È importante usare euristiche efficienti: principalmente dipendenti dal problema ma anche di utilità generale

Euristiche per la pianificazione

- Euristiche ammissibili: cercare di stimare quante azioni servono a soddisfare i goal in problemi *rilassati* (meno vincolati). In questo siamo aiutati dalla rappresentazione *fattorizzata*
- Ignorando le precondizioni abbiamo un problema rilassato in cui tutte le azioni sono applicabili: possiamo contare il numero di azioni richieste per soddisfare l' obiettivo:
  1. Pessimista: ci sono azioni che possono risolvere più obiettivi (vanno considerati solo alcuni effetti);
  2. Ottimista: trascura interazioni negative;
- Ignorare solo alcune pre-condizioni:
  - Abbiamo già visto con il gioco dell'otto …

Euristiche per la pianificazione

- Ignorare le liste di eliminazioni fa sì che si possa procedere in maniera monotòna senza considerare effetti negativi
  - Efficace in pianificatori a progressione
  - Si può provare con hill-climbing
- Lavorare con astrazioni degli stati (ignorando alcuni fluenti)
- Assumere sotto-obiettivi indipendenti e costruire piani separati:
  - max costi è un'euristica ammissibile
  - somma dei costi non è ammissibile in generale ma lo è se i sotto-obiettivi sono davvero indipendenti

Grafi di pianificazione

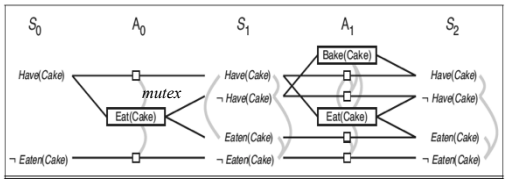
Possono essere utilizzati per trovare una euristica e sono alla base dell'algortimo GRAPHPLAN

Init(Have(Cake))

Obiettivo: Have(Cake), Eaten(Cake)

Azione: Eat(Cake)
Precond: Have(Cake)
Effetti: ¬Have(Cake), Eaten(Cake)

Azione: Cook(Cake)
Precond: ¬Have(Cake)
Effetti: Have(Cake)



Ricavare un'euristica dal grafo

- Se il goal *g* non compare in nessun livello possiamo essere sicuri che è irraggiungibile. Altrimenti il grafo può dare una stima di quanti passi servono
- *Costo di livello di* g_i: il primo livello in cui appare g_i considerando però grafi serializzati: grafi in cui si esegue una sola azione alla volta (tutte le coppie sono *mutex*)
- Stima di una congiunzione di goal:
  - max dei costi di livello, poco accurata
  - somma dei livelli, accurata per problemi indipendenti o quasi
  - livello di insieme: livello in cui tutti i letterali del goal congiunto appaiono non in mutex

GraphPlan

- Costruisce incrementalmente il grafo di pianificazione espandendo per livelli fino a quando tutti i sotto-goal congiunti compaiono non in *mutex*, poi esegue *Estrai soluzione*.
- Se *Estrai soluzione* fallisce continua con l'espansione.
- *Estrai soluzione* può essere risolto come:
  - Un CSP booleano in cui le variabili sono le azioni del piano (*true*, *false*) e i vincoli sono i mutex, i goal e le precondizioni
  - Un problema di ricerca all'indietro.

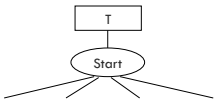
Pianificazione nello spazio dei piani

- Piani parzialmente ordinati
  - Principio del *minimo impegno*: non ordinare i passi se non necessario
  - I passi del piano sono parzialmente ordinati.
  - *Linearizzazione* di un piano: imporre un ordine totale a un piano parzialmente ordinato
- Piani parzialmente istanziati
  - Principio del *minimo impegno*: lasciare le variabili non istanziate finché non è necessario istanziarle
  - Un piano senza variabili si dice *totalmente istanziato*

Partial Order Planning (POP)

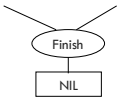
- Si parte da un piano vuoto
- Ad ogni passo si utilizzano operatori
  - di aggiunta di azioni per soddisfare precondizioni
  - di istanziazione di variabili
  - di ordinamento tra passi
- Fino ad arrivare a un piano *completo* e *consistente* (tutte le precondizioni soddisfatte e vincoli di ordinamento senza cicli)
- Ogni sua linearizzazione è una soluzione

Azioni Start e Finish



Fatti veri nello stato iniziale

Fatti che devono essere veri nello stato goal



Rappresentazioni per i piani

I piani sono:

- Un insiemi di azioni, tra cui Start e Finish.
- Un insieme di precondizioni "aperte"
- Con vincoli di due tipi tra le azioni
  - Relazioni di ordinamento: $S_1 < S_2$ (S_1 prima di S_2)
  - Link causali: $S_1 \xrightarrow{cond} S_2$ (S_1 realizza *cond* per S_2)

  Nota: Se $S_1 \xrightarrow{cond} S_2$ allora $S_1 < S_2$ ma non viceversa
- Esempio:

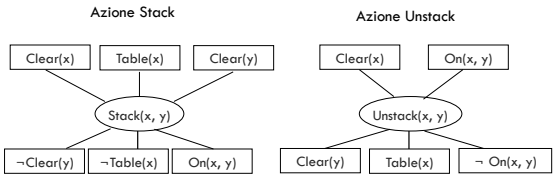
  {Unstack(a, b), Unstack(c, d), Stack(b, a), Stack(d, c), Start, Finish}

  Unstack(a, b) < Stack(b, a) Unstack(a, b) $\xrightarrow{Clear(b)}$ Stack(b, a)

  Unstack(c, d) < Stack(d, c) Unstack(c, d) $\xrightarrow{Clear(d)}$ Stack(d, c)

Rappresentazione per le azioni

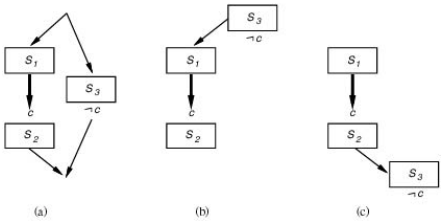
- Azioni come in STRIPS (qui visualizzate a grafo)



POP funzionamento

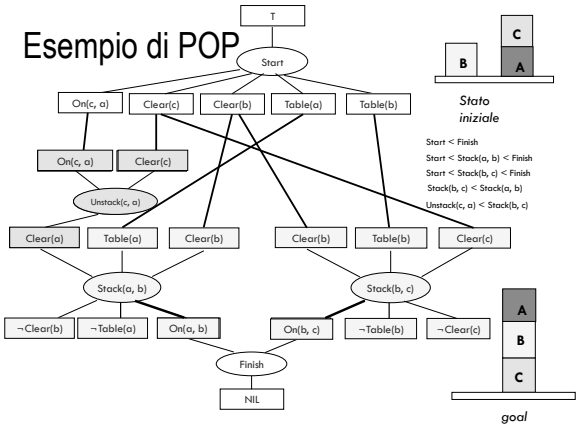
- Si parte dal piano vuoto con Start e Finish.
- Ad ogni passo:
  - Si sceglie arbitrariamente un passo B e una sua precondizione aperta *p* e si genera un piano successore per ogni azione A (vecchia o nuova) che ha tra gli effetti *p*
  - Scelta A si ristabilisce la consistenza come segue:
    - Si aggiunge al piano $A < B$ e $A \xrightarrow{p} B$
    - Eventuali azioni C che hanno come effetto $\neg p$, sono potenziali *conflitti* (o *minacce*) e vanno anticipati o ritardati imponendo $C < A$ o $B < C$. Questo passo può anche fallire.
- Ci si ferma quando la lista delle precondizioni aperte è vuoto.

Rimozione delle minacce



(a) S_3 minaccia la precondizione c di S_2, attuata da S_1
(b) Risoluzione della minaccia per *demozione*
(c) Risoluzione della minaccia per *promozione*

Esempio di POP



POP: conclusione

- Abbiamo ottenuto un piano completo e consistente
- Ogni linearizzazione è una soluzione
- In questo caso una sola:

  [unstack(c, a), stack(b, c), stack(a, b)]
- POP è corretto e completo (ogni piano calcolato è una soluzione e se un piano esiste viene trovato)

Possibili euristiche per POP

- Tra le precondizioni aperte scegliere quella che ha meno modi per essere soddisfatta
- Analogo alla variabile più vincolata nei CSP
- Si riconoscono prima i fallimenti.

Pianificazione in ambienti reali

- Gli ambienti reali sono:
  - Complessi
  - Non accessibili (incompletezza)
  - Non deterministici (non correttezza)
- Evoluzioni delle tecniche di pianificazione:
  - Pianificazione *gerarchica* per dominare la complessità
  - Pianificazione condizionale (o *con contingenza*)
  - Monitoraggio dell'esecuzione di un piano
  - Pianificazione "situata" (integrazione di pianificazione ed esecuzione)