

## Planejamento (*planning*)

Ana Lúcia C. Bazzan  
UFRGS

INF 5004  
2002

## Roteiro

- Introdução e motivação
- Histórico
- Paradigmas clássicos
  - Cálculo situacional
  - STRIPS
- Paradigma não linear: ordem parcial
- Decomposição hierárquica

Planejamento (*planning*)

©2002 Ana Lúcia C. Bazzan

## Introdução

- tarefa
  - analisar a situação em que um agente / sistema se encontra
  - desenvolver uma tática para atingir um objetivo (série de ações)
- contextualização dentro da Inteligência Artificial
  - classificação (RNA, árvores de decisão, diagnóstico, etc.)
  - síntese (planejamento do tipo *general purpose planner*)
  - aprendizado de máquina (simbólico)

complexidade ↓

Planejamento (*planning*)

©2002 Ana Lúcia C. Bazzan

## Introdução

- planejamento é um problema de síntese
  - desenvolvimento de um objeto mental sob forma de plano
  - planejamento pode ser um problema de classificação (mas não é eficiente)
- representação do conhecimento
  - lógica de primeira ordem
  - cálculo situacional
- planejamento como prova de teorema (construção da prova)
  - provar que é possível fazer um bolo envolve provar: comprar ingredientes, obter batedeira, forno

Planejamento (*planning*)

©2002 Ana Lúcia C. Bazzan

## Introdução

- **planejar é muito difícil!**
- mesmo o **problema mais simples de planejamento**, o de calcular como um agente se pode mover do estado corrente do mundo para o estado que satisfaz as suas preferências, é **intratável** no caso geral
- **simplificações** permitem serializar o problema: primeiro formula-se um plano, e só depois se passa à execução

Planejamento (*planning*)

©2002 Ana Lúcia C. Bazzan

## Introdução

- introdução de **simplificações** :
  - um agente conhece tudo o que é relevante para resolver o seu problema, e como as suas ações podem mudar o mundo de um estado para o outro;
  - supõe-se que o agente controla o mundo, (alterações ocorridas só são consequência das suas ações);
  - os estados preferidos do agente são constantes ao longo do episódio de planejamento, isto é não altera os seus objetivos no meio do processo ou quando executa o plano

Planejamento (*planning*)

©2002 Ana Lúcia C. Bazzan

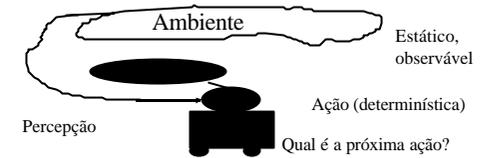
## Introdução

- Para o planejamento **ser efetivo**, o ambiente no qual o plano será executado deve ser **previsível**, mas **não completamente determinístico**!
- O planejamento não será **efetivo** em domínios **caóticos**, e aí um agente só poderá reagir aos eventos!
- O planejamento exige uma **busca** num enorme espaço de planos possíveis, e assim o **controle** da busca é essencial!

## Introdução

- **Duas questões importantes:**
  - 1) passos seguintes do plano não devem anular resultados obtidos em passos anteriores, e
  - 2) as pré-condições para um determinado passo têm que se verificar no momento em que este é executado
- aspectos exigem **grande poder computacional**
- **Situações dinâmicas** apresentam desafios adicionais!

## Planejamento e Agentes



## Planejamento e Agentes

- Os **agentes** podem não apenas selecionar as ações com base apenas nas suas percepções ou no **modelo interno** do estado corrente
- **Agentes que Resolvem Problemas**
  - planejam para a frente (para considerarem as consequências das sequências das ações antes de atuar).
- **Agentes Baseados em Conhecimento**
  - selecionam as ações com base nas representações lógicas, explícitas, do estado corrente e dos efeitos das ações.

## Introdução

- **Resolver problemas** é o processo de desenvolver uma sequência de **ações** para atingir um objetivo.
- Entre as várias **técnicas** de resolver problemas destaca-se o **planejamento**, uma parte fundamental do comportamento inteligente dedicada à decisão sobre um curso de ações antes de agir.
- **Resolução de problemas** como:
  - busca (controle/selecção),
  - decisão baseado em regras (produções),
  - **planejamento (operadores e ações)**.

## Introdução

- **planejar no contexto** mais geral de raciocinar e **decidir sobre as ações a efectuar**
- **planejar**: Agregar ações individuais em sequências (ordenadas, parciais) para realizar objetivos desejados.
- **PLANO**: é todo o processo hierárquico de um organismo que pode controlar a ordem pela qual uma sequência de operações é realizada.

## Terminologia

- (Genesereth e Nilsson, 1987), (Sacerdoti, 1985):
  - **Linear**: totalmente ordenado, não entrelaçado ("interleaved").
    - Exemplos: HACKER, WARPLAN, INTERPLAN.
  - **Não-Linear**: parcialmente ordenado (POP).
    - Exemplos: NOAH, NONLIN, TWEAK.

## Introdução

- **planejar** para dirigir os **algoritmos de busca**, e assim melhorar drasticamente o desempenho dos algoritmos.
- **Algoritmos de planejamento**: demonstradores de teoremas com fins específicos que raciocinam eficientemente com os axiomas que descrevem ações.
- **planejamento** como:
  - demonstração de teoremas
  - busca
  - satisfação ou otimização de restrições
  - processo de tomada de decisão

## Introdução

- A Essência do planejamento
  - Construir (gerar) planos para alcançar objetivos:  
AGORA ??? FUTURO
  - Como podemos alcançar o futuro, dado aquilo que é verdadeiro agora, isto é como podemos mudar de um modelo para outro através de uma cadeia de transformações?
  - E, o que é necessário quando o ambiente é dinâmico, incerto e cheio de outros agentes (domínios complexos e reais)?
  - A geração de planos tem de ocorrer em paralelo com a sua execução!

## Introdução

- O que é que o planejamento envolve?
  - Representação do conhecimento (ações),
  - busca,
  - Raciocínio temporal,
  - e, ...

## Introdução

- O que é que o planejamento envolve (mais)?
  - Um ambiente externo (ações de outros agentes, eventos!),
  - Garantia de realização de objetivos,
  - Execução de planos,
  - Supervisão,
  - Reparação de planos (falhas),
  - Gestão de planos,
  - Modelagem do tempo.

## Introdução

- **Benefícios do planejamento**:
  - reduzir a busca,
  - resolver conflitos entre objetivos, e
  - fornecer uma base para evitar erros.
- **Como se pode melhorar o planejamento?**
  - Através da maior:
    - Flexibilidade do controle,
    - Integração de: Geração de planos, Execução, e Reparação.

## Histórico

- Do planejamento como **atividade de prova** de teoremas (1969) para o planejamento como **busca** (1970-1990): ineficiência dos demonstradores em LPO e as dificuldades de enfrentar o problema da persistência em LPO.
- A **primeira direção** foi a busca no espaço de estados (progressão, regressão, MEA): (STRIPS, 1971), (PRODIGY, 1987). Foi considerada inflexível em alguns casos.

## Histórico

- A **segunda direção** foi a busca no espaço de planos (ordem total, ordem parcial, proteções, MTC): (INTERPLAN, 1975), (TWEAK, 1987), (SNLP, 1991), (UCPOP, 1992).
- A **terceira direção**, derivada das duas anteriores, foi a busca no espaço das redes de tarefas (planejamento hierárquico, redução de tarefas não primitivas): (NOAH, 1975), (NONLIN, 1977), (SIPE, 1985), (O-PLAN, 1986).

## Histórico

- A **quarta direção**, planejamento como satisfação (de restrições), derivou da segunda e tornou-se possível por causa da disponibilidade de algoritmos de satisfação de restrições com alto desempenho: (GRAPHPLAN, 1995), (SATPLAN, 1996).

## Planejamento Clássico

- **Cálculo Situacional**
  - Ferramenta de fins gerais para raciocinar acerca do tempo e da mudança, i.e. das ações.
  - Permitiu a descoberta de vários problemas chave, e, em particular, o problema do enquadramento ou da persistência, (McCarthy, 1958; McCarthy e Hayes, 1969)

## Cálculo Situacional

- Ideia: as ações transformam os estados;
- Aumenta a LPO para suportar o raciocínio das ações no tempo;
- Adiciona variáveis situacionais para especificar o tempo;
- Modo de descrever a mudança em LPO;
- O mundo é uma sequência de situações (instantâneos do estado do mundo durante um intervalo em que nada muda) ligadas por ações;
- Formulação do planejamento como um **problema de inferência lógica**.

## Cálculo Situacional

- Um problema de planejamento é **representado** em Cálculo Situacional por frases lógicas wffs que descrevem as suas três partes principais, a saber:
  - Estado Inicial
  - Estado objetivo (Final)
  - Operadores
- **Formalismo** para expressar objetivos e planos; pode-se usar o procedimento de inferência bem definido da LPO para encontrar os planos

## Cálculo Situacional

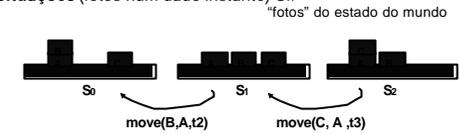
- **Problema:** Encontrar um conjunto de ações para alcançar um estado descrito por um objeto
- **Técnica:** Usar o aparelho da LPO para raciocinar acerca dos estados e das ações.
  - Representar o conhecimento sobre estados e ações como fórmulas de LPO, e
  - Usar o sistema de dedução para fazer perguntas.
  - A resposta (Ans) às perguntas constitui um **Plano** para atingir o estado desejado.

## Cálculo Situacional

- **LPO:** busca num espaço de modelos dos estados do mundo.
- **Cálculo Situacional:** busca num espaço de expressões lógicas.
- **STRIPS:** busca num espaço de descrições de estado (e os operadores são usados para mudar descrições de estado).

## Cálculo Situacional

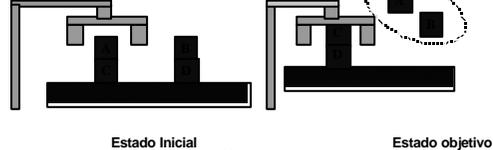
- (McCarthy e Hayes, 1969; Green, 1969)
- O mundo visto como uma sequência de **estados** ou **situações** (fotos num dado instante)  $S_i$ :



- **Nova situação do mundo (mudança):** gerada a partir de situação anterior, pela ocorrência de uma ação ou evento.

## Exemplo

- **Mundo dos Blocos e robô Shakey**



- **Operadores**  
**Unstack(x,y)**  
**Stack(x,y)**  
**Pickup(x)**  
**Putdown(x)**

## Mundo dos Blocos

- descrição em lógica de primeira ordem (LPO)
- predicados:
  - $loc(b, l)$  ou  $on(b, l)$ : bloco  $b$  está localizado sobre  $l$
  - $move(b, l)$ : ação de mover  $b$  para cima de  $l$  (falha se  $b$  ou  $l$  não estiverem livres)
  - $move(b, l) \rightarrow loc(b, l)$ : resultado da ação de mover é a nova localização
  - qual interpretação de  $move(b, l_1) \wedge move(b, l_2) ???$
- fecho situacional (temporal): não se pode falar em resultado(s) da ação sem descrever em que situação a ação ocorreu

## Mundo dos Blocos

- representação melhor:
  - $move(b, l, s) \rightarrow loc(b, l, result(move(b, l), s))$  onde  $result(a, s)$  é a situação resultante após se realizar a ação  $a$  na situação  $s$
- outros predicados:
  - $clear(l, s)$ : objeto  $l$  está livre (nada sobre ele) na situação  $s$
- pré-condições:
  - $clear(b, s) \wedge clear(l, s) \rightarrow loc(b, l, result(move(b, l), s))$

## Mundo dos Blocos

- outra formulação (reificação)
  - holds (clear (b), s)  $\wedge$  holds (clear (l), s)  $\rightarrow$  holds (loc (b, l), result (move (b, l), s))
- exemplo
  - loc (C,m)
  - loc (A,C)
  - loc (D,m)
  - clear (B)  $\wedge$  ...

## Problemas

- Problema do enquadramento (*frame*) ou persistência
  - dificuldade de expressar o que não muda no ambiente
  - como expressar o mundo depois da ação (por exemplo mover C para cima de D)? (o que acontece com A, por exemplo)
  - é preciso uma representação para o conhecimento que permanece inalterado de uma situação  $s_1$  para outra  $s_2$

## Problemas

- problema da ramificação
  - dificuldade de expressar o que muda
  - é preciso representar que D não está mais livre e que C não está mais sobre m
  - conhecimento de senso comum (*common knowledge*) não ajuda sempre

## Problemas

- problema da qualificação
  - existe uma série de pré-condições para uma ação, muitas não mencionadas, desprezadas ou improváveis (por ex. b  $\neq$  l)
  - Quais as condições para que uma dada ação garantidamente se possa executar? Imaginemos que queremos ser mais precisos prevendo tudo para que o objeto a mover não seja muito pesado.
  - Temos de incluir nas pré-condições: teste de peso, teste se não está colado, teste se braço não quebrado
  - uma ação deve falhar caso envolva a violação de uma restrição do domínio (por exemplo pesos de b e l)

## Exercício

- formule um plano para sair de carro de casa pela manhã

## Planejamento Clássico

- STRIPS (STanford Research Inst. Problem Solver)
  - (Fikes e Nilsson, 1971)
  - demonstração de teoremas à resolução de problemas.
  - análise de meios-fins (*means-end analysis*)
  - procedural
  - estrutura de dados: pré-condições, *add list*, *delete list*
    - pré-condição: precisa ser explícita (qualificação)
    - hipótese: o que não é mencionado explicitamente não muda de uma situação para outra (*frame*)
    - todas consequências de 1 ação devem ser listadas explicitamente (ramificação)

## Métodos Monotônicos

- declarativos
- problema do frame:
  - holds (loc (b, l), s)  $\wedge$  holds (loc (b, l'), s)  $\rightarrow$  l = l'
  - problema potencial: tamanho da axiomatização

## Métodos Não Monotônicos

- particularmente para o problema da qualificação
- exemplo
  - bird (x)  $\wedge$   $\neg$ ab (x)  $\rightarrow$  flies (x)
  - holds (f, s)  $\wedge$   $\neg$ ab (a, f, s)  $\rightarrow$  holds (f, result (a, s))

## Hipóteses e Simplificações

- Ao longo de quase **40 anos**, a **pesquisa** em planejamento foi dirigida para a **geração de planos** e foi condicionada por 6 **simplificações**:
  - O agente planejador é omnisciente, isto é conhece todos os factos relevantes do seu ambiente.
  - As ações que o agente pode realizar têm resultados definidos.
  - Os objetivos apresentados ao agente são categóricos, isto é são alcançados ou não existe nenhuma noção de satisfação parcial.

## Hipóteses e Simplificações

- O agente é a única fonte da mudança do ambiente: não existem eventos exógenos ou outros agentes em redor.
- Os objetivos apresentados ao agente permanecem inalteráveis ao longo do processo de planejamento e de execução.
- As ações que o agente realiza podem ser modeladas como transformadores de estado instantâneos: não têm nem duração temporal, nem tempos fixos de ocorrência.

## Consequências

- Aquelas hipóteses de trabalho e simplificações têm várias **consequências**:
  - 1) não existe necessidade de entrelaçar o planejamento e a execução porque o agente tem todo o conhecimento que precisa no próprio instante de planejamento.
  - 2) nessas circunstâncias, um plano pode ser sempre executado com êxito: tudo está garantido que "acontece de acordo com o plano", e o re-planejamento é desnecessário.
  - 3) Como os objetivos são conhecidos a priori e permanecem fixos ao longo do processo de planejamento e execução, não existe qualquer noção de problemas de planejamento compelindo uns com os outros para a atenção do agente.

## Estágios

### 3) Explore o contexto do planejamento e execução

O mundo altera-se dinamicamente e de forma imprevisível, condicionando o ambiente em que o agente está trabalhando para realizar os seus objetivos e interferindo com os seus planos. Daí, o interesse do agente explorar a presença e os recursos (força) dos outros agentes, cooperando com eles (planejamento distribuído cooperativo e negociado, versão distribuída da via "planeie-então-actue"). Uma forma útil de interação é com os participantes humanos, o que sugere a técnica de planejamento de iniciativa mista

## APLICAÇÕES REAIS E PRÁTICAS

- Veículos autônomos (robótica)
- Transportes
- Montagem automática
- Escalonamento distribuído
- Gestão fluxos de trabalho e recursos da empresa
- Logística
- Missões militares (aéreas, navais)
- Robosoccer

Planejamento (planning)

©2002 Ana Lúcia C. Bazzan

## Planejamento: sistemas

- |                                  |                           |
|----------------------------------|---------------------------|
| • STRIPS (Fikes e Nilsson, 1971) | Controle do SHAKEY        |
| • HACKER (Sussman, 1973)         | Geração de programas      |
| • NOAH (Sacerdoti, 1977)         | Supervisão de aprendiz    |
| • NONLIN (Tate, 1977)            | Engenharia de turbinas    |
| • (Wesson, 1977)                 | Controle de tráfego aéreo |
| • NASL (McDermott, 1978)         | Circuitos electrónicos    |
| • OPM (Hayes-Roth et al, 1979)   | Viagens                   |
| • ISIS-II (Fox et al, 1981)      | Produção de turbinas      |
| • GARI (Latombe, 1981)           | Metalomecânica            |
| • MOLGEN (Stefik, 1981)          | Genética molecular        |

Planejamento (planning)

©2002 Ana Lúcia C. Bazzan

## Planejamento: sistemas

- |                                   |                     |
|-----------------------------------|---------------------|
| • SIPE (Wilkins, 1983)            | Transportes aéreos  |
| • DEVISER (Vere, 1983)            | Missão Voyager      |
| • NONLIN+ (Tate e Whiter, 1984)   | Logística naval     |
| • FORBIN (Miller et al, 1985)     | Controle fabril     |
| • SPAR (Hutchinson e Kak, 1990)   | Montagem robótica   |
| • T-SCHED (Drabble, 1990)         | Exploração espacial |
| • PLAN-ERSI (Fuchs et al, 1990)   | Exploração espacial |
| • O-PLAN (Currie e Tate, 1991)    | Produção fabril     |
| • SPIKE (Johnston e Adorf, 1992)  | Exploração espacial |
| • OPTIMUM-AIV (Aarup et al, 1994) | Exploração espacial |

Planejamento (planning)

©2002 Ana Lúcia C. Bazzan

## Planejamento: sistemas

- |                                    |                      |
|------------------------------------|----------------------|
| • COLLAGE (Lansky e Getoor, 1995)  | Trabalho cooperativo |
| • dMARS (Georgeff e Rao, 1995)     | Controle aéreo       |
| • GRAPHPLAN (Blum e Furst, 1995)   | Exploração espacial  |
| • DIPART (Pollack, 1996)           | Equilíbrio de cargas |
| • STEAM (Tambe, 1997)              | Simulação militar    |
| • TRAINS (Allen, 1998)             | Transportes          |
| • BLACKBOX (Kautz e Selman, 1998)  | Logística            |
| • SHAREPLANS (Rich e Sidner, 1998) | Interfaces           |
| • WEBTRADER (Hadad e Kraus, 1999)  | Gestão de equipes    |

Planejamento (planning)

©2002 Ana Lúcia C. Bazzan

## Visão de Agentes

- **Agentes** têm crenças diferentes sobre modos de realizar uma ação ou alcançar um certo estado desejado
- necessário abandonar o **ponto de vista** clássico dos **planos como estruturas de dados** e passar a encará-los em **função dos estados mentais**.
- agente tem plano para realizar ação se tem um certo conjunto de crenças e intenções pertinentes para ação
- SHAREPLANS (Grosz, Hunsberger e Kraus, 1999) do **planejamento Colaborativo** adota ponto de vista dos planos em função dos estados mentais

Planejamento (planning)

©2002 Ana Lúcia C. Bazzan

## Planejamento - Problema de Busca

- planejamento hierárquico
  - plano para o objetivo: ir da UFRGS à UFRJ:
    - ir ao salgado filho (1), voar para galeão (2), ir à ufrj (3)
      - chamar taxi (1.1), pegar taxi (1.2)
      - check-in (2.1), embarque (2.2)
      - alugar carro (3.1), dirigir para fundão (3.2)

Planejamento (planning)

©2002 Ana Lúcia C. Bazzan

## Exercício

- construir um plano hierárquico para o mundo dos blocos
  - relaxar algumas pré-condições dos níveis mais baixos
  - fazer abstrações do tipo “mover blocos” (base do ABSTRIPS)
  - agrupar pedaços (*chunks*) de ações do nível mais baixo para formar ações de mais alto nível (base do SOAR)
  - usar informações default (por exemplo: é possível colocar um bloco sobre outro)

## Planejamento Não Linear

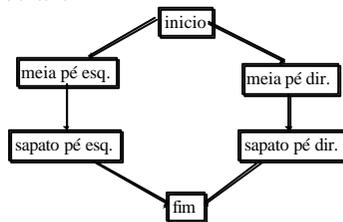
- situação inicial:
  - loc (A,m)
  - loc (B,m)
  - loc (C,m)
- objetivo:
  - loc (A,B)  $\wedge$  loc (B,C)
- qual sub-objetivo deve ser tentado primeiro ???
- existem n! ordenamentos possíveis; somente um é ótimo
- problema é NP hard!
- conjunto de todos planos ordenados: planos lineares

## Exercício

- construir um plano linear para a tarefa de calçar sapatos e meias (com a restrição de que só se calce um sapato após ter calçado a meia correspondente)

## Planejamento Não Linear

- plano parcialmente ordenado correspondente ao exercício anterior:



## Anomalia de Sussman

- situação inicial:
  - loc (A,m)
  - loc (B,m)
  - loc (C,A)
- objetivo:
  - loc (B,C)  $\wedge$  loc (A,B)
- qual sub-objetivo deve ser tentado primeiro ???
- nenhum dos dois pode ser atingido *primeiro*
- solução: entrelaçamento dos planos (faz sentido em planejamento hierárquico)

## Planejamento Não Linear

## Pontos Importantes

- McCarthy foi responsável pela introdução da LPO como ferramenta para construir sistemas de IA (1958). Em 1963 propôs o uso de estados do mundo (ou situações) como objectos para serem manipulados com a LPO
- Quando o Cálculo Situacional foi aplicado ao raciocínio sobre ações surgiu o **Problema da Persistência** (McCarthy e Hayes, 1969). Originalmente, centrava-se na incapacidade de se evitar a necessidade de um grande número de axiomas de persistência perante uma descrição desleal e ineficiente das ações!

## Pontos Importantes

- Muitos investigadores consideraram o problema como **insolúvel** dentro da FOL, e alguns mesmo como um sinal da **limitação da IA** e da sua via logística.
- Existem pelo menos 3 volumes de artigos coligidos sobre este problema, e um autor (Crockett, 1994) que refere o problema como o sintoma do insucesso inevitável de todo o empreendimento de IA!

## Agradecimento

- Parte dos *slides* foram feitos sobre material de curso ministrado pelo Prof. Helder Coelho