

INE 601900

Inteligência Artificial Simbólica

Ementa

- Técnicas de IA Aplicadas à Resolução de Problemas.
- IA Simbólica

Professor Mauro Roisenberg

mauro@inf.ufsc.br
http://www.inf.ufsc.br/~mauro

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

1

Tópicos

- Histórico, Conceitos, Teoria de Problemas
- Modelagem de Agentes Inteligentes
- Revisão de Lógica
- Representação de Conhecimento
- Mecanismos de Raciocínio
- Representação e Tratamento de Incertezas
- Sistemas Especialistas

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

2

Avaliação

- 1 Prova + n Trabalhos + Seminário

$$MF = P1 \times 0,6 + [(T1 + T2 + \dots + Sn) / n] \times 0,4$$

Índices Variáveis

Bibliografia

- Russel & Norvig - Artificial Intelligence: A modern approach
- George F. Luger - Inteligência Artificial
- E. Rich & K. Knight - Inteligência Artificial
- J.M. Barreto - Inteligência Artificial: Uma abordagem híbrida
- G. Bittencourt - Inteligência Artificial: Ferramentas e teorias
- R. A. Rabuske - Inteligência Artificial

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

3

Introdução

- Afinal, pra que estudamos Inteligência Artificial?

– Existem 3 tipos de problemas

1. Os que não têm solução.

Não há nada a fazer...

2. Os que têm solução algorítmica

Ótimo. Basta codificar os algoritmos...

3. Os outros....

- Aqueles em que a solução algorítmica tem complexidade NP-Completa;
- Aqueles que o Ser Humano é capaz de resolver;
- Aqueles que os Seres Vivos são capazes de resolver.

Jogar Xadrez, Jogar Futebol, Reconhecer Faces, Fazer Traduções, Procurar Comida, Reconhecer Letras, etc, etc...

É AQUI QUE ENTRA A I.A.!!!!

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

4

Histórico e Conceitos Básicos

- 1a. Pergunta: O que é Inteligência Artificial?
- Algumas Respostas:
 - A automatização das atividades que associamos com o pensamento humano, atividades tais como tomada de decisões, resolução de problemas, aprendizado, ... (Bellman, 1978)
 - O estudo de como fazer os computadores realizarem coisas que, hoje em dia são feitas melhores pelas pessoas. (Rich & Knight, 1991)
 - O estudo das faculdades mentais através de modelos computacionais. (Charniak & McDermott, 1985)
 - O ramo da ciência da computação que se ocupa da automatização do comportamento inteligente. (Luger & Stubblefield, 1993)

Sistemas que PENSAM como HUMANOS	Sistemas que PENSAM RACIONALMENTE
Sistemas que ATUAM como HUMANOS	Sistemas que ATUAM RACIONALMENTE

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

5

Histórico e Conceitos Básicos

- **UMA BOA DEFINIÇÃO**
A grande atividade da IA é a **solução de problemas** usando e manipulando **conhecimento**.
- Formalmente a área foi criada em **1956** quando o nome foi cunhado por John McCarthy no encontro do Dartmouth College, onde se reuniram os primeiros pesquisadores da área.
- Entretanto, há mais de 2000 anos, filósofos, psicólogos e cientistas estudam como o ver, aprender, recordar e raciocinar pode ser realizado.
- **UM POUCO DE FILOSOFIA**
 - Um dia será possível entender completamente a inteligência humana?
 - Cérebro e mente são a mesma coisa?
 - Existe a alma e o livre arbítrio?

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

6

Histórico e Conceitos Básicos

É possível dividir as fases da história da Inteligência Artificial com os seguintes períodos:

1. ÉPOCA PRÉ-HISTÓRICA

(Nesta época nada se conhecia sobre os mecanismos da mente, nem sob o prisma fisiológico nem psicológico e por esta razão vai até 1875 quando Camilo Golgi visualizou o neurônio)

- **Objetivo:** Criar seres e mecanismos apresentando comportamento inteligente.
- **Metodologia e conquistas:** Mecanismos usando mecânica de precisão desenvolvida nos autômatos, mecanismos baseados e teares, etc. Apelo ao sobrenatural.
- **Limitações:** Complexidade dos mecanismos, dificuldades de construção. Insucesso dos apelos ao sobrenatural.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

7

Histórico e Conceitos Básicos

2. ÉPOCA ANTIGA (1875-1943)

(Modelo de Neurônio de McCulloch & Pitts)

- Época em que a lógica formal apareceu (Russel, Gödel, etc) bem como se passou a reconhecer o cérebro como órgão responsável pela inteligência. Hilbert imaginava um mundo paradisíaco, em que tudo poderia ser axiomatizado e reduzido à Lógica. Entretanto assim como o final do século XIX viu o desmoronamento do mundo Euclidiano, Gödel abalou o mundo de Hilbert com seu teorema de incompletude da aritmética. Foi a época em que, tal como os filósofos gregos fizeram, são colocadas as bases da IAS e IAC, terminando com a publicação do trabalho de McCulloch e Pitts modelando o neurônio.
- **Objetivo:** Entender a inteligência humana
- **Metodologia e conquistas:** Estudos da psicologia e de neurofisiologia. Nascimento da psicanálise.
- **Limitações:** Grande distância entre as conquistas da psicologia e da neurofisiologia.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

8

Histórico e Conceitos Básicos

3. ÉPOCA ROMÂNTICA (1943-1956)

(É o otimismo desordenado, que tem um jovem rapaz romântico crê que tudo é possível. Acaba com a reunião no Dartmouth College)

- **Objetivo:** Simular a inteligência humana em situações pré-determinadas.
- **Metodologia e conquistas:** Inspiração na natureza. Nascimento Cibernético. Primeiros mecanismos imitando funcionamento de redes de neurônios. Primeiros programas imitando comportamento inteligente.
- **Limitações:** Limitação das capacidades computacionais.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

9

Histórico e Conceitos Básicos

4. ÉPOCA BARROCA (1956-1969)

(livro Perceptrons)

- Tudo é fácil e será conseguido.
- Provadores Automáticos de Teoremas.
- Acreditava-se na tradução automática entre linguagens.
- Acreditava-se ser possível construir um programa para resolver qualquer problema.
- Em alguns anos um computador ganharia o campeonato mundial de xadrez.
- **Objetivo:** Expandir ao máximo as aplicações da IA tanto usando a abordagem simbólica quanto a conexionista.
- **Metodologia e conquistas:** Perceptron. Primeiros sistemas especialistas usando a abordagem simbólica. Grandes esperanças da IAS.
- **Limitações:** Dificuldades em técnicas de aprendizado de redes complexas; Subestimação da complexidade computacional dos problemas.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

10

Histórico e Conceitos Básicos

4. ÉPOCA BARROCA (1956-1969)

(livro Perceptrons)

- Princípio da IA Simbólica (IAS)
"Hipótese do Sistema de Símbolos Físicos" (Newell & Simon):
 - A inteligência é o resultado da manipulação de símbolos que representam o mundo.
- Princípio da IA Conexionista (IAC)
"Metáfora Biológica":
 - Se for construído um modelo do cérebro, este modelo apresentará um comportamento inteligente.
- Subestimação da Complexidade Computacional:
 - Os problemas de IA são comumente de complexidade NP-Completa.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

11

Histórico e Conceitos Básicos

5. ÉPOCA DA TREVAS (1969-1981) (5a. Geração)

- Paralisação de quase todas as pesquisas em IA por falta de verbas. Acabou quando os japoneses anunciaram seus planos para a Quinta Geração de Computadores e em outro ambiente Hopfield publica célebre artigo sobre redes neurais.
- Assim como a Idade Média da História da humanidade viu florescer idéias novas, nesta época não foi de total trevas. Nasceram as primeiras aplicações dos conjuntos nebulosos de Zadeh, nascendo o controle inteligente com Mamdani. Além disto os sistemas especialistas se firmaram com Shortliffe.
 - **Objetivo:** Encontrar para a IA aplicações práticas.
 - **Metodologia e conquistas:** Sistemas especialistas. Aplicações principalmente em laboratórios. Os computadores usados principalmente para aplicações administrativas e numéricas. Interesse dos fabricantes de computadores de desmistificar a máquina levando a pouco interesse em IA.
 - **Limitações:** Era necessário muito conhecimento para tratar mesmo o mais banal problema de senso-comum; Interesses econômicos.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

12

Histórico e Conceitos Básicos

6. RENASCIMENTO (1981-1987)

(Começou a corrida para IA. Os resultados obtidos nas épocas anteriores atingiram o público em geral. Sistemas especialistas se popularizaram. Primeira conferência internacional de Redes Neurais marca final do período).

- **Objetivo:** Renascimento da IA, simbólica e conexionista
- **Metodologia e conquistas:** Popularidade da linguagem Prolog, adotada pelos japoneses. Crescimento da importância da Lógica. Proliferação de máquinas suportando ferramentas para IA. Sistemas Especialistas capazes de simular o comportamento de um especialista humano ao resolver problemas em um domínio específico.
- Alguns poucos pesquisadores continuaram seus trabalhos em RNAs, Grossberg, Kohonen, Widrow, Hinton, etc. No final do período, trabalhos de Hopfield, do grupo PDP, etc., criaram condições para a fase seguinte no que diz respeito às RNAs.
- **Limitações:** a IA e a IAC evoluindo separadamente.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

13

Histórico e Conceitos Básicos

7. ÉPOCA CONTEMPORÂNEA (1987- atual)

(Logo no início do período Gallant publica seu célebre artigo sobre sistemas especialistas conexionistas. Foi o ponto de partida para a união das duas abordagens de IA, tornando a abordagem dirigida problemas a abordagem atual.)

- **Objetivo:** Alargamento das aplicações das IAs. Uso em tomografia, pesquisas em campos de petróleo, e bases de dados inteligentes.
- **Metodologia e conquistas:** Redes diretas como aproximador universal. Lógica nebulosa usada largamente em indústrias para controle inteligente. Sistemas especialistas se torna tecnologia dominada. Bons resultados em problemas mal definidos com sistemas usando hibridismo neural-nebuloso. Novo paradigma de programação: programação conexionista.
- **Limitações:** Quem sabe??? Uma possibilidade é uma grande expansão das bases de dados inteligentes.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

14

Teste de Turing para a Inteligência (1950)

• Visão de que computadores atuam como humanos.

- Computador com as seguintes capacidades:
 - Processamento de linguagem natural;
 - Representação de conhecimento;
 - Raciocínio automático;
 - Aprendizado de máquina.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

15

Domínios de Aplicação

- Resolução de problemas (planejamento)
 - Quebra-cabeça, Jogos
 - Problemas que requerem conhecimento especialista (diagnóstico médico, localização de recursos minerais, configuração de computadores)
- Raciocínio por senso-comum
 - Simulação qualitativa ou intuitiva
 - Mecanismos de inferência
- Percepção (visão e fala)
 - Reconhecimento de objetos através de imagens
 - Reconhecimento de voz ou identificação de imagens

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

16

Domínios de Aplicação

- Processamento de linguagem natural
 - O que significa um conjunto de palavras
 - Tradução de idiomas
 - Acesso a dados em base de dados
- Extração de conhecimento
 - Knowledge Data Discovery
- Aprendizado
 - Desenvolver sistema que melhorem seu desempenho através de experiências
 - Desenvolver sistemas que auxiliem no aprendizado de alunos
- Programação
 - Desenvolvimento de "shells" para sistemas especialistas
 - Paralelização de linguagens de IA
 - Distribuição da resolução de problemas
 - Sistemas Multi-agentes

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

17

Teoria de Problemas

A IA se ocupa da resolução de problemas, para tal é necessário conhecimento sobre o problema e técnicas de manipular este conhecimento para obter a solução.

- **O que é um PROBLEMA?**
 - Resolver um problema é diferente de ter um método para resolvê-lo.
 - Antes de tentar buscar a solução de um problema, deve-se responder as seguintes perguntas:
 - Quais são os dados?
 - Quais são as soluções possíveis?
 - O que caracteriza uma solução satisfatória?
- **Exemplos:**
 - As pontes de Königsberg
 - O tabuleiro de xadrez mutilado

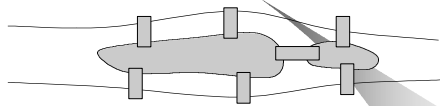
(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

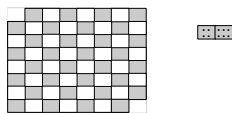
18

Teoria de Problemas

- As pontes de Königsberg



- O tabuleiro de xadrez mutilado



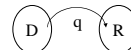
(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

19

Teoria de Problemas

- **Definição:** Um problema é um objeto matemático $P=(D,R,q)$, consistindo de dois conjuntos não vazios, D os dados e R os resultados possíveis, e de uma relação binária $q \subseteq D \times R$, a condição que caracteriza uma solução satisfatória, associando a cada elemento do conjunto de dados a solução desejada.
- **Exemplo:** Um problema de diagnóstico médico
 - O conjunto de dados disponíveis $d \in D$ (observação da anamnese, sintomas, exames, etc.)
 - R é o conjunto de doenças possíveis
 - Solução satisfatória: encontrar o par (d,r) onde $r \in R$ é o diagnóstico correto.
- A definição de um problema permite testar se um certo elemento é ou não solução, mas não guia na busca deste elemento.



(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

20

Teoria de Problemas

Modos de definir uma FUNÇÃO PROBLEMA

1. Por **ENUMERAÇÃO EXAUSTIVA**
 - Fornece-se todos os conjuntos de pares (dado, resultado).
 - Ex.: Agenda de telefone.
2. **DECLARATIVAMENTE**
 - Definir declarativamente um problema é dar propriedades que devem ser satisfeitas pela solução do problema.
 - Ex.: O avô de alguém é aquela pessoa que é pai do pai da pessoa.
3. Por um **PROGRAMA** (um algoritmo)
 - Um programa de computador define a correspondência entre dados e resultados sempre que ele pára, conseguindo chegar a uma solução.
 - Ex.: Programa para declaração do imposto de renda.
4. Por **EXEMPLOS**
 - O problema não completamente definido para todo valor de seus dados. Conhece-se para um subconjunto.
 - Ex.: Ensinar a pegar uma bola atirada no ar.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

21

Teoria de Problemas

Os modos de definir uma função levam ao conceito de

- **COMPUTABILIDADE**
 Definição 1: Uma função é dita computável se é possível calcular seu valor para todos os elementos de seu domínio de definição.
 - Ex1.: Equações Diofantinas
 - $a^n + b^n = c^n$ $n \geq 3$ a, b, c Inteiros
 - Ex2.: Problema da parada de um programa
 - Dado um programa e um conjunto de dados infinito, é impossível ter um outro programa que decida se o primeiro programa vai conseguir parar para todos os dados.
- **COMPLEXIDADE**
 Definição 2: A complexidade de um problema, com relação a um conjunto bem definido de recursos, é definida como aquela que considera o modo mais parcimonioso de uso de recursos conhecidos para a solução do problema.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

22

Teoria de Problemas

- Se a computabilidade diz respeito à existência de solução para um problema, a complexidade se refere a quantidade de recursos necessários para resolvê-lo.
- Um mesmo problema pode ter complexidade diferente, dependendo da técnica que se utiliza para resolvê-lo.
- Definição 3: Um problema é dito NP-Completo quando não se conhece algoritmo de ordem polinomial capaz de resolvê-lo.
 - Ex.: Problema do caixeiro-viajante resolvido de maneira algorítmica.
- **HEURÍSTICAS**
 Definição 4: Conjunto de regras e métodos que conduzem à descoberta, à invenção e à resolução de problemas.
- O papel das heurísticas - "boa solução"
 - Na IA as heurísticas são as "técnicas" que possibilitam tratar problemas NP-Completo e buscar algoritmos de ordem mínima para problemas polinomiais.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

23

Teoria de Problemas

- **Estratégias Básicas para Resolver Problemas** (Estratégias constituem os modos básicos de raciocínio para resolver problemas)
 Pela definição do problema, o qual se apresenta como uma função, estes modos de raciocínio devem se adaptar ao modo que a função foi definida.
 1. *Por enumeração exaustiva:* o conhecimento necessário para resolver o problema está na enumeração.
 2. *Declarativamente:* leva frequentemente a problemas de busca. "Utilizar um método de busca em que, por passos sucessivos se aproxima da solução, usando algumas vezes técnicas sem grande justificativa teórica". ESTA É A ABORDAGEM DA IA SIMBÓLICA!
 3. *Por exemplos:* Se o problema foi definido por exemplos, se deverá usar um método para aproximar a função. ESTA É A ABORDAGEM DA IA CONEXIONISTA!
- **ALGUNS PROBLEMAS CLÁSSICOS:**
 - Missionários e canibais; Torres de Hanói; Baldes de Água; Jogo do Oito; Reconhecimento de Caracteres, Previsão, etc.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

24

Agentes Inteligentes

- Uma Ferramenta para Análise de Sistemas Inteligentes

O que é um agente???

- Um agente é algo que percebe seu ambiente através de sensores e atua no ambiente através de atuadores.
 - Agente Humano, Agente Animal, Agente Robótico, Agente em Software, Termostatos, etc...
 - A Função Agente mapeia dados da percepção para ações.

O que é um agente racional???

- O objetivo da IA, segundo Russel & Norvig é projetar agentes que façam um bom trabalho agindo no seu ambiente. O princípio básico da utilização de agentes é que eles devem "saber das coisas" (know things).
- Um agente racional ideal é aquele que, para cada possível sequência de percepção, realiza uma ação que maximiza seu desempenho (mapeamento ideal), tendo como base as evidências fornecidas pela sequência de percepções e pelos conhecimentos previamente existentes no agente.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

25



Agentes Inteligentes

- Especificar que ações um agente deve tomar em resposta a qualquer sequência de percepções, leva ao projeto de um agente ideal.

- Medida de Desempenho
 - Segurança, velocidade, destino, conforto, etc...
- Ambiente
 - Observável, determinístico, episódico, estático,...
- Atuadores
 - Rodas, pés, vídeos, mensagens, etc...
- Sensores
 - Imagens, gps, teclados, mensagens, encoders, ultra-som,...
- A noção de agente pretende ser uma ferramenta para análise de sistemas inteligentes, não uma caracterização absoluta que divide o mundo em agentes e não-agentes.
 - Exemplos: Aspirador de pó, Agente de busca na Internet, Agente de auxílio a aprendizagem, Agente de auxílio ao diagnóstico médico, etc...

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

26

Agentes Inteligentes

Tipos de Agentes

- Software Agents
 - Agentes são considerados entidades computacionais baseadas na ideia de que os usuários necessitam apenas especificar um objetivo em alto nível ao invés de utilizar instruções explícitas, deixando as questões de como e quando agir a cargo do agente.
 - Aplicações: Interfaces Amigáveis, Cartografia, Auxílio ao Ensino, Auxílio ao Diagnóstico Médico.
- Hardware Agents
 - Agentes que operam em ambientes físicos (AGVs, Robôs, Embedded Systems, etc.)
 - Agentes Físicos capazes de detectar mudanças ambientais e, através da reavaliação de seus objetivos encontrar uma nova sequência de ações capazes de persegui-los, sem que esta sequência tivesse sido prevista.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

27

Agentes Inteligentes

O que é um Agente Autônomo?

- Agentes Autônomos são sistemas computacionais que operam em ambientes dinâmicos e imprevisíveis. Eles interpretam dados obtidos pelos sensores que refletem eventos ocorridos no ambiente e executam comandos em atuadores que produzem efeitos no ambiente.
- O grau de "autonomia" de um agente está relacionado à capacidade de decidir por si só como relacionar os dados dos sensores com os comandos aos atuadores em seus esforços para atingir seus objetivos, satisfazer motivações, etc...

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

28

Agentes Reflexivos

- Não tem memória.
- Quando cessa a percepção, cessa a ação.
 - If car-in-front-is-braking (brake-light on)
 - then initiate-braking

function SIMPLE-REFLEX-AGENT (percept) **returns** action
static: rules, a set of condition-action rules

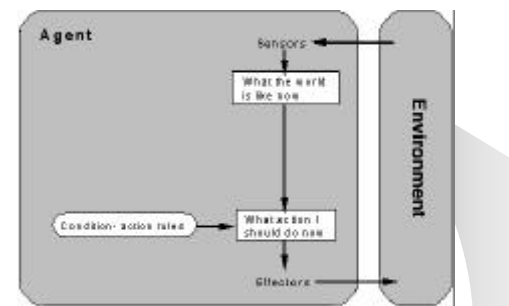
state := INTERPRET-INPUT(percept)
rule := RULE-MATCH(state, rules)
action := RULE-ACTION[rule]
return action

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

29

Agentes Reflexivos



(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

30

Agentes com Estados Internos

- Guarda informações que não são percebidas no momento
 - Como o mundo evolui (modelo do mundo)
 - O que as ações provocam no mundo

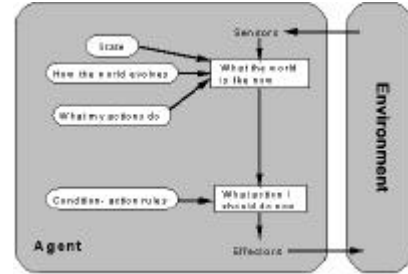
function REFLEX-AGENT-WITH-STATE (percept) **returns** action
static: state, uma descrição do estado corrente do mundo
 rules, a set of condition-action rules
 state := UPDATE-STATE(state, percept)
 rule := RULE-MATCH(state, rules)
 action := RULE-ACTION(rule)
 state := UPDATE-STATE(state, action)
return action

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

31

Agentes com Estados Internos



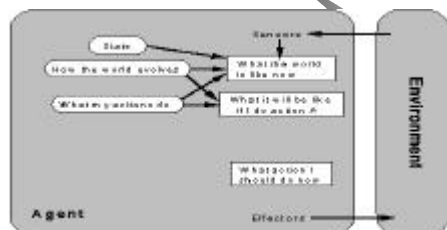
(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

32

Agentes com Metas

- Metas
- Busca e Planejamento são subcampos da IA cujo objetivo é achar seqüências de ações que conduzam ao objetivo do agente.



(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

33

Agentes baseados em Utilidade

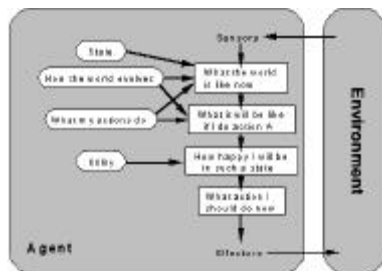
- Utilidade é uma função que mapeia um estado em um número real que descreve o grau de "felicidade" associado ao estado.
- Permite decisões racionais em casos em que o objetivo tem algum "problema";
- Quando existem objetivos conflitantes (p.ex.: velocidade e segurança);
- Quando existem vários objetivos, a utilidade "diz" qual tentar alcançar primeiro.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

34

Agentes baseados em Utilidade



(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

35

Propriedades dos Ambientes

- Completamente Observável x Parcialmente Observável**
 - se o aparato sensor fornece acesso a uma descrição completa do ambiente.
- Determinístico x Estocástico**
 - se o próximo estado do ambiente pode ser completamente determinado pelo estado atual do ambiente e pelas ações selecionadas pelo agente.
- Episódico x Sequencial**
 - a experiência do agente é dividida em episódios. Cada episódio consiste na percepção do agente e na sua ação. Não existe passado nem futuro.
- Estático x Dinâmico**
 - se o ambiente se altera enquanto o agente está pensando, então o ambiente é dinâmico para o agente.
- Discreto x Contínuo**
 - se existe um número finito de diferentes percepções e ações possíveis, então o ambiente é discreto.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

36

Propriedades dos Ambientes

Ambiente	Observável	Determinístico	Episódico	Estático	Discreto
Xadrez com Relógio	SIM	SIM	NÃO	SEMI*	SIM
Xadrez sem Relógio	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM
Poker	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	SIM
Gamão	SIM	NÃO	NÃO	SIM	SIM
Dirigir Taxi	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
Diagnóstico Médico	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
Análise de Imagens	SIM	SIM	SIM	SEMI*	NÃO
Robo Manipulador	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
Controlador de Refin.	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
Tutor Interativo Ling.	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM

* Semi: quando o próprio ambiente não mudar com a passagem do tempo, mas o nível de desempenho do agente se altera.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

37

Resolução de Problemas

- Já vimos o que é um problema. Vamos agora buscar mecanismos para representá-lo e resolvê-lo, utilizando as técnicas da IA, ou seja, usando e manipulando CONHECIMENTO
- O Estudo do Conhecimento
- Resolução de Problemas por Busca
- Representação de Conhecimento

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

38

Resolução de Problemas

- O Estudo do Conhecimento
 - Uma teoria em IA consiste na especificação do conhecimento necessário a uma entidade cognitiva.
 - O que é uma ENTIDADE COGNITIVA?
 - É o "mecanismo" inteligente que permite entre outras atividades: solução de problemas, uso de linguagem, tomada de decisões, percepção, etc...
 - Na abordagem da IA Simbólica, a simulação da capacidade cognitiva requer conhecimento declarativo (definição declarativa da função) e algum tipo de raciocínio. Além disso, a evolução dos estados de conhecimento de um agente pode ser descrita em forma de linguagem (lógica ou natural).

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

39

Resolução de Problemas

- O conhecimento é central para a tarefa inteligente e na IAS, para que esta tarefa ocorra são necessários:
 - Uma BASE DE CONHECIMENTOS
 - Um MOTOR DE INFERÊNCIA
- Base de Conhecimentos:
 - Contém a informação específica sobre o domínio e será tão complexa quanto for o domínio e a capacidade cognitiva a ser simulada.
- Motor de Inferência:
 - Mecanismo que manipula a Base de Conhecimentos e gera novas conhecimentos.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

40

Métodos de Busca

- A maioria dos problemas interessantes de IA não dispõe de soluções algorítmicas. Porém:
 - São solucionáveis por seres humanos e, neste caso, sua solução está associada à "inteligência";
 - Formam classes de complexidade variável existindo desde pequenos problemas triviais (jogo da velha) até instâncias extremamente complexas (xadrez);
 - São problemas de conhecimento total, isto é, tudo o que é necessário para solucioná-los é conhecido, o que facilita sua formalização.
 - Suas soluções têm a forma de uma sequência de situações legais e as maneiras de passar de uma situação para outra são em número finito e conhecidas.
- Diante da falta de solução algorítmica viável, o único método de solução possível é a BUSCA.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

41

Métodos de Busca

- Agentes de Resolução de Problemas
- Decidem o que fazer pela busca de ações que levem a estados desejáveis
 - estado inicial
 - operadores
 - teste de meta
 - função de custo de caminho
- Desempenho da Busca
 - Encontra uma solução?
 - É uma boa solução?
 - Custo do caminho
 - Qual o custo da busca?
 - Tempo e memória
 - Custo total=Custo da busca + custo do caminho

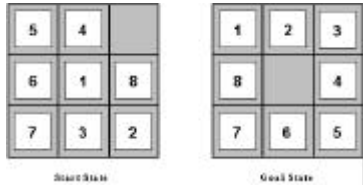
(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

42

Métodos de Busca

- Exemplo: Jogo do Oito



- Estados:** local de cada uma das peças e do espaço
- Operadores:** mover o espaço para cima, para baixo, esquerda ou direita.
- Teste de meta:** dado na figura
- Custo do caminho:** 1 para cada movimento

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

43

Métodos de Busca

- Estratégias de Busca

- Critérios

- Completude
- Complexidade de Tempo
- Complexidade de Espaço
- Otimização

- Métodos

- Busca Cega - Não existe informação
- Busca Heurística - Faz uso de informação

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

44

Busca Cega (Blind Search ou Uninformed Search)

- Uma estratégia de busca é dita cega se ela não leva em conta informações específicas sobre o problema a ser resolvido.
- Tipos de Busca Cega
 - Busca em largura
 - Busca pelo custo uniforme
 - Busca em profundidade
 - Busca em profundidade limitada
 - Busca por aprofundamento iterativo
 - Busca bidirecional

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

45

Busca Cega

Busca em Largura (Amplitude)

- Consiste em construir uma árvore de estados a partir do estado inicial, aplicando a cada momento, todas as regras possíveis aos estados do nível mais baixo, gerando todos os estados sucessores de cada um destes estados. Assim, cada nível da árvore é completamente construído antes de qualquer nodo do próximo nível seja adicionado à árvore



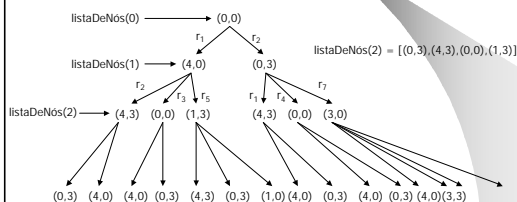
(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

46

Busca Cega Busca em Largura (Amplitude)

- Exemplo: Um balde de 4 litros e um balde de 3 litros. Inicialmente vazios.
 - Estado Final: um dos baldes com 2 litros de água.



(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

47

Busca Cega

Busca em Largura (Amplitude)

- Características: Completa e Ótima
 - Se existe solução, esta será encontrada.
 - A solução encontrada primeiro será a de menor profundidade.
- Análise de Complexidade - Tempo e Memória
 - Seja um fator de ramificação b .
 - Nível 0: 1 nó
 - Nível 1: b nós
 - Nível 2: b^2 nós
 - Nível 3: b^3 nós
 - Nível d (solução) b^d nós

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

48

Busca Cega

Busca em Largura (Amplitude)

- Análise de Complexidade – Tempo e Memória

Depth	Nodes	Time	Memory
0	1	1 millisecond	100 bytes
2	111	.1 seconds	11 kilobytes
4	11,111	11 seconds	1 megabyte
6	10^6	18 minutes	111 megabytes
8	10^8	31 hours	11 gigabytes
10	10^{10}	128 days	1 terabyte
12	10^{12}	35 years	111 terabytes
14	10^{14}	3500 years	11,111 terabytes

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

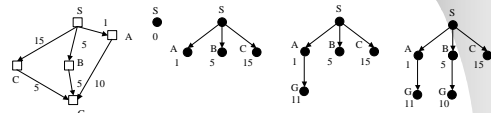
15/04/05

49

Busca Cega

Método do Custo Uniforme

- Supondo que exista um “custo do caminho” associado a cada nó percorrido e que se deseje achar o caminho de custo mínimo.
- Neste caso, o algoritmo anterior é modificado para expandir primeiro o nó de menor custo.
- Exemplo: Problema de Rota entre S e G



(C) - Prof. Mauro Roisenberg

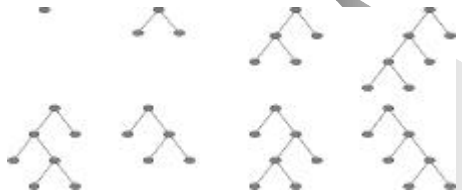
15/04/05

50

Busca Cega

Busca em Profundidade

- Procurar explorar completamente cada ramo da árvore antes de tentar o ramo vizinho.



(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

51

Busca Cega

Busca em Profundidade

- Exemplo: Um balde de 4 litros e um balde de 3 litros. Inicialmente vazios. Estado Final: um dos baldes com 2 litros de água.
- O que acontece quando nenhuma regra pode ser aplicada, ou a árvore atinge uma profundidade muito grande sem que tenha encontrado uma solução?
 - Neste caso ocorre o BACKTRACKING, ou seja, o algoritmo volta atrás e tenta outro caminho.
 - Considere o seguinte sistema de produção:

$$E = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$$

$$e0 = 0$$

$$F = \{3\}$$

$$R = \{ r1 = (x | x \neq 1 \wedge x \leq 2) \rightarrow (2 * x)$$

$$r2 = (x | \text{é Par}(x)) \rightarrow (x + 1) \}$$

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

52

Busca Cega

Busca em Profundidade

- Características: Não é Completa e Não é Ótima
 - Se admitir estados repetidos ou um nível máximo de profundidade, pode nunca encontrar a solução.
 - A solução encontrada primeiro poderá não ser a de menor profundidade.
 - O algoritmo não encontra necessariamente a solução mais próxima, mas pode ser MAIS EFICIENTE se o problema possui um grande número de soluções ou se a maioria dos caminhos pode levar a uma solução.
- Análise de Complexidade – Tempo e Memória
 - Seja m a profundidade máxima e um fator de ramificação b .
 - Tempo: b^m
 - Memória: $b \cdot m$

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

53

Busca Cega

Busca por Aprofundamento Iterativo

- Teste de todos os possíveis limites com busca por profundidade limitada.
- Em geral é o melhor método quando o espaço de busca é grande e a profundidade é desconhecida.



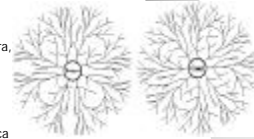
(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

54

Busca Cega Busca Bidirecional

- A ideia deste método de busca é procurar simultaneamente "para frente" a partir do estado inicial e "para trás" a partir do estado final, e parar quando as duas buscas se encontrarem no meio.
- Nem sempre isto é possível, para alguns problemas os operadores não são reversíveis, isto é, não existe a função predecessora e portanto não é possível fazer a busca "para trás".
- Análise de Complexidade
 - Comparando com a busca em largura, o tempo e o espaço para a busca é proporcional a $2b^{d/2}$, onde d é o nível onde está a solução e b é o fator de ramificação da árvore.
 - Exemplo: Para $b=10$ e $d=6$, na busca em largura seriam gerados 1.111.111 nós, enquanto que na busca bidirecional seriam gerados 2.222 nós.



(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

55

Comparação entre Métodos de Busca

Criterion	Breadth-First	Uniform-Cost	Depth-First	Depth-Limited	Iterative Deepening
Complete?	Yes ¹	Yes ²	No	Yes, if $l \geq d$	Yes
Time	b^{l+1}	$b C^*/\epsilon $	b^m	b^l	b^d
Space	b^{l+1}	$b C^*/\epsilon $	bm	b^l	b^d
Optimal?	Yes ³	Yes ⁴	No	No	Yes

b: fator de ramificação

d: profundidade da solução mais rasa

m: profundidade máxima da árvore de busca

l: limite de profundidade

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

56

Busca Heurística (Informed Search)

- Os métodos de busca vistos anteriormente fornecem uma solução para o problema de achar um caminho até um nó meta. Entretanto, em muitos casos, a utilização destes métodos é impraticável devido ao número muito elevado de nós a expandir antes de achar uma solução.
- Para muitos problemas, é possível estabelecer princípios ou regras práticas para ajudar a reduzir a busca.
- A técnica usada para melhorar a busca depende de informações especiais acerca do problema em questão.
- Chamamos a este tipo de informação de **INFORMAÇÃO HEURÍSTICA** e os procedimentos de busca que a utilizam de **MÉTODOS DE BUSCA HEURÍSTICA**.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

57

Busca Heurística (Informed Search)

- A informação que pode compor uma informação heurística é o Custo do Caminho.
- O **CUSTO DO CAMINHO** pode ser composto pelo somatório de dois outros custos:
 - O custo do caminho do estado inicial até o estado atual que está sendo expandido (função g): g
 - Uma estimativa do custo do caminho do estado atual até o estado meta (função heurística h): h
- A filosofia geral que move a busca heurística é: O **MELHOR PRIMEIRO**. Isto é, no processo de busca deve-se primeiro expandir o nó "mais desejável" segundo uma função de avaliação.

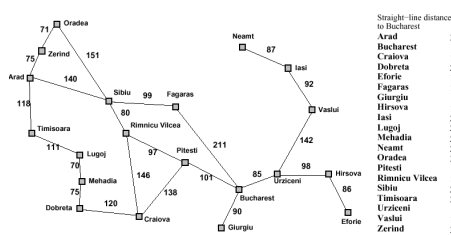
(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

58

Busca Heurística (Informed Search)

Romania with step costs in km



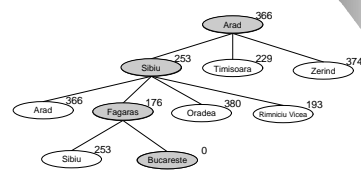
(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

59

Busca Heurística Busca Gulosa (Greedy Search)

- Semelhante à busca em profundidade com backtracking.
- Tenta expandir o nó que parece mais próximo ao nó meta com base na estimativa feita pela função heurística h .
- No caso do mapa da Romênia, $h(n)$ é a distância em linha reta de n até Bucareste.



(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

60

Busca Heurística

Busca Gulosa (Greedy Search)

- Análise de Complexidade
 - É completa se não admitir estados repetidos;
 - Tempo: $O(b^m)$, mas uma boa heurística pode reduzir drasticamente o tempo;
 - Espaço: $O(b^m)$, todos os nós são mantidos na memória;
 - Não garante a solução ótima.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

61

Busca Heurística

Busca A* (A estrela)

- Filosofia: procurar evitar expandir nós que já são "custosos".
- É um método de busca que procura otimizar a solução, considerando todas as informações disponíveis até aquele instante, não apenas as da última expansão.
- Todos os estados abertos até determinado instante são candidatos à expansão.
- Combina, de certa forma, as vantagens tanto da busca em largura como em profundidade.
- Busca onde o nó de menor custo "aparente" na fronteira do espaço de estados é expandido primeiro.
- $f(n) = g(n) + h(n)$ onde
 - $g(n)$ = custo do caminho do nó inicial até o nó n .
 - $h(n)$ = custo do caminho estimado do nó n até o nó final.
 - $f(n)$ = custo do caminho total estimado.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

62

Busca Heurística

Busca A* (A estrela)

- A* expande o nó de menor valor de f a cada instante.
- A* deve usar uma **heurística admissível**, isto é, $h(n) \leq h^*(n)$ onde $h^*(n)$ é o custo real para ir de n até o nó final.
- **Admissibilidade de A***
 - Diz-se que um método de busca é ADMISSÍVEL se ele sempre encontra uma solução e se esta solução é a de menor custo.
 - A busca em largura é admissível. O mesmo não ocorre com a busca em profundidade.
- **Teorema da Admissibilidade de A***
 - A busca A* é ótima, isto é, sempre encontra o caminho de menor custo até a meta.

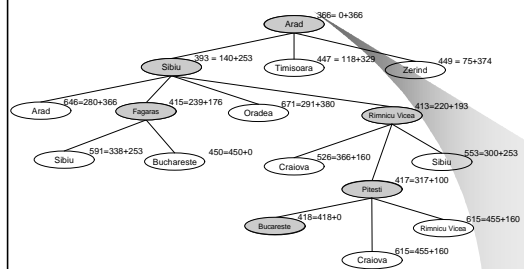
(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

63

Busca Heurística

Busca A* (A estrela)



(C) - Prof. Mauro Roisenberg

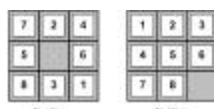
15/04/05

64

Busca Heurística

Busca A* (A estrela)

- Quanto mais admissível a heurística, menor o custo da busca.
- Exemplo: Para o jogo do oito
 - $h_1(n)$: número de peças fora do lugar
 - $h_2(n)$: distância Manhattan (número de casas longe da posição final em cada direção)



$$h_1(S) = ??$$

$$h_2(S) = ?? \quad 4+0+3+3+1+0+2+1 = 14$$

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

65

Busca Subida da Encosta (Hill climbing)

- É a estratégia mais simples e popular. Baseada na Busca em Profundidade.
- É um método de busca local que usa a ideia de que o objetivo deve ser atingido com o menor número de passos.
- A ideia heurística que lhe dá suporte é a de que o número de passos para atingir um objetivo é inversamente proporcional ao tamanho destes passos.
- Empregando uma ordenação total ou parcial do conjunto de estados, é possível dizer se um estado sucessor leva para mais perto ou para mais longe da solução. Assim o algoritmo de busca pode preferir explorar em primeiro lugar os estados que levam para mais perto da solução.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

66

Busca Subida da Encosta (Hill climbing)

- Há duas variações do método:
 - SUBIDA DE ENCOSTA SIMPLES:** Vai examinando os sucessores do estado atual e segue para o primeiro estado que for maior que o atual.
 - SUBIDA DE ENCOSTA PELA TRILHA MAIS ÍNGREME:** Examina TODOS os sucessores do estado atual e escolhe entre estes sucessores qual é o que está mais próximo da solução.
- Este método não assegura que se atinja o ponto mais alto da montanha.
- Ele assegura somente que atingido um ponto mais alto do que seus vizinhos, então encontramos uma boa solução local.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

67

Busca Subida da Encosta (Hill climbing)

Exemplo

- Achar o ponto máximo da função $f(x) = -x^2 + 30x + 10$ no intervalo $[0, 100]$.

$$\bullet \quad r+1 = (x | x < 100) \rightarrow (x+1)$$

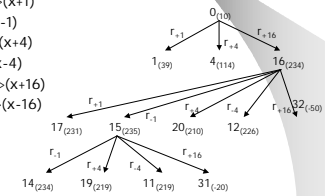
$$\bullet \quad r-1 = (x | x > 0) \rightarrow (x-1)$$

$$\bullet \quad r+4 = (x | x < 97) \rightarrow (x+4)$$

$$\bullet \quad r-4 = (x | x > 3) \rightarrow (x-4)$$

$$\bullet \quad r+16 = (x | x < 85) \rightarrow (x+16)$$

$$\bullet \quad r-16 = (x | x > 15) \rightarrow (x-16)$$



(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

68

Busca por Temperatura Simulada (Simulated Annealing)

- É adequado a problemas nos quais a subida de encosta encontra muitos platôs e máximos locais.
- Não utiliza backtracking e Não garante que a solução encontrada seja a melhor possível.
- Pode ser utilizado em problemas NP-completos.
- É inspirado no processo de tempera do aço. Temperaturas são gradativamente abaixadas, até que a estrutura molecular se torne suficientemente uniforme.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

69

Busca por Temperatura Simulada (Simulated Annealing)

- A idéia é permitir "maus movimentos" que com o tempo vão diminuindo de frequência e intensidade para poder escapar de máximos locais.
- O que o algoritmo de temperatura simulada faz é atribuir uma certa "energia" inicial ao processo de busca, permitindo que, além de subir encostas, o algoritmo seja capaz de descer encostas e percorrer platôs se a energia for suficiente.



(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

70

Jogos

- Os jogos tem atraído a atenção da humanidade, às vezes de modo alarmante, desde a antiguidade.
- O que o torna atraente para a IA é que é uma abstração da competição (guerra), onde se idealizam mundos em que agentes agem para diminuir o ganho de outros agentes. Além disso, os estados de um jogo são facilmente representáveis (acessíveis) e a quantidade de ações dos agentes é normalmente pequena e bem definida.
- A presença de um oponente torna o problema de decisão mais complicado do que os problemas de busca, pois introduz incertezas, já que não sabemos como o oponente irá agir.
- Geralmente o oponente tentará, na medida do possível, fazer o movimento menos benéfico para o adversário.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

71

Jogos

- Jogos são, geralmente, problemas muito difíceis de resolver.
 - Xadrez difícil porque muito estados
 - Fator de ramificação 35
 - Geralmente 50 movimentos para cada jogador
 - 35^{100} estados ou nós
- Limites de tempo penalizam a ineficiência;
- Não é possível fazer a busca até o fim, de modo que devemos fazer o melhor possível baseados na experiência passada.
- Deste modo, jogos são muito mais parecidos com problemas do Mundo Real do que os problemas "Clássicos" vistos até agora.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

72

Jogos

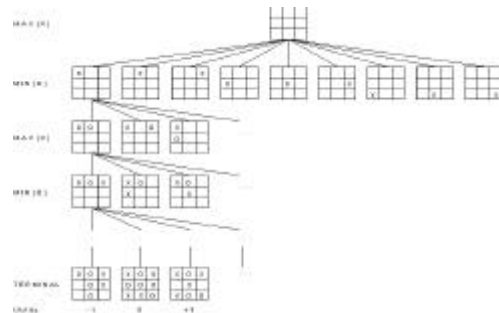
- Jogos de Duas Pessoas
 - Existem dois jogadores: MAX e MIN (MAX começa jogando).
- Jogos como um tipo de problema de busca:
 - O estado inicial;
 - Um conjunto de operadores;
 - Teste de Fim de Jogo (estados finais);
 - Função de Utilidade (payoff) - dá um resultado numérico para o resultado ou consequência de um jogo.
- Estratégia
 - Problemas de busca:
 - sequência de movimentos que levam a um estado meta
 - MIN NÃO DESEJA QUE MAX ganhe;
 - MAX achar estratégia que leve a vitória independentemente dos movimentos de MIN.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

73

Jogos



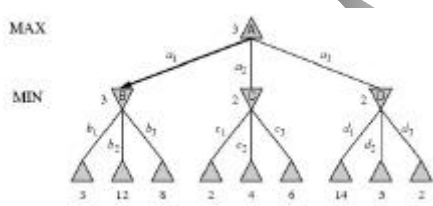
(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

74

Jogos

- 1º Exemplo: Algoritmo MINIMAX



(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

75

Jogos

- 1º. Exemplo: Algoritmo MINIMAX
 1. Gerar toda a árvore do jogo;
 2. Aplicar a função utilidade a cada nó terminal;
 3. Usar a utilidade dos nós terminais para determinar a utilidade dos nós um nível acima:
 - a) Quando acima é a vez de MIN fazer um movimento, escolher o que levaria para o retorno mínimo
 - b) Quando acima é a vez de MAX fazer um movimento, escolher o que levaria para o retorno máximo
 4. Continuar calculando os valores das folhas em direção ao nó raiz;
 5. Eventualmente é alcançado o nó raiz nesse ponto MAX escolhe o movimento que leva ao maior valor.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

76

Jogos

- Decisões Imperfeitas
 - Algoritmo MINIMAX deve procurar até alcançar um nó terminal.
 - Usualmente isso não é prático (complexidade $O(b^m)$)
 - Sugestão:
 - Parar a busca num tempo aceitável;
 - A função utilidade é substituída por uma função de avaliação heurística (EVAL), que retorna uma estimativa da utilidade esperada do jogo em uma dada posição;
 - Teste terminal por um teste de corte.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

77

Jogos

- Função de Avaliação
 - Retorna uma estimativa da utilidade do jogo a partir de uma dada posição;
 - EX: xadrez: <http://caissa.onenet.net/chess/texts/Shortcut>
 - Deve coincidir com a função de utilidade nos nós terminais;
 - Não deve ser difícil de calcular;
 - Deve refletir as chances reais de ganhar.

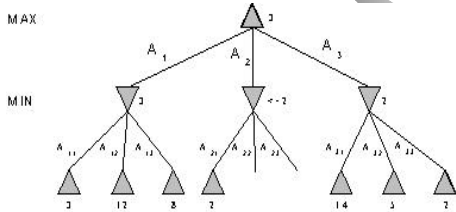
(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

78

Jogos

- Poda Alfa-Beta
 - Processo de eliminar ramos da árvore sem examiná-los.
 - MINI MAX é em profundidade
- Eficiência depende da ordem em que os sucessores são examinados.



(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

79

Representação de Conhecimento

- O Conhecimento e o Raciocínio são importantes para agentes artificiais, pois permitem comportamentos bem-sucedidos que seriam muito difíceis de alcançar de outra forma.
- Conhecimento pode ser definido como a informação armazenada, ou os modelos usados por pessoas ou máquinas para prever, interpretar e responder apropriadamente ao mundo exterior.
- A manipulação do conhecimento exige, antes, formas de representação. Esta representação deve ser suficientemente rica e completa para evitar falhas evidentes de entendimento pelo motor de inferência.
 - Exemplo:
 - Gato - é um: ser vivo + mamífero + raças + etc.
 - Logo: leão, rato, cão, etc é gato.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

80

Representação de Conhecimento

- Para que uma representação lógica seja adequada, duas condições são necessárias:
 1. Existência de uma correspondência um para um entre certas classes de símbolos da representação e conjuntos de objetos de interesse no mundo externo;
 2. Existência, para cada relação simples no mundo externo, de uma relação na representação, de tal maneira que a relação entre dois símbolos da representação seja válida se, e somente se, a relação correspondente for válida entre os objetos correspondentes do mundo externo.
- Sem essas condições temos o **Conhecimento Incerto**.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

81

Representação de Conhecimento

- É importante distinguir: **FORMA** e **CONTEÚDO**.
 - Exemplo: Um texto que usa a linguagem natural como recurso de representação pode ter, também seu conteúdo sintetizado através de outros recursos, como, por exemplo a lógica de predicados.
 - O conteúdo é o mesmo, as formas de representação diferentes facilitam a manipulação por diferentes agentes (computador, ser humano)

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

82

Representação de Conhecimento Conceitos Básicos

- O processo de raciocínio é importante, pois permite a explicitação de uma solução adequada, para um problema em particular.
- Este processo deve ser capaz de gerar novos conhecimentos a partir de conhecimentos previamente armazenados (inferência).
- Se a informação não estiver explicitamente na base, a inferência é necessária. Existe um compromisso entre a quantidade de conhecimento armazenada explicitamente na base de conhecimento e a atividade de inferência.

$$\begin{aligned} \text{Capacidade Cognitiva} \\ = \\ \text{base de conhecimento} + \text{motor de inferência} \end{aligned}$$

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

83

Representação de Conhecimento Conceitos Básicos

- **Inferência**: o raciocínio formal é utilizado em geral, nas representações baseadas em lógica. Sendo possível três tipos:
 - **Inferência Dedutiva**: a partir de elementos de conhecimento representados em forma lógica, utiliza-se uma regra de Inferência válida para inferir um novo elemento. Algumas regras de inferência utilizadas em lógica são: Modus Ponens, Modus Tollens, Silogismo Hipotético, etc.
 - **Inferência Abdutiva**: a partir de um conhecimento geral da forma $\forall x, P(x) \rightarrow Q(x)$, e tendo por objetivo provar $Q(a)$, toma-se por hipótese que a razão pela qual $Q(a)$ se verifica é a validade de $P(a)$.
 - **Inferência Indutiva**: a partir de fatos experimentais que comprovam que a cada vez que a validade de $P(a)$ é verificada, verifica-se a validade de $Q(a)$ (mas não o contrário), para diferentes elementos a , pode-se inferir por indução que é válido.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

84

Representação de Conhecimento Conceitos Básicos

- **Conhecimento:** repositório de procedimentos, heurísticas, dados, etc., que compõe o conhecimento. Assemelha-se a um banco de dados no sentido de que exige manutenção (atualizações, inserções e deleções) mas o acesso a uma informação é mais elaborado.
- **Engenheiro do Conhecimento:** o profissional de ciência da computação responsável pela implantação da base de conhecimento. É um profissional com sólidos conhecimentos em técnicas de I.A.
- **Especialista do Domínio:** é um profissional altamente capacitado no domínio para o qual estamos desenvolvendo a aplicação. Supre o engenheiro do conhecimento com os procedimentos (formais e heurísticas) necessários à construção da base de conhecimento.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

85

Representação de Conhecimento Características Essenciais

- **Consistência:** Não armazena informações conflitantes.
- **Completeness:** Não apresenta lacunas no conhecimento armazenado. Todo o conhecimento necessário para a resolução do problema está explicitamente armazenado ou pode ser determinado via inferência.
- **Coerência:** Não existem ilhas isoladas de conhecimento não se relacionam com o restante do conhecimento armazenado.
- **Redundância:** A mesma unidade de conhecimento é armazenada de forma duplicada.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

86

Representação de Conhecimento Características Desejáveis

- Boas representações explicitam as coisas importantes.
- Revelam restrições naturais, facilitando algumas classes de computações.
- São concisas, necessitando apenas de recursos mínimos e sendo ao mesmo tempo ainda eficientes quando efetuam inferências.
- Podem ser rapidamente recuperadas e armazenadas.
- Informações raramente usadas são abordadas e recuperadas apenas quando necessárias.
- Permitem uma aquisição fácil e são legíveis pelo especialista, quando for o caso.
- Permitem a aplicação dos mecanismos de inferência necessários.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

87

Representação de Conhecimento

- Principais Formas de Representação de Conhecimento
 - Sistemas de Produção
 - Redes Semânticas
 - Quadros (Frames) e Roteiros (Scripts)
 - Lógica

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

88

Representação de Conhecimento Sistemas ou Regras de Produção

- Concebidas por Emil Post (1943) quando demonstrou que um procedimento computável pode ser modelado como um sistema de produção.
- Muito utilizada nas décadas de 50 e 60. É o formalismo mais difundido de representação de conhecimento.
- Consiste em transformar o problema em um grafo de estados. Este grafo deve possuir um estado inicial e deve-se ter uma forma de identificar um estado final quando algum for atingido.
- Ou seja, consiste em:
 - Regras de Produção + Memória de Trabalho + ciclo de controle (tipo reconhece-atua)

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

89

Sistemas de Produção

- Um Sistema de Produção é definido como uma tupla $SP = \langle R, E, e_0, F \rangle$, onde R é um conjunto de regras, E é um conjunto de estados, e_0 é o estado inicial e F é o conjunto de estados finais.
- Uma Regra de Produção é constituída por um par $\langle p, f \rangle$, onde $p: E \rightarrow \{V, F\}$ e $f: E \rightarrow E$. O elemento p é o padrão da regra, e f constitui a operação. Gera normalmente estruturas do tipo:
- $SE \langle estado \rangle ENTÃO \langle ação \rangle$
onde:
 - $\langle estado \rangle$ ou $\langle condição \rangle$: estabelece um teste cujo resultado depende do estado atual da base de conhecimento. Tipicamente o teste verifica a presença ou não de certas informações na base.
 - $\langle ação \rangle$: altera o estado atual da base de conhecimento, adicionando, modificando ou removendo unidades de conhecimento presentes na base. Pode acarretar também efeitos externos à base, como por exemplo a escrita de uma mensagem no vídeo.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

90

Sistemas de Produção

- EXEMPLO: Problema dos Dois Baldes de Água
 - Enunciado:** Você recebe dois baldes de água, um de quatro litros e outro de três litros. Nenhum deles possui qualquer marcação de medida. Há uma torneira que pode ser utilizada para encher os baldes de água. Como colocar exatamente dois litros d'água dentro do balde de quatro litros?
 - Conjunto de Estados:** O espaço de estados para este problema pode ser modelado como o conjunto de pares ordenados de números naturais (x,y) tal que $x = 0, 1, 2, 3$ ou 4 e $y = 0, 1, 2$ ou 3 , onde x representa a quantidade de água no balde de 4 litros, e y representa a quantidade de água no balde de 3 litros.
 - Estado Inicial:** Ambos os baldes estão vazios: $(0,0)$.
 - Estado Final:** Constituído por todos os estados onde a qtd de água no primeiro balde é 2, ou seja: $(2,n)$, onde $n = 0, 1, 2$ ou 3 .

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

91

Sistemas de Produção

- EXEMPLO: Problema dos Dois Baldes de Água
 - Um possível conjunto de regras para este problema seria:
 - r_1 $(x,y) \times 4 \rightarrow (4,y)$ Encher o balde de 4 litros
 - r_2 $(x,y) \times 3 \rightarrow (x,3)$ Encher o balde de 3 litros
 - r_3 $(x,y) \times 0 \rightarrow (0,y)$ Esvaziar o balde de 4 litros no chão
 - r_4 $(x,y) \times 0 \rightarrow (x,0)$ Esvaziar o balde de 3 litros no chão
 - r_5 $(x,y) \times y \rightarrow (4,y-(4-x))$ Despejar água do balde de 3 litros dentro do balde de 4 litros até que este esteja cheio
 - r_6 $(x,y) \times x \rightarrow (x-(3-y),3)$ Despejar água do balde de 4 litros dentro do balde de 3 litros até que este esteja cheio
 - r_7 $(x,y) \times y \leq 4$ e $y=0 \rightarrow (x,y,0)$ Despejar toda a água do balde de 3 litros dentro do balde de 4 litros
 - r_8 $(x,y) \times x \leq 3$ e $x=0 \rightarrow (0,x,y)$ Despejar toda a água do balde de 4 litros dentro do balde de 3 litros

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

92

Sistemas de Produção

- EXEMPLO: Problema dos Dois Baldes de Água
 - Uma solução possível para o problema seria aplicar em sequência as regras r_2, r_9, r_2, r_7, r_5 e r_9 (r_2, r_5, r_2, r_5, r_3 e r_5).
 - Esta solução não é a única POSSÍVEL. Além disso, não foi mostrado como a solução foi encontrada.
 - Este é exatamente o ponto onde entram os ALGORITMOS DE BUSCA no Espaço de Estados.
- A modelagem de um problema como um sistema de produção consiste apenas em definir o espaço de estados e as regras. Este processo dificilmente poderia ser feito automaticamente. Como na programação tradicional, trata-se de um processo de modelagem de uma realidade perceptível utilizando uma ferramenta definida. Mas, UMA VEZ ESTABELECIDO O MODELO, O PROCESSO PODE SER LIBERADO PARA A MÁQUINA E ESTA ENCONTRAR SOZINHA A SOLUÇÃO.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

93

Sistemas de Produção

- Outros Exemplos:
 - Problema dos Missionários e Canibais
 - O estado inicial é $(3,3,0,0,0)$ e o único estado final é $(0,0,3,3,1)$.
 - As regras são todas de movimentação de no máximo 2 pessoas de uma margem a outra do rio. Assim, pode-se movimentar dois canibais, dois missionários, um canibal e um missionário, apenas um canibal ou apenas um missionário, tanto da margem original para a margem oposta quanto vice-versa.
 - Tem-se assim 10 regras possíveis, das quais uma é mostrada a seguir:
 $R_{MM} \rightarrow \text{Se}(m_1, c_1, m_2, c_2, 0) | (m_1 \geq 2) \text{ e } [m_1 - 2 \geq c_1] \text{ ou } (m_1 - 2 = 0)] \text{ e } (m_2 + 2 \geq c_2)) \text{ Então } (m_1 - 2, c_1, m_2 + 2, c_2, 1)$
 - Exercício: Ache as outras regras.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

94

Sistemas de Produção

- O problema das Três Jarras
 - Há três jarras de vinho com capacidade para oito, cinco e três litros. A jarra maior maior está cheia de vinho e as outras estão completamente vazias. Queremos dividir o vinho em porções iguais entre as duas primeiras jarras de modo que cada uma fique com 4 litros.
 - Exercício: Ache as regras deste sistema de produção.
- MYCIN
 - IF
 - A infecção é principalmente por bactérias, e
 - O local da cultura é um dos locais esterilizados, e
 - O local suspeito de entrada do organismo é p trato gastro-intestinal
 - Then
 - Existe uma evidência sugestiva (0.7) de bacteróide.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

95

Sistemas de Produção

- DENDRAL
 - IF
 - O espectro para as moléculas apresenta dois picos de massas X_1 e X_2 , tal que:
 - $X_1 + X_2 = M + 28$, e
 - $X_1 - 28$ é um pico alto, e
 - $X_2 - 28$ é um pico alto, e
 - Pelo menos X_1 ou X_2 são altos,
 - Then
 - A molécula contém um grupo cetona.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

96

Sistemas de Produção

5. JOGO DA PILHA DE PALITOS

```

: RULE good-human-move
: IF
:   There is a pile of sticks, and
:   The human has chosen how many
:   sticks to take, and
:   It is the human's move, and
:   The human's choice is valid
: THEN
:   Remove unneeded information, and
:   Compute the new pile size, and
:   Update the pile size, and
:   Print the number of sticks left in
:   the stack, and
:   Trigger the computer player's turn

: RULE computer-move
: IF
:   It is the computer's move, and
:   The pile size is greater than 1, and
:   The computer's response is available
: THEN
:   Remove unneeded information, and
:   Compute the new pile size, and
:   Print the number of sticks left in the
:   stack, and
:   Update the pile size, and
:   Trigger the human player's move
    
```

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

97

Sistemas de Produção

VANTAGENS

- Modularidade: podem ser considerados como peças independentes. Novas regras podem ser acrescentadas ao conjunto já existente sem maiores preocupações.
- Naturalidade: pode ser considerada uma forma natural de pensar a descrição de conhecimentos.
- Uniformidade: todas as regras são escritas seguindo o mesmo padrão. Permite que pessoas não familiarizadas com o sistema possam também analisar seu conteúdo.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

98

Sistemas de Produção

DESVANTAGENS

- Opacidade: é difícil verificar a completeza destes sistemas, bem como verificar os possíveis fluxos de processamento.
- Ineficiência: resulta particularmente do número de regras a combinar e também do esforço do matching necessário ao suporte de execução das regras. (matching entende-se como a verificação das regras que se aplicam ao estado do problema)
- Não raciocinam em vários níveis.
- Não sabem como e quando violam suas próprias regras.
- Não tem acesso ao raciocínio que está por trás das regras.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

99

Representação de Conhecimento Redes Semânticas

- Consiste em um conjunto de nodos conectados por um conjunto de arcos.
 - Os nodos, em geral, representam objetos.
 - Os arcos representam relações binárias entre os objetos.
- Originalmente foram usadas para suporte a linguagem natural. Em 1968 Ross Quillian as usou para representar modelos psicológicos de memória humana chamado memórias semânticas.
- Quillian desenvolveu um programa que define palavras em inglês de forma similar a dicionários.
 - Em vez de definir palavras formalmente, cada definição simplesmente conduz a outras definições em uma forma desestruturada e, possivelmente circular.
 - Ao procurar uma palavra, percorremos a "rede" até que estejamos satisfeitos com o que compreendemos da palavra original.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

100

Redes Semânticas

Redes Semânticas Elementares

- Usa-se nodos para representar substantivos, adjetivos, pronomes e nomes próprios.
- Os arcos são reservados basicamente para representar verbos transitivos e preposições.
- Exemplo: "O cão corre atrás do gato"



- Pode-se generalizar também a relação entre eles, representando os indivíduos específicos com nodos anônimos e indicando a inclusão destes indivíduos em sua respectiva classe, através da relação "é um".

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

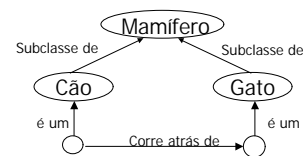
15/04/05

101

Redes Semânticas

Redes Semânticas Elementares

- Relações de inclusão entre classes são representadas por relações "subclasse-de".
- Os nodos rotulados representam classes genéricas, enquanto que os nodos anônimos representam indivíduos específicos.
- Para saber se um nodo representa uma instância, é só observar se ele está na origem de algum arco do tipo "é um".



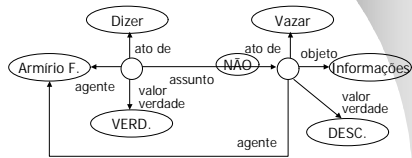
(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

102

Redes Semânticas

- Redes Semânticas com Valores de Verdade
 - Pode ser necessário representar fatos dos quais não se conhece o valor de verdade, ou mesmo, fatos que sabemos serem falsos. Uma maneira de fazê-lo é rotulando cada nó-predicado com um valor VERDADEIRO, FALSO ou DESCONHECIDO.
 - "Armírio Fraga disse que não vazou informações privilegiadas."



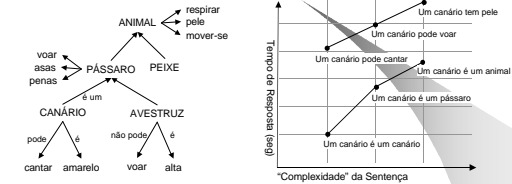
(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

103

Redes Semânticas

Collins e Quillian (1969)



Além da habilidade de associar conceitos, os humanos também organizam hierarquicamente o seu conhecimento, de forma que a informação seja mantida em níveis apropriados mais altos da taxonomia.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

104

Representação de Conhecimento

Quadros (Frames) e Roteiros (Scripts)

- Os Quadros ou Cenários ("Frames"), e sua variação, os roteiros ("Scripts"), foram introduzidos para permitir a expressão das estruturas internas dos objetos, mantendo a possibilidade de representar herança de propriedades.
- As pessoas, ao enfrentarem uma nova situação, guardam o repertório do comportamento para situações similares. Alguém que já assistiu alguma vez a um júri popular sabe que tipo de "quadro" irá encontrar se for a outro. (juiz, auxiliar de justiça, réu, advogado de defesa, promotor, etc.)
- Idéias fundamentais introduzidas por Marvin Minsky em 1975 ("A framework to represent knowledge").
- Está na origem das idéias que levaram as linguagens de programação orientadas a objetos.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

105

Quadros (Frames)

- Minsky (1975):** "Quando alguém encontra uma nova situação (ou modifica substancialmente o seu entendimento sobre um problema), recupera da memória uma estrutura chamada 'frame'. Esta estrutura é um arcabouço memorizado que deve ser adaptado para se adequar a realidade, alterando detalhes, conforme a necessidade"
- Um quadro consiste em um conjunto de atributos ("slots") que através de seus valores, descrevem as características do objeto representado pelo quadro.
- Os valores atribuídos aos atributos podem ser, além dos valores do objeto em particular, valores default, ponteiros para outros quadros, e conjuntos de regras de procedimento que podem ser implementados.
- Se os valores dos atributos forem apontadores para outros quadros, cria-se uma rede de dependências entre os quadros.
- Os conjuntos de procedimentos indicam que procedimento deve ser executado quando certas condições forem satisfeitas, por exemplo: ao ser criado o atributo, ao ser lido o valor do atributo, ao ser modificado o valor do atributo, ou ao ser destruído o valor do atributo.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

106

Quadros (Frames)

- Os quadros também são organizados em uma hierarquia de especialização, criando outra dimensão de dependência entre eles (herança). Permite a especificação de propriedades de uma classe de objetos através da declaração de que esta classe é uma subclasse de outra que goza da propriedade em questão.
- O processo de herança e instanciação favorece a reutilização de código evitando definições repetitivas e aproveitando funções de acesso definidas para as facetas se-lido, se-escrito, se-necessário, etc
- Deve-se notar que as estruturas de quadros são ativas, pois sua manipulação causa o disparo automático das facetas.
- São úteis para domínio de problemas onde a forma e o conteúdo do dado desempenham um papel importante na solução do problema.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

107

Quadros (Frames)

- Exemplo**
 - Quadro: Cadeira
 - Slot: número de pernas - inteiro (default: 4)
 - Slot: tipo-de-encosto - curvo, reto, não-tem (default: curvo)
 - Slot: tipo-de-assento - redondo, anatômico, reto (default: anatômico)
 - Slot: número-de-braços - 2,1,0 (default: 0)
 - Slot: cor - preta, branca, incolor, azul (default: incolor)
 - Quadro: Cadeira-do-Renato
 - É-UM Cadeira
 - Slot: número de pernas - 4
 - Slot: tipo-de-encosto - (default: curvo)
 - Slot: tipo-de-assento - redondo
 - Slot: número-de-braços - 0
 - Slot: cor - (default: incolor)

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

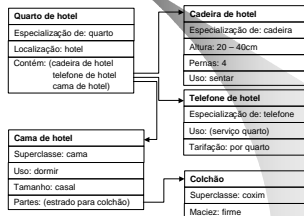
15/04/05

108

Quadros (Frames)

- Parte de uma descrição por frame de um quarto de hotel.
- Cada frame individual pode ser visto como uma estrutura de dados.

- Slots do frame contém:
- Identificação frame
 - Relação com outros frames
 - Descritores de requisitos (altura do acento)
 - Informação sobre uso
 - Informação default (cadeira tem 4 pernas)



(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

109

Quadros (Frames)

- Quadros superam o poder das redes semânticas pois permitem que objetos complexos sejam representados como um único frame, em vez de uma grande estrutura de rede.
- Os frames tornam mais fácil organizar o conhecimento hierarquicamente.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

110

Roteiros (Scripts)

- Originalmente concebido por Schank e seu grupo de pesquisa (1977).
- Pesquisa em roteiros examina a organização do conhecimento na memória e o papel que esta organização desempenha no raciocínio.
- São estruturas semelhantes aos quadros que descrevem seqüências estereotipadas de eventos em contextos particulares.
- A principal diferença que se pode estabelecer em relação aos quadros fica a nível das estruturas adotadas.
- Os eventos descritos formam uma cadeia causal.
- O início da cadeia é o conjunto de condições de entrada que permite a possibilidade de ocorrência do primeiro evento do roteiro.
- O fim da cadeia é o conjunto de resultados que permitirá a ocorrência de eventos posteriores.
- O raciocínio com roteiros serve especialmente para verificar se determinado evento ocorreu e também para verificar a relação entre os eventos, o que pode ser conseguido pelo exame da cadeia causal.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

111

Roteiros (Scripts)

Exemplo

Roteiro: comer-em-restaurante

Apoio: (restaurante, dinheiro, alimento, menu, mesas, cadeiras)

Funções: (pessoas com fome, encontro de pessoas)

Ponto-de-vista: (pessoas com fome)

Tempo-de-ocorrência: (tempo-de-operação do restaurante)

Lugar-de-ocorrência: (localização do restaurante)

Seqüência-de-eventos

primeiro : Inicie o roteiro entrada-no-restaurante

então: Se (há-convite-para-sentar ou reservas) então siga roteiro orientação-do-garçom

então: siga roteiro aguarde-sentado

então: siga roteiro solicite-comida

então: siga roteiro comer, a menos que haja uma longa espera, caso em que seguirá o roteiro sai-do-restaurante-furioso.

- Outros Roteiros: refeição rápida (fast-food).

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

112

Representação de Conhecimento

Lógica

- Estudo das regras do raciocínio válido.
- Pode ser usada para representar conhecimento.
- O formalismo lógico parece atraente, pois, recorrendo-se à dedução matemática somos capazes de derivar novos conhecimentos a partir de outros já existentes.
- **Lógica das Proposições**
 - Proposições são afirmações que admitem um valor lógico, "verdadeiro" ou "falso".
 - Seja, por exemplo, uma fbf do cálculo proposicional:
 - cor(gato,preto).
 - Pode ter valor verdadeiro ou falso dependendo se o gato em questão é ou não preto.
 - Na representação do conhecimento, ela representa um fato e é suposta verdadeira no mundo que representa.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

113

Lógica

- **Lógica dos Predicados**
 - A capacidade de representação da lógica das proposições é pequena, a lógica dos predicados apresenta uma capacidade bastante ampliada neste sentido.
 - A lógica dos predicados inclui funções, variáveis, quantificadores e predicados.
 - É indecidível, ou seja, existem procedimentos que encontrarão a prova de um teorema proposto, se de fato houver o teorema, mas não há a garantia de parar se a afirmação proposta não for um teorema.
 - Pode também ser usada para representar conhecimento. Seja o exemplo: $\forall(x,y,z)(\text{filho}(x,y) \wedge (\text{filho}(y,z) \rightarrow \text{neto}(x,z)))$
 - Esta fbf encerra o que se pode chamar de regra.
 - Esta regra é suposta verdadeira no mundo considerado.
 - Pode-se interpretar a regra como a definição de "neto" na nossa linguagem.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

114

Lógica

- A lógica separa entre si a representação e o procedimento, tornando difícil incluir aspectos heurísticos. Isto faz com que sua aplicação a problemas grandes complique.
- A representação de conhecimento usando Lógica usa fbfs da Lógica de Primeira Ordem e a todas elas é dado o valor de verdade verdadeiro, formando uma base de regras e fatos e constituindo a Base de Conhecimentos. Um mecanismo externo a esta base irá manipulá-la, com regras de inferência (ex. modus ponens) para resolver o problema desejado.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

115

Lógica

- Calabar foi enforcado; -Enforcado(Calabar);
- Getúlio foi presidente; -presidente(Getúlio);
- Todo traidor é enforcado; $\neg \forall x \text{ traidor}(x) \Rightarrow \text{enforcado}(x)$;
- Todos os índios eram selvagens; $\neg \forall x \text{ indio}(x) \Rightarrow \text{selvagem}(x)$;
- Tiradentes não era índio; $\neg \text{indio}(\text{Tiradentes})$;
- Tiradentes foi considerado traidor. -traidor(Tiradentes).
- As representações ocasionaram a perda de informações, como é o caso dos tempos das ocorrências dos fatos.
- Podemos inferir que Tiradentes foi enforcado, mas não podemos inferir que Calabar era um traidor.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

116

Lógica Clássica Introdução

- Importância como teoria matemática.
- Adequada como método de representação de conhecimento.
- É O SISTEMA FORMAL MAIS SIMPLES DE QUE APRESENTA UMA TEORIA SEMÂNTICA INTERESSANTE DO PONTO DE VISTA DA REPRESENTAÇÃO DO CONHECIMENTO.
- Ainda hoje grande parte da pesquisa em IA está ligada direta ou indiretamente à Lógica.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

117

Lógica Clássica Introdução

- De maneira geral um sistema lógico consiste em um conjunto de fórmulas e um conjunto de regras de inferência.
- As fórmulas são sentenças pertencentes a uma linguagem formal cuja sintaxe é dada.
- A parte de lógica que estuda os valores de verdade é chamada teoria de modelos.
- Uma regra de inferência é uma regra sintática que quando aplicada repetidamente a uma ou mais fórmulas verdadeiras gera apenas novas fórmulas verdadeiras.
- A sequência de fórmulas geradas através da aplicação de regras de inferência sobre um conjunto de inicial de fórmulas é chamada de prova.
- A parte de lógica que estuda as provas é chamada teoria de provas.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

118

Lógica Clássica Introdução

- Gödel e Herbrand na década de 30 mostraram que qualquer fórmula verdadeira pode ser provada.
- Church e Turing em 1936 mostraram que não existe um método geral capaz de decidir, em um número finito de passos, se uma fórmula é verdadeira.
- Um dos primeiros objetivos da IA foi a Prova Automática de Teoremas, a partir da segunda metade da década de 60, sendo que a partir daí a lógica passou a ser estudada com método computacional para a solução de problemas.
- O método explora o fato de expressões lógicas poderem ser colocadas em formas canônicas (apenas com operadores "e", "ou" e "não"). O resultado permite a manipulação computacional bastante eficiente.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

119

Lógica Clássica Introdução

- Teoria da Resolução de Robinson - 1965. Transforma a expressão a ser provada para a forma normal conjuntiva ou forma clausal. Existe uma regra de inferência única, chamada regra da resolução. Utiliza um algoritmo de casamento de padrões chamado algoritmo de unificação.
- Base para a Linguagem Prolog.
- Recentemente Lógicas Não-Padrão ou Não-Clássicas tem sido cada vez mais utilizadas, não somente em IA. Lógica Temporal tem sido utilizada em estudos de programas concorrentes.
- Em IA estas lógicas vem sendo usadas para tratamento de imprecisão, informações incompletas e evolução com o tempo em que evolui o programa de IA.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

120

Lógica Proposicional Introdução

- A Lógica das Proposições se interessa pelas SENTENÇAS DECLARATIVAS, as PROPOSIÇÕES, que podem ser Verdadeiras ou Falsas.
- No âmbito da IA, a lógica permite a representação de conhecimento e o processo de raciocínio para um sistema inteligente.
- Como uma linguagem para representação de conhecimento no computador, ela deve ser definida em dois aspectos, A SINTAXE e a SEMÂNTICA.
- A SINTAXE de uma linguagem descreve as possíveis configurações que podem constituir sentenças.
- A SEMÂNTICA determina os fatos do mundo aos quais as sentenças se referem, ou seja, ou sistema "acredita" na sentença correspondente.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

121

Lógica Proposicional

- Sintaxe do Cálculo Proposicional
 - Elementos Válidos:
 - Letras Sentenciais - P, Q, R, S, T, A1, b3, C, etc.
 - Conectivos ou Operadores Lógicos:
 - Negação - não é o caso que (\neg) (\neg)
 - Conjunção - e ($\&$) (\wedge)
 - Disjunção - ou (\vee)
 - Condicional ou implicação: se ...então (\rightarrow) (\Rightarrow)
 - Bicondicional: se e somente se (\leftrightarrow) (\Leftrightarrow)
 - Parênteses
 - (,)

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

122

Lógica Proposicional

- Sintaxe do Cálculo Proposicional
 - Tendo já apresentado a lista de símbolos primitivos, quanto a combinação deles, há apenas 3:
 - Uma letra sentencial sozinha é gramaticalmente correta ou uma fórmula bem formada.
 - Se qualquer fórmula **A** (tal como (PVQ)) é bem formada, então também o é sua negação $\neg A$ ($\neg(PVQ)$ neste caso).
 - Se **A** e **B** são fórmulas bem formadas, então também o são $(A \wedge B)$, $(A \vee B)$ e $(A \rightarrow B)$.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

123

Lógica Proposicional

- Semântica do Cálculo Proposicional
 - Uma fbf pode ter uma interpretação a qual define a semântica da linguagem. Uma interpretação pode ser considerada como um mapeamento do conjunto das fbf's para um conjunto de valores de verdade {V, F} ou {Verdadeiro, Falso}.
 - Símbolos Proposicionais
 - podem ter qualquer significado
 - Símbolos constantes
 - verdadeiro: como o mundo é
 - falso: como o mundo não é
 - Sentenças complexas: o significado é derivado das partes
 - Conectivos: podem ser pensados como funções nas quais entram dois valores verdade e sai um

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

124

Lógica Proposicional

- Semântica do Cálculo Proposicional
 - TABELA VERDADE

P	Q	$\neg P$	$\neg Q$	$P \vee Q$	$P \wedge Q$	$P \rightarrow Q$
V	V	F	F	V	V	V
V	F	F	V	V	F	F
F	V	V	F	V	F	V
F	F	V	V	F	F	V

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

125

Lógica Proposicional

- Tabelas Verdade
 - Elas fornecem um teste rigoroso e completo para a validade ou invalidade de formas de argumento da lógica proposicional, além de se constituir em um algoritmo. Quando existe um algoritmo que determina se as formas de argumento expressáveis em um sistema formal são válidas ou não, esse sistema é dito DECIDÍVEL. Desta forma, elas garantem a decidibilidade da lógica proposicional.
 - Uma forma de argumento é válida se e somente se todas as suas instâncias são válidas.
 - Uma instância de uma forma é válida se é impossível que a sua conclusão seja falsa enquanto as suas premissas são verdadeiras.
 - Se a forma for válida, então qualquer instância dela deve ser igualmente válida. Daí podemos utilizar a Tabela-Verdade para estabelecer a validade não só de argumentos, mas também de argumentos específicos.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

126

Lógica Proposicional

- Traduzindo fatos do mundo real para proposições
 - Exemplo: Encontrar a proposição que traduz a seguinte declaração do mundo real:

"Você não pode andar de patins se você tem menos do que 1,20 m e não ser que você tenha mais do que 16 anos".
 - Definindo:
 - P=você pode andar de patins
 - Q=você tem menos de 1,2 metros
 - R=você tem mais de 16 anos
 - A sentença pode ser escrita formalmente como:
 - $(Q \wedge \neg R) \rightarrow \neg P$

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

127

Lógica Proposicional

- Tabela-Verdade

P	Q	R	P	R	$(Q \wedge \neg R)$	$(Q \wedge \neg R) \rightarrow P$
F	F	F	V	V	F	V
F	F	V	V	F	F	V
F	V	F	V	V	V	V
F	V	V	V	F	F	V
V	F	F	F	V	F	V
V	F	V	F	F	F	V
V	V	F	F	V	V	F
V	V	V	F	F	F	V

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

128

Lógica Proposicional

- Tabelas Verdade para Formas de Argumento
 - Tabelas-Verdade podem ser usadas, não apenas para definir a semântica dos conectivos, mas também para testar a validade de sentenças.
 - A Rainha ou a Princesa comparecerá à cerimônia.
 - A Princesa não comparecerá.
 - Logo, a Rainha comparecerá.

$R \vee P, \emptyset P \vdash R$

P	R	$\emptyset P$	$R \vee P$	R	$((R \vee P) \wedge \emptyset P) \rightarrow R$
V	V	F	V	V	V
V	F	F	V	F	V
F	V	V	V	V	V
F	F	V	F	F	V

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

129

Lógica Proposicional

- Tabelas Verdade
 - As Tabelas-Verdade garantem a decidibilidade da lógica proposicional, porém elas são enfadonhas e ineficazes (NP-COMPLETAS) para um número muito grande de fórmulas-atômicas.
- Uma sentença pode ser verdadeira ou falsa dependendo da semântica e do estado do mundo.
- Raciocínio ou Inferência
 - processo pelo qual conclusões são alcançadas
- Sentenças válidas ou necessariamente verdadeiras
 - é verdadeira baixo todas as possíveis interpretações do mundo
 - Ex.: Hoje vai chover ou hoje não vai chover.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

130

Lógica Proposicional

- Regras de Inferência
- 1. Modus Ponens (MP)
 - De um condicional e seu antecedente, podemos inferir o seu conseqüente.
 - $A \rightarrow B, A \vdash B$
- 2. Eliminação da Negação ($\neg E$)
 - De uma fbf $\neg(\neg A)$, podemos inferir A.
 - $\neg(\neg A) \vdash A$
- 3. Introdução da Conjunção ($\wedge I$)
 - De quaisquer fbfs A e B podemos inferir $A \wedge B$.
 - $A, B \vdash A \wedge B$

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

131

Lógica Proposicional

- 4. Eliminação da Conjunção ($\wedge E$)
 - De uma conjunção podemos inferir qualquer uma de suas sentenças.
 - $A \wedge B \vdash A$
- 5. Introdução da Disjunção ($\vee I$)
 - De uma fbf A, podemos inferir a disjunção de A com qualquer fbf.
 - $A \vdash A \vee B$
- 6. Eliminação da Disjunção ($\vee E$)
 - De fbfs da forma $A \vee B, A \rightarrow C$ e $B \rightarrow C$, podemos inferir C.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

132

Lógica Proposicional

7. Introdução do Bicondicional (\leftrightarrow)
 - De quaisquer fbfs da forma $A \rightarrow B$ e $B \rightarrow A$, podemos inferir $A \leftrightarrow B$.
8. Eliminação do Bicondicional (\leftrightarrow)
 - De uma fbf da forma $A \leftrightarrow B$, podemos inferir $A \rightarrow B$ e $B \rightarrow A$.
9. Prova do Condicional (PC)
 - Dada uma derivação de uma fbf B a partir de uma hipótese A, podemos descartar a hipótese e inferir $A \rightarrow B$. A Prova do Condicional é também chamada Teorema da Dedução e é normalmente utilizada se o conseqüente é da forma $A \rightarrow B$.
10. Redução ao Absurdo (RAA)
 - Dada uma derivação de uma contradição a partir de uma hipótese A, podemos descartar a hipótese e inferir $\neg A$.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

133

Lógica Proposicional

- Regras Derivadas de Inferência
1. Modus Tollens (MT)
 - De fbfs da forma $A \rightarrow B$ e $\neg B$, infere-se $\neg A$.
 2. Silogismo Hipotético (SH)
 - De fbfs da forma $A \rightarrow B$ e $B \rightarrow C$, infere-se $A \rightarrow C$.
 3. Regra da Absorção (ABS)
 - De fbfs da forma $A \rightarrow B$, infere-se $A \rightarrow (A \wedge B)$.
 4. Regra do Dilema Construtivo (DC)
 - De fbfs da forma $A \vee B$, $A \rightarrow C$ e $B \rightarrow D$, infere-se $C \vee D$.
 5. Regra da Repetição (RE)
 - De fbf da forma A, infere-se A.
 6. Regra do Silogismo Disjuntivo (SD)
 - De fbfs da forma $A \vee B$ e $\neg A$, infere-se B.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

134

Lógica Proposicional

- Árvore de Refutação
 - São uma outra maneira de garantir a decidibilidade da Lógica Proposicional.
 - REGRAS PARA ÁRVORE DE REFUTACÃO
1. Inicia-se colocando-se as PREMISSAS e a NEGAÇÃO DA CONCLUSÃO.
(A idéia é encontrar contradições de modo a poder concluir a validade da conclusão.)
 2. Aplica-se repetidamente uma das regras a seguir:
 - 2.1. Negação (\neg): Se um ramo aberto contém uma fórmula e sua negação, coloca-se um "X" no final do ramo, de modo a representar um ramo fechado.
(um ramo termina se ele se fecha ou se as fórmulas que ele contém são apenas fórmulas-atômicas ou suas negações, tal que mais nenhuma regra se aplica às suas fórmulas. Desta forma tem-se um ramo fechado, que é indicado por um X, enquanto o ramo aberto não é representado por um X.)

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

135

Lógica Proposicional

- Árvore de Refutação
- 2.2. Negação Negada ($\neg \neg$): Se um ramo aberto contém uma fórmula não tificada da forma $\neg \neg \emptyset$, tica-se $\neg \neg \emptyset$ e escreve-se \emptyset no final de cada ramo aberto que contém $\neg \neg \emptyset$ tificada.
 - 2.3. Conjunção (\wedge): Se um ramo aberto contém uma fórmula não tificada da forma $\emptyset \wedge \beta$, tica-se, $\emptyset \wedge \beta$ e escreve-se \emptyset e β no final de cada ramo aberto que contém $\emptyset \wedge \beta$ tificada.

$P \vee Q \vdash \emptyset \vee P$
 1. $P \vee Q$
 2. $\emptyset \vee P$
 3. P
 4. Q
 5. $\emptyset \vee P$
 6. X

A árvore de refutação está COMPLETA, isto é, com todos os ramos fechados, logo, a busca de uma refutação para o argumento de negar a conclusão falhou, pois só encontrou CONTRADIÇÕES, e portanto, a FORMA É VÁLIDA.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

136

Lógica Proposicional

- Árvore de Refutação
- 2.4. Conjunção Negada ($\neg \wedge$): Se um ramo aberto contém uma fórmula não tificada da forma $\neg (\emptyset \wedge \beta)$, tica-se, $\neg (\emptyset \wedge \beta)$ e BI FURCA-SE o final de cada ramo aberto que contém $\neg (\emptyset \wedge \beta)$ tificada, no final do primeiro ramo se escreve $\neg \emptyset$ e no final do segundo ramo se escreve $\neg \beta$.

$\emptyset (P \vee Q) \vdash \emptyset P \vee \emptyset Q$

1. $\emptyset (P \vee Q)$
 2. $\emptyset (P \vee Q)$
 3. $\emptyset P (1 \vee \emptyset)$ $\emptyset Q (1 \vee \emptyset)$
 4. $\emptyset \emptyset P (2 \vee \emptyset)$ $\vee \emptyset \emptyset P (2 \vee \emptyset)$ $\emptyset \emptyset Q (2 \vee \emptyset)$
 5. X (3,4 \emptyset) $Q (4 \emptyset \emptyset)$ P (4 $\emptyset \emptyset$) X (3,4 \emptyset)

O exemplo acima nos mostra que há dois ramos abertos, conseqüentemente a fórmula é inválida, o que significa que estes ramos são contra-exemplos.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

137

Lógica Proposicional

- Árvore de Refutação
- 2.5. Disjunção (\vee): Se um ramo aberto contém uma fórmula não tificada da forma $\emptyset \vee \beta$, tica-se, $\emptyset \vee \beta$ e BI FURCA-SE o final de cada ramo aberto que contém $\emptyset \vee \beta$ tificada, no final do primeiro ramo se escreve \emptyset e no final do segundo ramo se escreve β .

$P \vee Q, P \vdash \emptyset Q$

1. $P \vee Q$
 2. P
 3. $\emptyset \vee Q$
 4. $Q (3 \vee \emptyset)$
 5. P (1 \vee) Q (1 \vee)

O exemplo acima nos mostra que há dois ramos abertos, conseqüentemente a fórmula é inválida, o que significa que estes ramos são contra-exemplos.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

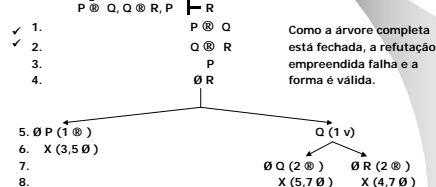
15/04/05

138

Lógica Proposicional

Árvore de Refutação

2.6. Condicional (\rightarrow): Se um ramo aberto contém uma fórmula não tificada da forma $\emptyset \rightarrow \beta$, tica-se, $\emptyset \rightarrow \beta$ e BI FURCA-SE o final de cada ramo aberto que contém $\emptyset \rightarrow \beta$ tificada, no final do primeiro ramo se escreve $\neg \emptyset$ e no final do segundo ramo se escreve β .



(C) - Prof. Mauro Roisenberg

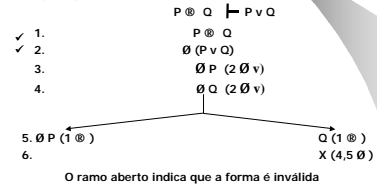
15/04/05

139

Lógica Proposicional

Árvore de Refutação

2.7. Disjunção Negada ($\neg \vee$): Se um ramo aberto contém uma fórmula não tificada da forma $\neg (\emptyset \vee \beta)$, tica-se, $\neg (\emptyset \vee \beta)$ e ESCRIVE-SE $\neg \emptyset$ e $\neg \beta$ no final de cada ramo aberto que contém $\neg (\emptyset \vee \beta)$ tificada.



(C) - Prof. Mauro Roisenberg

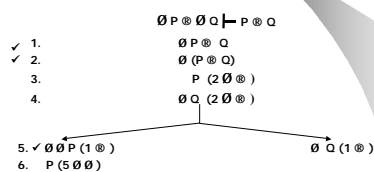
15/04/05

140

Lógica Proposicional

Árvore de Refutação

2.8. Condicional Negado ($\neg \rightarrow$): Se um ramo aberto contém uma fórmula não tificada da forma $\neg (\emptyset \rightarrow \beta)$, tica-se, $\neg (\emptyset \rightarrow \beta)$ e ESCRIVE-SE \emptyset e $\neg \beta$ no final de cada ramo aberto que contém $\neg (\emptyset \rightarrow \beta)$ tificada.



(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

141

Lógica Proposicional

Árvore de Refutação

2.9. Bicondicional (\leftrightarrow): Se um ramo aberto contém uma fórmula não tificada da forma $\emptyset \leftrightarrow \beta$, tica-se, $\emptyset \leftrightarrow \beta$ e BI FURCA-SE o final de cada ramo aberto que contém $\emptyset \leftrightarrow \beta$ tificada, no final do primeiro ramo se escreve \emptyset e $\neg \beta$ e no final do segundo ramo se escreve $\neg \emptyset$ e β .

2.10. Bicondicional Negado ($\neg \leftrightarrow$): Se um ramo aberto contém uma fórmula não tificada da forma $\neg (\emptyset \leftrightarrow \beta)$, tica-se, $\neg (\emptyset \leftrightarrow \beta)$ e BI FURCA-SE o final de cada ramo aberto que contém $\neg (\emptyset \leftrightarrow \beta)$ tificada, no final do primeiro ramo se escreve \emptyset e $\neg \beta$ e no final do segundo ramo se escreve $\neg \emptyset$ e β .

$P \leftarrow Q, \emptyset P \vdash \emptyset Q$

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

142

Lógica de Primeira Ordem

Introdução

- A Lógica das Proposições tem um poder de representação limitado.
- Na Lógica Proposicional se utiliza apenas sentenças completas, isto é, as proposições para representar o conhecimento sobre o Mundo.
- A Lógica de Primeira Ordem ou Lógica dos Predicados, ou Cálculo dos Predicados, é uma extensão da Lógica das Proposições em que se consideram variáveis e quantificadores sobre as variáveis.
- A Lógica dos Predicados se preocupa em introduzir noções lógicas para expressar qualquer conjunto de fatos através de Classes de Atributos e de Quantificadores.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

143

Lógica de Primeira Ordem

Introdução

- Lógica de Primeira Ordem considera o mundo com:

- Objetos (casas, cores, etc.)
- Relações (maior que, dentro, tem cor, etc.)
- Propriedades (vermelho, redondo, etc.)
- Funções (pai de, melhor amigo, etc.)

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

144

Lógica de Primeira Ordem

- Quantificadores:
 - São operadores lógicos que em vez de indicarem relações entre sentenças, expressam relações entre conjuntos designados pelas classes de atributos lógicos.
 - Quantificador Universal (\forall):
 - Este tipo de quantificador é formado pelas expressões "todo" e "nenhum".
 - Quantificador Existencial (\exists):
 - Este tipo de quantificador é formado pelas expressões "existe um", "existe algum", "pelo menos um" ou "para algum".

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

145

Lógica de Primeira Ordem

- Quantificadores:
 - Exemplos:
 - Todo homem é mortal, ou seja, qualquer que seja x (do Universo), se x é Homem, então x é Mortal.
 - $\forall x (H(x) \rightarrow M(x))$.
 - Nenhum homem é vegetal, ou sejam qualquer que seja x , se x é Homem, em x NÃO É Vegetal.
 - $\forall x (H(x) \rightarrow \neg V(x))$.
 - Pelo menos um homem é inteligente, ou seja, existe pelo menos um x em que x seja Homem e x seja Inteligente.
 - $\exists x (H(x) \wedge I(x))$

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

146

Lógica de Primeira Ordem

- Variáveis:
 - Designam objetos "desconhecidos" do Universo. "Alguém". São normalmente representados por letras minúsculas de "u" a "z".
- Letras Nominais:
 - Designam objetos "conhecidos" do Universo. "João", "Pedro", etc. São normalmente representados por letras minúsculas de "a" a "t".
- Predicados:
 - Descrevem alguma coisa ou característica de um ou mais objetos. São normalmente denotados por letras maiúsculas.
 - João ama Maria: $A(a,b)$
 - João ama alguém: $\exists x A(a,x)$
 - João ama todo mundo: $\forall x A(a,x)$

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

147

Lógica de Primeira Ordem

- Regras de Inferência para o Cálculo de Predicados
 - Todas as regras definidas no Cálculo Proposicional continuam válidas no Cálculo de Predicados, apenas referenciando-as para os quantificadores.
 - Ex.: $\neg F(a) \vee \exists x F(x), \exists x F(x) \rightarrow P \vdash \neg F(a) \rightarrow P$.
- Prova:
- | | |
|------------------------------------|----------|
| 1. $\neg F(a) \vee \exists x F(x)$ | Premissa |
| 2. $\exists x F(x) \rightarrow P$ | Premissa |
| 3. $F(a)$ | Hipótese |
| 4. $\neg \neg F(a)$ | 3 DN |
| 5. $\exists x F(x)$ | 1,3 SD |
| 6. P | 2,5 MP |
| 7. $F(a) \rightarrow P$ | 3,6 PC |

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

148

Lógica de Primeira Ordem

- Regras de Inferência para o Cálculo de Predicados
 - Intercâmbio de Quantificadores
 - $\neg(\forall x \neg F(x)) = \exists x F(x)$
 - $\neg(\exists x F(x)) = \forall x \neg F(x)$
 - $\forall x \neg F(x) = \neg(\exists x F(x))$
 - $\forall x F(x) = \neg(\exists x \neg F(x))$
- $\forall x \neg \text{GostarPagar}(x, \text{Impostos}) \equiv \neg \exists x \text{GostarPagar}(x, \text{Impostos})$
- Como \forall é na verdade uma conjunção sobre o universo de objetos e o \exists é uma disjunção, não é surpreendente que eles obedeçam as Lei de De Morgan.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

149

Lógica de Primeira Ordem

- Igualdade ou Identidade
 - É um símbolo que se adiciona ao Cálculo de Predicados com o propósito de expressar o fato de dois termos se referirem ao mesmo objeto, ou seja, "é idêntico a" ou "é a mesma coisa que".
- Exemplos:
- O Pai de João é Henrique.
 $\text{Pai_de}(\text{João}) = \text{Henrique}$
 Pai de João e Henrique se referem ao mesmo objeto.
 - O Pai de João é também Avô de Pedro.
 $\text{Pai_de}(\text{João}) = \text{Avô_de}(\text{Pedro})$

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

150

Lógica de Primeira Ordem

- Regras de Inferência para o Cálculo de Predicados
 - Eliminação Universal (EU)
 - De uma fbf quantificada universalmente $\forall x F(x)$, infere-se uma fbf da forma $F(a)$, a qual resulta de se substituir cada ocorrência da variável x em F por uma letra nominal a .
 - Introdução do Existencial (IE)
 - De uma fbf F contendo uma letra nominal a , infere-se uma fbf da forma $\exists x F(x)$, onde $F(x)$ é o resultado de se substituir uma ou mais ocorrências de a em F por uma variável x QUE NÃO OCORRA em F .
 - a pode ocorrer em uma hipótese não utilizada ainda, ou em uma premissa, normalmente a é um termo independente (ground term);
 - IE permite introduzir somente um quantificador existencial por vez e somente do lado esquerdo da fórmula.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

151

Lógica de Primeira Ordem

- Regras de Inferência para o Cálculo de Predicados
 - Eliminação do Existencial (EE)
 - De uma fbf quantificada existencialmente $\exists x F(x)$, podemos inferir $F(a)$, contanto que a letra nominal NÃO OCORRA em $F(x)$, NEM EM QUALQUER HIPÓTESE, NEM EM QUALQUER PASSO ANTERIOR DA DERRIVAÇÃO.
 - Exemplo:
 - A lei diz que é crime um Americano vender armas a nações hostis.
 - O Nação Iraque, um inimigo da América, possui alguns mísseis, e todos os seus mísseis foram vendidos a ele pelo coronel West, que é um Americano.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

152

Lógica de Primeira Ordem

- Exemplo:
 - $\forall x, y, z \text{Americano}(x) \wedge \text{Arma}(y) \wedge \text{Nação}(z) \wedge \text{Hostil}(z) \wedge \text{Vender}(x, y, z) \rightarrow \text{Criminoso}(x)$
 - $\exists x \text{Possui}(\text{Iraque}, x) \wedge \text{Missil}(x)$
 - $\forall x \text{Possui}(\text{Iraque}, x) \wedge \text{Missil}(x) \rightarrow \text{Vender}(\text{West}, \text{Iraque}, x)$
 - $\forall x \text{Missil}(x) \rightarrow \text{Arma}(x)$
 - $\forall x \text{Inimigo}(\text{América}, x) \rightarrow \text{Hostil}(x)$
 - $\text{Americano}(\text{West})$
 - $\text{Nação}(\text{Iraque})$
 - $\text{Inimigo}(\text{Iraque}, \text{América})$
 - $\text{Nação}(\text{América})$

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

153

Lógica de Primeira Ordem

- Prova
 - $\text{Possui}(\text{Iraque}, M1) \wedge \text{Missil}(M1)$ - 2 EE
 - $\text{Possui}(\text{Iraque}, M1)$ - 10 ^E
 - $\text{Missil}(M1)$ - 10 ^E
 - $\text{Missil}(M1) \rightarrow \text{Arma}(M1)$ - 4 EU
 - $\text{Arma}(M1)$ - 12,13 MP
 - $\text{Possui}(\text{Iraque}, M1) \wedge \text{Missil}(M1) \rightarrow \text{Vender}(\text{West}, \text{Iraque}, M1)$ - 3EU
 - $\text{Vender}(\text{West}, \text{Iraque}, M1)$ - 11,12 MP
 - $\text{Americano}(\text{West}) \wedge \text{Arma}(M1) \wedge \text{Nação}(\text{Iraque}) \wedge \text{Hostil}(\text{Iraque}) \wedge \text{Vender}(\text{West}, \text{Iraque}, M1) \rightarrow \text{Criminoso}(\text{West})$ - 1 EU
 - $\text{Inimigo}(\text{América}, \text{Iraque}) \rightarrow \text{Hostil}(\text{Iraque})$ - 5 EU
 - $\text{Hostil}(\text{Iraque})$ - 8,18 MP
 - $\text{Americano}(\text{West}) \wedge \text{Arma}(M1) \wedge \text{Nação}(\text{Iraque}) \wedge \text{Hostil}(\text{Iraque}) \wedge \text{Vender}(\text{West}, \text{Iraque}, M1)$ - 6,14,7,19,16 ^I
 - $\text{Criminoso}(\text{West})$ - 20,17 MP

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

154

Lógica de Primeira Ordem

- Se formularmos o processo de achar uma prova como um processo de busca, então esta prova é a solução de um problema de busca:
 - Estado Inicial = Base de Conhecimento (sentenças 1 – 9)
 - Operadores = regras de inferência aplicáveis
 - Estado Final = Base de Conhecimento contendo a sentença $\text{Criminoso}(\text{West})$
- Isto é muito difícil pois a solução está na profundidade 12 e o fator de ramificação é bastante grande. Porque?

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

155

Lógica de Primeira Ordem

- Árvores de Refutação
 - São uma generalização da técnica utilizada na Lógica Proposicional.
 - A técnica de árvore de refutação generalizada incorpora as regras da lógica proposicional e acrescenta 6 novas regras para inferir em sentenças que contêm quantificadores e o predicado de identidade.
 - Algumas árvores do cálculo dos predicados empregam somente as regras do cálculo proposicional.
 - NO CÁLCULO DE PREDICADOS, AS ÁRVORES DE REFUTÇÃO NÃO APRESENTAM UMA LISTA COMPLETA DE CONTRA-EXEMPLOS, MAS SIM, UM "MODELO DE UNIVERSO" QUE CONTEM EXATAMENTE OS OBJETOS MENCIONADOS PELO NOME NO RAMO.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

156

Lógica de Primeira Ordem

- Árvores de Refutação

- $\neg x P(x) \otimes \neg x G(x), \emptyset \vdash \neg x P(x)$
- ✓ 1. $\neg x P(x) \otimes \neg x G(x)$
 2. $\emptyset \vdash \neg x G(x)$
 3. $\neg x P(x)$
 4. $\emptyset \vdash \neg x P(x) \otimes \neg x G(x) \vdash$
 5. $X \ 3,4 \ \emptyset$ $X \ 2,4 \ \emptyset$

A árvore de refutação está COMPLETA, isto é, com todos os ramos fechados, logo, a busca de uma refutação para o argumento de negar a conclusão falhou, pois só encontrou CONTRADIÇÕES, e portanto, a FORMA É VÁLIDA.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

157

Lógica de Primeira Ordem

- Árvores de Refutação

1. Quantificação Universal (\forall):
 - Se uma fórmula bem formada do tipo $\forall x \beta$ aparece num ramo aberto e se α é uma constante (ou letra nominal) que ocorre numa fbf naquele ramo, então ESCRREVE-SE \emptyset^α / β (o resultado de se substituir todas as ocorrências β em \emptyset por α) no final do ramo.
 - Se nenhuma fbf contendo uma letra nominal aparece no ramo, então escolhemos uma letra nominal α e ESCRREVE-SE \emptyset^α / β no final do ramo.
 - Em cada caso, NÃO TICAMOS $\forall \beta \emptyset$.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

158

Lógica de Primeira Ordem

- Árvores de Refutação

- 1. Quantificação Universal (\forall):

- $\neg x (P(x) \otimes G(x)), \neg x P(x) \vdash G(a)$
1. $\neg x (P(x) \otimes G(x))$
 2. $\neg x P(x)$
 3. $\emptyset \vdash G(a)$
 - ✓ 4. $P(a) \otimes G(a) \vdash$
 5. $P(a) \vdash$
 6. $\emptyset \vdash P(a) \otimes G(a) \vdash$
 7. $X \ 5,6 \ \emptyset$ $X \ 3,6 \ \emptyset$

A árvore de refutação está COMPLETA, isto é, com todos os ramos fechados, logo, a busca de uma refutação para o argumento de negar a conclusão falhou, pois só encontrou CONTRADIÇÕES, e portanto, a FORMA É VÁLIDA.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

159

Lógica de Primeira Ordem

- Árvores de Refutação

- 2. Quantificação Existencial Negada ($\neg \exists$):

- Se uma fórmula bem formada não tificada da forma $\neg \exists x \beta$ aparece num ramo aberto, tica-se a fórmula e ESCRREVE-SE $\forall x \neg \beta$ no final de cada ramo aberto que contém a fbf tificada.

- $\neg x (P(x) \otimes G(x)), \emptyset \vdash \neg P(a)$
1. $\neg x (P(x) \otimes G(x))$
 - ✓ 2. $\emptyset \vdash G(x)$
 3. $\emptyset \vdash P(a)$
 - ✓ 4. $\neg x \neg G(x) \vdash$
 5. $\emptyset \vdash G(a) \vdash$
 - ✓ 6. $P(a) \otimes G(a) \vdash$
 7. $\emptyset \vdash P(a) \otimes G(a) \vdash$
 8. $X \ 3,7 \ \emptyset$ $X \ 5,7 \ \emptyset$

A árvore de refutação está COMPLETA, isto é, com todos os ramos fechados, logo, a busca de uma refutação para o argumento de negar a conclusão falhou, pois só encontrou CONTRADIÇÕES, e portanto, a FORMA É VÁLIDA.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

160

Lógica de Primeira Ordem

- Árvores de Refutação

- 3. Quantificação Universal Negada ($\neg \forall$):

- Se uma fórmula bem formada não tificada da forma $\neg \forall x \beta$ aparece num ramo aberto, tica-se a fórmula e ESCRREVE-SE $\exists x \neg \beta$ no final de cada ramo aberto que contém a fbf tificada.

- $\neg x (\neg y P(x,y)) \vdash \neg x (\neg y P(y,x))$
- ✓ 1. $\neg x (\neg y P(x,y))$
 - ✓ 2. $\emptyset \vdash \neg x (\neg y P(y,x))$
 3. $\neg y P(a,y) \vdash$
 - ✓ 4. $\neg x (\neg y P(y,x)) \vdash$
 - ✓ 5. $\emptyset \vdash \neg y P(y,b) \vdash$
 - ✓ 6. $\neg y P(y,b) \vdash$
 7. $\emptyset \vdash P(a,b) \vdash$
 8. $P(a,b) \vdash$
 9. X

A fórmula testada é válida

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

161

Lógica de Primeira Ordem

- Árvores de Refutação

- 4. Quantificação Existencial (\exists):

- Se uma fórmula bem formada não tificada da forma $\exists x \beta$ aparece num ramo aberto, tica-se a fórmula e escolhe-se uma letra nominal α QUE NÃO APARECEU NAQUELE RAMO e ESCRREVE-SE \emptyset^α / β (o resultado de se substituir todas as ocorrências β em \emptyset por α) no final do ramo.

- $\neg x P(x) \vdash \neg x P(x)$
- ✓ 1. $\neg x P(x)$
 - ✓ 2. $\emptyset \vdash \neg x P(x)$
 3. $P(a) \vdash$
 - ✓ 4. $\neg x \neg P(x) \vdash$
 5. $\emptyset \vdash P(b) \vdash$

A fórmula testada é INVÁLIDA POR HAVER RAMOS ABERTOS (linha 5)

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

162

Lógica de Primeira Ordem

- Árvores de Refutação

- 5. Identidade (=):

- Se uma fórmula do tipo $\alpha = \beta$ aparece num ramo aberto e se uma outra fbf \emptyset contendo α ou β aparece não tida naquele ramo, então escrevemos no final do ramo qualquer fbf que não esteja no ramo, que é o resultado de se substituir uma ou mais ocorrências de qualquer uma dessas letras nominais pela outra em \emptyset .
- Não se tica $\alpha = \beta$ nem \emptyset .

$a = b \vdash P(a,b) \oplus P(b,a)$	
1. $a = b$	
2. $\emptyset (P(a,b) \oplus P(b,a))$	A fórmula testada é válida
✓ 3. $\emptyset (P(a,a) \oplus P(a,a))$	1,2 =
4. $P(a,a)$	3 $\emptyset \oplus$
5. $\emptyset P(a,a)$	3 $\emptyset \oplus$
6. X	4,5 \emptyset

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

163

Lógica de Primeira Ordem

- Árvores de Refutação

- Identidade Negada ($\neg =$):

- Fechamos qualquer ramo aberto no qual uma fbf do tipo $\neg (\alpha = \alpha)$ ocorra.

$a = b \vdash b = a$	
1. $a = b$	
2. $\emptyset (b = a)$	
✓ 3. $\emptyset (a = a)$	1,2 =
4. X	3 $\emptyset =$

A fórmula testada é válida

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

164

Prova Automática de Teoremas

- A capacidade de se demonstrar teoremas é uma das partes integrantes da inteligência humana.
- Este tipo de prova foi pesquisada e desenvolvida a partir da segunda metade dos anos 60.
- A partir da introdução, por Robinson e Smullyan, em 1960, de procedimentos eficientes para demonstração automática de teoremas por computador, a lógica passou a ser estudada também como método computacional para a solução de problemas.
- Uma das áreas que mais faz uso desta técnica é a dos Sistemas Especialistas (SEs).
- O objetivo principal da Prova Automática de Teoremas é provar que uma fórmula (teorema) é consequência lógica de outras fórmulas.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

165

Prova Automática de Teoremas

- Os métodos adotados normalmente não utilizam a prova direta (através de regras de inferência), mas sim a PROVA POR REFUTACÃO (prova indireta), demonstrando que a negação da fórmula leva a inconsistências.
- SE A NEGAÇÃO DE UM TEOREMA É FALSA, ENTÃO ELE SERÁ VERDADEIRO.
- Os procedimentos de prova exploram o fato de expressões lógicas (fórmulas) poderem ser colocados em formas canônicas. Isto é, apenas com os operadores "e", "ou" e "não".
- O método da prova por refutação aplicado à lógica de primeira ordem é muito conveniente e com seu emprego não haverá perda de generalidade, porém, exige-se que as fórmulas estejam na forma de cláusulas.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

166

Prova Automática de Teoremas

- A TEORIA DA RESOLUÇÃO, proposta por Robinson em 1965 a partir dos trabalhos de Herbrand, Davis e Putnam, parte da transformação da fórmula a ser provada para a forma canônica conhecida como forma clausal.
- O método é baseado em uma regra de inferência única, chamada REGRA DA RESOLUÇÃO, e utiliza intensivamente um algoritmo de casamento de padrões chamado ALGORITMO DE UNIFICAÇÃO.
- O fato de ser possível associar uma semântica operacional a um procedimento de prova automática de teoremas permitiu a definição de uma linguagem de programação baseada em lógica, a linguagem PROLOG.
- Ainda hoje a área de prova automática de teoremas permanece bastante ativa, sendo objeto de diversas conferências internacionais.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

167

Prova Automática de Teoremas

Algumas Definições

- PROVA: É a demonstração de que um teorema (ou fórmula) é verdadeiro.
 - FORMA NORMAL CONJUNTIVA: É quando uma fórmula F for composta de uma conjunção de outras fórmulas $(F1 \wedge F2 \wedge \dots \wedge Fn)$.
 - FORMA NORMAL DISJUNTIVA: É quando uma fórmula F for composta de uma disjunção de outras fórmulas $(F1 \vee F2 \vee \dots \vee Fn)$.
 - FORMA NORMAL PRENEX: É quando numa fórmula F, na lógica de primeira ordem, todos os quantificadores existentes prefixam a fórmula, isto é, se e somente se estiver na forma $Q_1x_1 \dots Q_nx_n(M)$.
- Onde: $Q_i x_i = \forall x_i$ ou $\exists x_i$, e
 (M) = uma fórmula que não contenha quantificadores.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

168

Prova Automática de Teoremas

- **Procedimento para Obtenção da Forma Normal Prenex**
 1. Eliminar os conectivos lógicos \rightarrow e \leftrightarrow usando as seguintes leis:
 - $F \leftrightarrow G = (F \rightarrow G) \wedge (G \rightarrow F)$
 - $(F \rightarrow G) = \neg F \vee G$
 2. Repetir o uso das seguintes leis:
 - $\neg \neg F = F$
 - $\neg (F \vee G) = \neg F \wedge \neg G$
 - $\neg (F \wedge G) = \neg F \vee \neg G$
 - $\neg (\forall x F(x)) = \exists x (\neg F(x))$
 - $\neg (\exists x F(x)) = \forall x (\neg F(x))$

Estas leis são utilizadas para trazer os sinais de negação para antes dos átomos.
 3. Padronizar as variáveis, se necessário, de modo que cada quantificador possua sua própria variável.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

169

Prova Automática de Teoremas

- **Procedimento para Obtenção da Forma Normal Prenex**
 4. Usar as leis abaixo de forma a mover os quantificadores para a esquerda da fórmula para obter a Forma Normal PRENEX.
 - $Qx F(x) \vee G = Qx (F(x) \vee G)$
 - $Qx F(x) \wedge G = Qx (F(x) \wedge G)$
 - $\forall x F(x) \wedge \forall x G(x) = \forall x (F(x) \wedge G(x))$
 - $\exists x F(x) \vee \exists x G(x) = \exists x (F(x) \vee G(x))$
 - $Q_1 x F(x) \vee Q_2 x G(x) = Q_1 x Q_2 z (F(x) \vee G(z))$
 - $Q_3 x F(x) \wedge Q_4 x G(x) = Q_3 x Q_4 z (F(x) \wedge G(z))$
- EXEMPLO 1
- $$\forall x P(x) \rightarrow \exists x Q(x)$$
- $\forall x P(x) \rightarrow \exists x Q(x) = \neg \forall x P(x) \vee \exists x Q(x)$
 - $\exists x (\neg P(x)) \vee \exists x Q(x)$
 - $\exists x (\neg P(x) \vee Q(x))$

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

170

Prova Automática de Teoremas

- **Procedimento para Obtenção da Forma Normal Prenex**

EXEMPLO 2

$$\forall x \forall y ((\exists z (P(x,z) \wedge P(y,z)) \rightarrow \exists u Q(x,y,u)) =$$
 - $\forall x \forall y (\neg (\exists z (P(x,z) \wedge P(y,z))) \vee \exists u Q(x,y,u)) =$
 - $\forall x \forall y (\forall z (\neg P(x,z) \vee \neg P(y,z))) \vee \exists u Q(x,y,u) =$
 - $\forall x \forall y \forall z \exists u (\neg P(x,z) \vee \neg P(y,z) \vee Q(x,y,u))$

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

171

Prova Automática de Teoremas

- **Eliminação dos quantificadores existenciais (Skolemização ou Funções de Skolem)**
 - Quando uma fórmula está na forma normal Prenex, pode-se eliminar os quantificadores existenciais por uma função, se as variáveis estiverem no escopo do quantificador universal; caso estejam fora, substitui-se por uma constante.
 - As constantes e funções usadas para substituir as variáveis existenciais são chamadas constante e funções de Skolem
 - Ex.: $\forall x \exists y P(x,y)$ Skolemizando: $\forall x P(x,f(x))$
 - onde $f(x)$ tem por único propósito garantir que existe algum valor (y) que depende de x pois está dentro do seu escopo. No entanto, se o quantificador existencial não residir no escopo do quantificador universal, como em $\exists y \forall x P(x,y)$, a variável quantificada existencialmente será substituída por uma constante $\forall x P(x,a)$ que assegure sua existência, assim como sua independência de qualquer outra variável.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

172

Prova Automática de Teoremas

- **Procedimento para Obtenção da Forma Clausal**
 - Cláusula é uma disjunção de literais
 1. Passar para a forma normal PRENEX.
 2. Skolemizar as variáveis quantificadas existencialmente.
 3. Abandonar-se os quantificadores pré-fixados.

EXEMPLO

$$\forall x \forall y ((\exists z (P(x,z) \wedge P(y,z)) \rightarrow \exists u Q(x,y,u)) =$$
 - $\forall x \forall y (\neg (\exists z (P(x,z) \wedge P(y,z))) \vee \exists u Q(x,y,u)) =$
 - $\forall x \forall y (\forall z (\neg P(x,z) \vee \neg P(y,z))) \vee \exists u Q(x,y,u) =$
 - $\forall x \forall y \forall z \exists u (\neg P(x,z) \vee \neg P(y,z) \vee Q(x,y,u))$
 - $\forall x \forall y \forall z (\neg P(x,z) \vee \neg P(y,z) \vee Q(x,y,f(x,y,z)))$
 - $\neg P(x,z) \vee \neg P(y,z) \vee Q(x,y,f(x,y,z))$

que é perfeitamente equivalente à fórmula original.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

173

Prova Automática de Teoremas

- **Resolução: Um Procedimento Completo de Inferência**
 - Seria útil, do ponto de vista computacional, que tivéssemos um procedimento de prova que realizasse, em uma única operação, a variedade de processos envolvidos no raciocínio, com declarações da lógica dos predicados.
 - Este procedimento é a RESOLUÇÃO, que ganha sua eficiência por operar em declarações que foram convertidas à forma clausal, como mostrado anteriormente.
 - A Resolução produz provas por REFUTAÇÃO, ou seja, para provar uma declaração (mostrar que ela é válida), a resolução tenta demonstrar que a negação da declaração produz uma contradição com as declarações conhecidas (não é possível de ser satisfeita).

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

174

Prova Automática de Teoremas

- **Resolução: Um Procedimento Completo de Inferência**

A BASE DA RESOLUÇÃO

- É um processo iterativo onde, em cada passo, duas cláusulas, denominadas cláusulas paternas, são comparadas (resolvidas), resultando em uma nova cláusula, dela inferida.
- A nova cláusula representa maneiras em que as duas cláusulas paternas interagem entre si.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

176

Prova Automática de Teoremas

- **Resolução: Um Procedimento Completo de Inferência**

A BASE DA RESOLUÇÃO

Exemplo:

- Inverno \vee Verão
- \neg Inverno \vee Frio

As duas cláusulas deverão ser verdadeiras (embora pareçam independentes, são realmente conjuntas).

- Agora, observamos que apenas um entre Inverno e \neg Inverno será verdadeiro, em qualquer ponto. Se Inverno for verdadeiro, então Frio também deverá ser, para garantir a verdade da segunda cláusula. Se \neg Inverno for verdadeiro, então também Verão deverá ser, para garantir a verdade da primeira cláusula.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

176

Prova Automática de Teoremas

- **Resolução: Um Procedimento Completo de Inferência**

- Assim, dessas duas cláusulas, podemos deduzir que
 - Verão \vee Frio
 - Esta é a dedução feita pelo procedimento de resolução.
- A resolução opera tirando suas cláusulas que contenham cada uma, o mesmo literal, neste exemplo Inverno.
- O literal deverá ocorrer na forma positiva numa cláusula e na forma negativa na outra.
- O resolvente é obtido combinando-se todos os literais das duas cláusulas paternas, exceto aqueles que se cancelam.
- Se a cláusula produzida for vazia, então foi encontrada uma CONTRADIÇÃO, o que valida a fórmula.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

177

Prova Automática de Teoremas

- **RESOLUÇÃO NA LÓGICA PROPOSICIONAL**

- Na Lógica Proposicional, o procedimento para produzir uma prova pela resolução da proposição S, com relação a um conjunto de axiomas F, é o seguinte:

1. Converter todas as proposições de F em cláusulas.
2. Negar S e converter o resultado em cláusulas. Acrescente-as ao conjunto de cláusulas obtidas no passo 1.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

178

Prova Automática de Teoremas

- **RESOLUÇÃO NA LÓGICA PROPOSICIONAL**

3. Repetir até que seja encontrada uma contradição ou não se possa fazer progresso:

- 3.1. Escolher duas cláusulas, que serão chamadas cláusulas pais.
- 3.2. Resolva-as. A cláusula resultante, denominada *resolvente*, será a disjunção de todos os literais de ambas as cláusulas pais, com a seguinte exceção:

Se houver qualquer par de literais L e \neg L, tal que uma das cláusulas pais contenha L e a outra \neg L, então elimine tanto L como \neg L do resolvente.
- 3.3. Se o resolvente for uma cláusula vazia, terá sido encontrada uma contradição. Se não for, acrescente-o ao conjunto de cláusulas disponíveis para o procedimento.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

179

Prova Automática de Teoremas

- **RESOLUÇÃO NA LÓGICA PROPOSICIONAL**

EXEMPLO: $P, (P \wedge Q) \rightarrow R, S \vee T \rightarrow Q, T \mid \neg R$

- Primeiro convertemos os axiomas em cláusulas.

1. P
2. $\neg P \vee \neg Q \vee R$
3. $\neg S \vee Q$
4. $\neg T \vee Q$
5. T
6. $\neg R$

- Começamos então a escolher a par de cláusulas para resolver. Embora qualquer par de cláusulas possa ser resolvido, apenas aqueles pares que contenham literais complementares produzirão um resolvente com possibilidade de produzir uma cláusula vazia.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

180

Prova Automática de Teoremas

• RESOLUÇÃO NA LÓGICA PROPOSICIONAL

EXEMPLO: $P, (P \wedge Q) \rightarrow R, S \vee T \rightarrow Q, T \vdash R$

- Começamos por resolver com a cláusula $\neg R$, pois ela é uma das cláusulas que deverão estar envolvidas na contradição que estamos tentando encontrar.

1. P
 2. $\neg P \vee \neg Q \vee R$
 3. $\neg S \vee Q$
 4. $\neg T \vee Q$
 5. T
 6. $\neg R$
-
7. $\neg P \vee \neg Q$ (2 e 6)
 8. $\neg Q$ (1 e 7)
 9. $\neg T$ (4 e 8)
 10. VAZIA (5 e 9)

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

181

Prova Automática de Teoremas

• RESOLUÇÃO NA LÓGICA DOS PREDICADOS

- Na Lógica Proposicional é fácil determinar que dois literais não possam ser verdadeiros ao mesmo tempo. (Simplesmente procure L e $\neg L$)
- Na Lógica dos Predicados este processo de casamento ("matching") é mais complicado. Por exemplo $\text{Homem}(\text{Henry})$ e $\neg \text{Homem}(\text{Henry})$ é uma contradição, enquanto que $\text{Homem}(\text{Henry})$ e $\neg \text{Homem}(\text{Spot})$ não o é.
- Assim, para determinar contradições, precisamos de um procedimento de matching que compare dois literais e descubra se existe um conjunto de substituições que os torne idênticos.
- O ALGORITMO DE UNIFICAÇÃO é um procedimento recursivo direto que faz exatamente isto.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

182

Prova Automática de Teoremas

• O ALGORITMO DE UNIFICAÇÃO

- Para apresentar a unificação, consideramos as fórmulas como lista em que o primeiro elemento é o nome do predicado e os elementos restantes são os argumentos.
- TentarAssassinar (Marco Cesar)
- TentarAssassinar (Marco (Soberanode (Roma)))
- Para tentar unificar dois literais, primeiro conferimos se seus primeiros elementos são iguais. Caso contrário não há meio de serem unificados, independentemente de seus argumentos.
- Se o primeiro casar, podemos continuar com o segundo e assim por diante.
- Constantes, funções e predicados diferentes não podem casar, os idênticos podem. Uma variável pode casar com outra variável, ou com qualquer constante, função ou expressão de predicados.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

183

Prova Automática de Teoremas

• O ALGORITMO DE UNIFICAÇÃO UNIFICA (L1, L2)

1. Se L1 ou L2 for um átomo, então faça o seguinte:
 - 1.1. Se L1 e L2 forem idênticos, retornar NIL
 - 1.2. Caso contrário, se L1 for uma variável, faça
 - 1.2.1. Se L1 ocorrer em L2, retornar F;
 - 1.2.2. Caso contrário, retornar (L2/L1)
 - 1.3. De outro modo, se L2 for uma variável, faça
 - 1.3.1. Se L2 ocorrer em L1, retornar F;
 - 1.3.2. Caso contrário, retornar (L1/L2)
 - 1.4. Caso contrário, retornar F.
2. Se comprimento(L1) não for igual a comprimento(L2) retornar F.
3. Designar a SUBST o valor NIL. (ao final do procedimento, SUBST conterá todas as substituições utilizadas para unificar L1 e L2).

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

184

Prova Automática de Teoremas

• O ALGORITMO DE UNIFICAÇÃO UNIFICA (L1, L2)

4. Para $i=1$ até o número de elementos de L1, faça:
 - 4.1. Chame UNIFICA com o i -ésimo elemento de L1 e o i -ésimo elemento de L2, colocando o resultado em S.
 - 4.2. Se $S = F$, retornar F.
 - 4.3. Se S não for igual a NIL, faça:
 - 4.3.1. Aplicar S tanto ao final de L1 como de L2.
 - 4.3.2. $SUBST := APPEND(S, SUBST)$
 - 4.3.3. Retornar SUBST

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

185

Prova Automática de Teoremas

• RESOLUÇÃO NA LÓGICA DE PREDICADOS

- Duas fórmulas-atômicas são contraditórias se uma delas puder ser unificada com o não da outra. Assim, por exemplo, $\text{Homem}(x)$ e $\neg \text{Homem}(\text{Spot})$ podem ser unificados.
- Isto corresponde à intuição que diz que não pode ser verdadeiro para todos os x , que $\text{Homem}(x)$ se houver conhecimento de haver algum x , digamos Spot, para o qual $\text{Homem}(x)$ é falso.
- Na lógica de predicados utilizaremos o algoritmo de unificação para localizar pares de fórmulas-atômicas que se cancelem.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

186

Prova Automática de Teoremas

- RESOLUÇÃO NA LÓGICA DE PREDICADOS
 1. Converter todas as declarações de F em cláusulas.
 2. Negar S e converter o resultado em cláusulas. Acrescentá-las ao conjunto de cláusulas obtidas em 1.
 3. Repetir até que uma contradição seja encontrada, e nenhum progresso possa ser feito, ou até que se tenha gasto um quantidade pré-determinada de esforço:
 - 3.1. Escolher duas cláusulas e chamá-las de cláusulas pais.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

187

Prova Automática de Teoremas

- RESOLUÇÃO NA LÓGICA DE PREDICADOS
 - 3.2. Resolvê-las. O resolvente será a disjunção de todos os literais de ambas as cláusulas pais com as substituições apropriadas realizadas, ressaltando-se o seguinte:
 - 3.2.1. Se houver um par de literais $T1$ e $\neg T2$ tal que uma das cláusulas pais contenha $T1$ e a outra contenha $T2$, e ainda se $T1$ e $T2$ forem unificáveis, então nem $T1$ nem $T2$ devem aparecer no resolvente.
 - 3.2.2. Chamaremos $T1$ e $T2$ literais complementares. Utilize a substituição produzida pela unificação para criar o resolvente.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

188

Prova Automática de Teoremas

- RESOLUÇÃO NA LÓGICA DE PREDICADOS
 - 3.2. Resolvê-las. O resolvente será a disjunção de todos os literais de ambas as cláusulas pais com as substituições apropriadas realizadas, ressaltando-se o seguinte:
 - 3.2.1. Se houver um par de literais $T1$ e $\neg T2$ tal que uma das cláusulas pais contenha $T1$ e a outra contenha $T2$, e ainda se $T1$ e $T2$ forem unificáveis, então nem $T1$ nem $T2$ devem aparecer no resolvente.
 - 3.2.2. Chamaremos $T1$ e $T2$ literais complementares. Utilize a substituição produzida pela unificação para criar o resolvente.
 - 3.3. Se o resolvente for uma cláusula vazia, então foi encontrada uma contradição. Se não for, acrescente-o ao conjunto de cláusulas disponíveis para o procedimento.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

189

Prova Automática de Teoremas

- RESOLUÇÃO NA LÓGICA DE PREDICADOS
 - Se a escolha de cláusulas a resolver em cada passo for feita de maneira sistemática, o procedimento de resolução encontrará uma contradição, se ela existir.
 - Isto contudo, poderá levar muito tempo.
 - Existem estratégias opcionais para acelerar o processo.
 - Resolver apenas pares de cláusulas que contenham literais complementares, pois somente essas resoluções produzem cláusulas novas mais difíceis de satisfazer que seus pais.
 - Eliminar cláusulas do tipo tautologias e cláusulas que estejam incluídas em outras cláusulas ($P \vee Q$ é incluída por P).
 - Sempre que possível, resolver com uma das cláusulas que estamos tentando refutar ou com uma cláusula gerada por uma resolução com tal cláusula.
 - Sempre que possível, dar preferência a cláusulas com um único literal.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

190

Prova Automática de Teoremas

- RESOLUÇÃO NA LÓGICA DE PREDICADOS
 - EXEMPLO:
 1. Homem(Marco)
 2. Pompeiano(Marco)
 3. $\forall x$ Pompeiano(x) \rightarrow Romano(x)
 4. Soberano(Cesar)
 5. $\forall x$ Romano(x) \rightarrow (LealA(x,Cesar) \vee Odiar(x,Cesar))
 6. $\forall x \exists y$ LealA(x,y)
 7. $\forall x \exists y$ (Homem(x) \wedge Soberano(y)) \rightarrow (\neg TentarAssassinar(x,y) \vee \neg LealA(x,y))
 8. TentarAssassinar(Marco,Cesar)
 - Logo, Odiar(Marco, Cesar)

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

191

Prova Automática de Teoremas

- RESOLUÇÃO NA LÓGICA DE PREDICADOS
 - EXEMPLO:
 - Primeiro convertamos os axiomas em cláusulas.
 1. Homem(Marco)
 2. Pompeiano(Marco)
 3. \neg Pompeiano(x1) \vee Romano(x1)
 4. Soberano(Cesar)
 5. \neg Romano(x2) \vee LealA(x2,Cesar) \vee Odiar(x2,Cesar))
 6. LealA(x3,f(x3))
 7. \neg Homem(x4) \vee \neg Soberano(y1) \vee \neg TentarAssassinar(x4,y1) \vee \neg LealA(x4,y1)
 8. TentarAssassinar(Marco,Cesar)
 9. \neg Odiar(Marco, Cesar)
 - Começamos então a escolher o par de cláusulas para resolver

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

192

Prova Automática de Teoremas

- RESOLUÇÃO NA LÓGICA DE PREDICADOS
 - EXEMPLO:
 10. $\neg \text{Romano}(\text{Marco}) \vee \text{LealA}(\text{Marco}, \text{Cesar})$
(SUBST(Marco, x2) em 5 e 9)
 11. $\neg \text{Pompeiano}(\text{Marco}) \vee \text{LealA}(\text{Marco}, \text{Cesar})$
(SUBST(Marco, x1 em 3 e 10)
 12. $\text{LealA}(\text{Marco}, \text{Cesar})$ (2 e 11)
 13. $\neg \text{Homem}(\text{Marco}) \vee \neg \text{Soberano}(\text{Cesar}) \vee$
 $\neg \text{TentarAssassinar}(\text{Marco}, \text{Cesar})$
(SUBST(Marco, x4) e SUBST(Cesar, y1) em 7 e 12)
 14. $\neg \text{Soberano}(\text{Cesar}) \vee \neg \text{TentarAssassinar}(\text{Marco}, \text{Cesar})$ (1 e 13)
 15. $\neg \text{TentarAssassinar}(\text{Marco}, \text{Cesar})$ (4 e 14)
 16. VAZIA (8 e 15)

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

193

PROLOG

- Introdução e Histórico
 - PROgramming in LOGic é fruto de pesquisas na área de Prova Automática de Teoremas.
 - Foi criada por Robert Kowalski (na parte teórica), Maarten van Emden (na demonstração experimental) e Alain Colmerauer (na implementação) por volta de 1970 na Universidade de Marselha, França.
 - O primeiro compilador eficiente foi desenvolvido na Universidade de Edimburgo, Escócia.
 - A linguagem PROLOG também é um provador automático de teoremas, onde a estratégia de cláusulas adotada é a "Selective Linear Resolution for Definite Clauses".
 - É uma linguagem declarativa, onde se diz "o que fazer" para atingir um objetivo, o que leva a um nível mais elevado de abstração na solução dos problemas.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

194

PROLOG

- Introdução e Histórico
 - Segundo Bratko, "pensar a respeito do problema e aprender a programar em PROLOG constitui-se em um desafio intelectual excitante".
 - Cada linha de PROLOG corresponde a uma afirmação.
 - A variável compreendida na afirmação deve ser entendida como UNIVERSALMENTE quantificada. Assim, a declaração $\text{pai_de}(X, Y)$ corresponde a $\forall X \forall Y \text{ pai_de}(X, Y)$.
 - PROLOG só admite em suas declarações CLÁUSULAS DE HORN.
 - CLÁUSULAS DE HORN só admitem um literal positivo.
 - Lembre-se que $A \rightarrow B$ pode ser escrita sob a forma $\neg A \vee B$.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

195

PROLOG

- Introdução e Histórico
 - Sejam $A_i(x_1, x_2, \dots, x_k)$ e $B_i(x_1, x_2, \dots, x_k)$ fórmulas atômicas, então uma regra do tipo:
Se $A_1(x_1, x_2, \dots, x_k)$ e ... e $A_m(x_1, x_2, \dots, x_k)$
então $B_1(x_1, x_2, \dots, x_k)$ e ... e $B_n(x_1, x_2, \dots, x_k)$
pode ser escrita como
 $\neg A_1(x_1, x_2, \dots, x_k) \vee \dots \vee \neg A_m(x_1, x_2, \dots, x_k) \vee$
 $B_1(x_1, x_2, \dots, x_k) \vee \dots \vee B_n(x_1, x_2, \dots, x_k)$.
 - No entanto, PROLOG só admite declarações do tipo:
 - Se $A_1(x_1, x_2, \dots, x_k)$ e ... e $A_m(x_1, x_2, \dots, x_k)$ então $B_1(x_1, x_2, \dots, x_k)$;
 - $B_1(x_1, x_2, \dots, x_k)$;
 - Se A_1 e ... e A_m então B_1 ; e
 - B_1 .

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

196

PROLOG

- Introdução e Histórico
 - Normalmente, variáveis e constantes são diferenciadas pela primeira letra:
 - Símbolos iniciados por minúscula são constantes; e
 - Símbolos iniciados por letra maiúscula são variáveis.
 - O escopo léxico de nomes de variáveis é apenas uma cláusula.
 - Isto quer dizer que, por exemplo, se o nome de variável X25 ocorre em duas cláusulas diferentes, então ela está representando duas variáveis diferentes.
 - Por outro lado, toda ocorrência de X25 dentro da mesma cláusula quer significar a mesma variável.
 - Esta situação é diferente para as constantes: o mesmo nome sempre significa o mesmo objeto ao longo de todo o programa.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

197

PROLOG

- Introdução e Histórico
 - Em PROLOG, as cláusulas são escritas na forma de regras, com a (única) conclusão no início.
 - $B_1(X_1, \dots, X_k) :- A_1(X_1, \dots, X_k), \dots, A_m(X_1, \dots, X_k)$.
 - $B_1(X_1, \dots, X_k)$.
 - $B_1 :- A_1, \dots, A_m$.
 - B_1 .
 - O único literal positivo de uma cláusula (que aparece antes do símbolo :-) é chamado cabeça da cláusula.
 - Os literais negativos (que aparecem depois do símbolo :-) são chamados corpo da cláusula.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

198

PROLOG

- Exemplo Introdutório
- `progenitor(maria,josé).` % Maria é progenitor de José.
- `progenitor(joão,josé).`
- `progenitor(joão,ana).`
- `progenitor(josé,júlia).`
- `progenitor(josé,iris).`
- `progenitor(iris,jorge).`
- `masculino(joão).` % João é do sexo masculino.
- `masculino(josé).`
- `masculino(jorge).`
- `feminino(maria).` % Maria é do sexo feminino.
- `feminino(ana).`
- `feminino(júlia).`
- `feminino(iris).`

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

199

PROLOG

- Exemplo Introdutório
- O efeito das entradas anteriores é o armazenamento destas fórmulas atômicas representando fatos em uma base de conhecimentos PROLOG.
- Se o programa for submetido a um sistema Prolog, este será capaz de responder algumas questões sobre a relação ali representada. Por exemplo: "José é o progenitor de Iris?"
 - `?-progenitor(josé, iris).`
- Uma outra questão poderia ser: "Ana é um dos progenitores de Jorge?"
 - `?-progenitor(ana, jorge).`

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

200

PROLOG

- Exemplo Introdutório
- Perguntas mais interessantes podem também ser formuladas, por exemplo: "Quem é progenitor de Iris?"
 - `?-progenitor(X, iris).`
- Da mesma forma a questão "Quem são os filhos de José?" pode ser formulada com a introdução de uma variável na posição do argumento correspondente ao filhos de José
 - `?-progenitor(josé, X).`
- Uma questão mais geral para o programa seria: "Quem é progenitor de quem?"
 - `?-progenitor(X, Y).`

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

201

PROLOG

- Exemplo Introdutório
- Pode-se formular questões ainda mais complicadas ao programa, como "Quem são os avós de Jorge?". Como nosso programa não possui diretamente a relação avô, esta consulta precisa ser dividida em duas etapas. A saber:
 - (1) Quem é progenitor de Jorge? (Por exemplo, Y) e
 - (2) Quem é progenitor de Y? (Por exemplo, X)
- Esta consulta em Prolog é escrita como uma sequência de duas consultas simples, cuja leitura pode ser: "Encontre X e Y tais que X é progenitor de Y e Y é progenitor de Jorge".
 - `?-progenitor(X, Y), progenitor(Y, jorge).`
 - `X=josé Y=iris`

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

202

PROLOG

- Pontos Básicos
- Uma relação como `progenitor` pode ser facilmente definida em Prolog estabelecendo-se as tuplas de objetos que satisfazem a relação.
- O usuário pode facilmente consultar o sistema Prolog sobre as relações definidas em seu programa;
- Um programa Prolog é constituído de cláusulas, cada uma das quais é encerrada por um ponto (.);
- Os argumentos das relações podem ser objetos concretos (como `júlia` e `iris`) ou objetos genéricos (como `X` e `Y`). Objetos concretos em um programa são denominados átomos, enquanto que os objetos genéricos são denominados variáveis;

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

203

PROLOG

- Pontos Básicos
- Consultas ao sistema são constituídas por um ou mais objetivos, cuja sequência denota a sua conjunção;
- Uma resposta a uma consulta pode ser positiva ou negativa, dependendo se o objetivo correspondente foi alcançado ou não. No primeiro caso dizemos que a consulta foi bem-sucedida e, no segundo, que a consulta falhou;
- Se várias respostas satisfizerem a uma consulta, então o sistema Prolog irá fornecer tantas quantas forem desejadas pelo usuário.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

204

PROLOG

• Exemplo Introdutório

- A capacidade do PROLOG não se limita à busca em uma base de conhecimentos; é possível armazenar regras.
 - As regras definem as condições que devem ser satisfeitas para que uma certa declaração seja considerada verdadeira.
- ```
? -mae(X,Y) :- progenitor(X,Y), feminino(X).
? -pai(X,Y) :- progenitor(X,Y), masculino(X).
? -avo(X,Z) :- progenitor(X,Y), progenitor(Y,Z).
```
- Com estas definições podemos obter os seguintes resultados:
- ```
? -mae(X,José).
X = maria;
```
- ```
? -pai(X,Iris).
X = José;
```

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

205

## PROLOG

### • Pontos Básicos

- Programas Prolog podem ser ampliados pela simples adição de novas cláusulas;
- As cláusulas Prolog podem ser de três tipos distintos: fatos, regras e consultas;
- Os fatos declaram coisas que são incondicionalmente verdadeiras;
- As regras declaram coisas que podem ser ou não verdadeiras, dependendo da satisfação das condições dadas;
- Por meio de consultas podemos interrogar o programa acerca de que coisas são verdadeiras;

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

206

## PROLOG

### • Pontos Básicos

- As cláusulas Prolog são constituídas por uma cabeça e um corpo. O corpo é uma lista de objetivos separados por vírgulas que devem ser interpretadas como conjunções;
- Fatos são cláusulas que só possuem cabeça, enquanto que as consultas só possuem corpo e as regras possuem cabeça e corpo;
- Ao longo de uma computação, uma variável pode ser substituída por outro objeto. Dizemos então que a variável está instanciada;
- As variáveis são assumidas como universalmente quantificadas nas regras e nos fatos e existencialmente quantificadas nas consultas

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

207

## PROLOG

### • Exemplo Introdutório

- Além disso, as definições de regras podem ser recursivas, isto é, uma cláusula de definição de um predicado pode conter este predicado em seu corpo:
- ```
? -antepassado(X,Z) :- progenitor(X,Z).
? -antepassado(X,Z) :- progenitor(X,Y),
                        antepassado(Y,Z).
```
- Com estas definições podemos obter os seguintes resultados:
- ```
? -antepassado(X,Jorge).
X = iris;
X = maria;
X = João;
X = José;
```

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

208

## PROLOG

### • Exemplo Introdutório

- Usa-se o "\_" (underscore) para indicar a irrelevância de um objeto.
- ```
? -aniversario(maria,data(25,janeiro,1979)).
? -aniversario(joao,data(5,janeiro,1956)).
? -signo(Pessoa,aquario) :-
  aniversario(Pessoa,data(Dia,janeiro,_)), Dia >= 20.
```
- Com estas definições podemos obter os seguintes resultados:
- ```
? -signo(Pessoa,aquario).
Pessoa = maria;
no
```
- Usa-se a "&" como operador de conjunção e usa-se o ";" como operador de disjunção (cláusulas começando com o mesmo predicado também indicam a disjunção)
- ```
? -avo(X,Z) :- progenitor(X,Y), progenitor(Y,Z).
? -amiga(X) :- (X = maria ; X = joana).
```

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

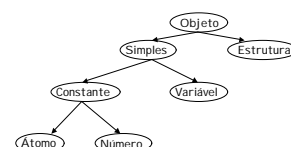
15/04/05

209

PROLOG

• Sintaxe

- O sistema reconhece o tipo de um objeto no programa por meio de sua forma sintática.
- Isto é possível porque o PROLOG especifica formas diferentes para cada tipo de objeto.



(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

210

PROLOG

• Sintaxe

- Átomos e Números

- No exemplo introdutório viu-se informalmente alguns exemplos de átomos e variáveis. O alfabeto básico adotado consiste dos seguintes símbolos:
- Pontuação: () , ' "
- Conectivos: , (conjunção)
; (disjunção)
:- (implicação)
- Letras: a, b, c, ..., z, A, B, C, ..., Z
- Dígitos: 0, 1, 2, ..., 9
- Especiais: + - * / < > = ...

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

211

PROLOG

• Sintaxe

- Variáveis

- Variáveis PROLOG são cadeias de letras, dígitos e do carácter sublinhado (_), devendo iniciar com este ou com uma letra maiúscula.

- Estruturas

- Estruturas são objetos que possuem vários componentes.
- Os próprios componentes, por sua vez, podem também ser estruturas.
- Para combinar os elementos em uma estrutura é necessário um functor. Um functor é um símbolo funcional (nome de função) que permite agrupar diversos objetos em um único objeto estruturado.
- data(13, outubro, 1993) - dois inteiros e um átomo.
- data(Dia, marco, 1996) - um dia qualquer de marco.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

212

PROLOG

• Sintaxe

- Sintaticamente todos os objetos em PROLOG são denominados termos.

- O conjunto de termos PROLOG é o menor conjunto que satisfaz às seguintes condições:

- Toda constante é um termo;
- Toda variável é um termo;
- Se t_1, t_2, \dots, t_n são termos e f é um átomo, então $f(t_1, t_2, \dots, t_n)$ também é um termo, onde o átomo f desempenha o papel de um símbolo funcional n-ário. Diz ainda que a expressão $f(t_1, t_2, \dots, t_n)$ é um termo funcional PROLOG.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

213

PROLOG

• Consultas em Prolog

- Uma consulta em Prolog é sempre uma sequência composta por um ou mais objetivos. Para obter a resposta, o sistema Prolog tenta satisfazer todos os objetivos que compõem a consulta, interpretando-os como uma conjunção. Satisfazer um objetivo significa demonstrar que esse objetivo é verdadeiro, assumindo que as relações que o implicam são verdadeiras no contexto do programa. Se a questão também contém variáveis, o sistema Prolog deverá encontrar ainda os objetos particulares que, atribuídos às variáveis, satisfazem a todos os sub-objetivos propostos na consulta. A particular instanciada das variáveis com os objetos que tornam o objetivo verdadeiro é então apresentada ao usuário. Se não for possível encontrar, no contexto do programa, nenhuma instanciada comum de suas variáveis que permita derivar algum dos sub-objetivos propostos então a resposta será "não".

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

214

PROLOG

• Unificação

- É a operação mais importante entre dois termos PROLOG.

- Dados dois termos, diz-se que eles se unificam se:

- Eles são idênticos, ou
- As variáveis de ambos os termos podem ser instanciadas com objetos de maneira que, após a substituição das variáveis por estes objetos, os termos se tornam idênticos.

- Exemplo

- os termos data(D,M,1994) e data(X,marco,A) unificam. Uma instanciada que torna os dois termos idênticos é:
D é instanciada com X;
M é instanciada com marco;
A é instanciada com 1994.
- Por outro lado, os termos data(D,M,1994) e data(X,Y,Z) não unificam, assim como não unificam data(X,Y,Z) e ponto(X,Y,Z).

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

215

PROLOG

• Unificação

- Se os termos não unificam dizemos, dizemos que o processo FALHA.

- Se eles unificam, então o processo é bem-sucedido.

- As regras gerais que determinam se dois termos S e T unificam são:

- Se S e T são constantes, então S e T unificam somente se ambos representam o mesmo objeto;
- Se S é uma VARIÁVEL e T É QUALQUER COISA, ENTÃO S E T UNIFICAM COM S INSTANCIADA EM T. Inversamente, se T é uma variável, então T é instanciada em S.
- Se S e T são estruturas, unificam somente se:
 - S e T tem o mesmo functor principal, e
 - todos os seus componentes correspondentes também unificam. A instanciada resultante é determinada pela unificação dos componentes.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

216

PROLOG

- Consultas em Prolog

- antepassado(X, Z) :- % X é antepassado de Z se
progenitor(X, Z). % X é progenitor de Z. [pr1]
- antepassado(X, Z) % X é antepassado de Z se
progenitor(X, Y), % X é progenitor de Y e
antepassado(Y, Z). % Y é antepassado de Z. [pr2]

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

217

PROLOG

- Consultas em Prolog

- Um exemplo mais complexo:

- ?-antepassado(joão, iris).
- Sabe-se que progenitor(josé, iris) é um fato. Usando esse fato e a regra [pr1], podemos concluir antepassado(josé, iris). Este é um fato derivado. Não pode ser encontrado explícito no programa, mas pode ser derivado a partir dos fatos e regras ali presentes. Ou seja:
- "de progenitor(josé, iris) segue, pela regra [pr1] que antepassado(josé, iris)".
- Além disso sabemos que progenitor(joão, josé) é fato. Usando este fato e o fato derivado, antepassado(josé, iris), podemos concluir, pela regra [pr2], que o objetivo proposto, antepassado(joão, iris) é verdadeiro.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

218

PROLOG

- Consultas em Prolog

- Mostrou-se assim o que pode ser uma sequência de passos de inferência usada para satisfazer um objetivo. Tal sequência denomina-se sequência de prova. A extração de uma sequência de prova do contexto formado por um programa e uma consulta é obtida pelo sistema na ordem inversa da empregada anteriormente.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

219

PROLOG

- Consultas em Prolog

- Ao invés de iniciar a inferência a partir dos fatos, o Prolog começa com os objetivos e, usando as regras, substitui os objetivos correntes por novos objetivos até que estes se tornem fatos.
- Assim, para saber se joão é antepassado de iris, o sistema tenta encontrar uma cláusula no programa a partir da qual o objetivo seja consequência imediata. Obviamente, as únicas cláusulas relevantes para essa finalidade são [pr1] e [pr2], que são sobre a relação antepassado, porque são as únicas cujas cabeças podem ser unificadas com o objetivo formulado.
- Tais cláusulas representam dois caminhos alternativos que o sistema pode seguir. Inicialmente o Prolog irá tentar a que aparece em primeiro lugar no programa:

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

220

PROLOG

- Consultas em Prolog

- antepassado(X, Z) :- progenitor(X, Z).
- Uma vez que o objetivo é antepassado(joão, iris), as variáveis na regra devem ser instanciadas por X=joão e Y=iris. O objetivo inicial, antepassado(joão, iris) é então substituído por um novo objetivo:
progenitor(joão, iris)
- Não há, entretanto, nenhuma cláusula no programa cuja cabeça possa ser unificada com progenitor(joão, iris), logo este objetivo falha. Então o Prolog retorna ao objetivo original (backtracking) para tentar um caminho alternativo que permita derivar o objetivo antepassado(joão, iris). A regra [pr2] é então tentada.
- antepassado(X, Z) :-
progenitor(X, Y),
antepassado(Y, Z).

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

221

PROLOG

- Consultas em Prolog

- Como anteriormente, as variáveis X e Z são instanciadas para joão e iris, respectivamente. A variável Y, entretanto, não está instanciada ainda. O objetivo original, antepassado(joão, iris) é então substituído por dois novos objetivos derivados por meio da regra [pr2]:
progenitor(joão, Y), antepassado(Y, iris).
- Encontrando-se agora face a dois objetivos, o sistema tenta satisfazê-los na ordem em que estão formulados. O primeiro deles é fácil: progenitor(joão, Y) pode ser unificado com dois fatos do programa: progenitor(joão, josé) e progenitor(joão, ana). Mais uma vez, o caminho a ser tentado deve corresponder à ordem em que os fatos estão escritos no programa. A variável Y é então instanciada com josé nos dois objetivos acima, ficando o primeiro deles imediatamente satisfeito.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

222

PROLOG

- Consultas em Prolog
- O objetivo remanescente é então:
 - antepassado(josé, iris).
- Para satisfazer tal objetivo, a regra [pr1] é mais uma vez empregada.
- Essa segunda aplicação de [pr1], entretanto, nada tem a ver com a sua utilização anterior, isto é, o sistema Prolog usa um novo conjunto de variáveis na regra cada vez que esta é aplicada.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

223

PROLOG

- Consultas em Prolog
- A cabeça da regra deve então ser unificada como o nosso objetivo corrente, que é antepassado(josé, iris). A instânciação de X' e Y' fica: X' = josé e Y' = iris e o objetivo corrente é substituído por:
- progenitor(josé, iris)
- Esse objetivo é imediatamente satisfeito, porque aparece no programa como um fato. O sistema encontrou então um caminho que lhe permite provar, no contexto oferecido pelo programa dado, o objetivo originalmente formulado, e portanto responde "sim".

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

224

PROLOG

- Semântica
 - PROLOG tem três semânticas: a DECLARATIVA, a PROCEDURAL e a OPERACIONAL.
 - A semântica DECLARATIVA é aquela em que se escreve e lê o programa PROLOG e que é uma representação do que se conhece da definição do problema a resolver.
 - A semântica declarativa pode ser interpretada de três modos distintos:
 - Para resolver um problema dá-se uma nova cláusula, a pergunta, e o PROLOG tenta verificar se esta cláusula é compatível com o mundo definido;
 - Considera-se que os literais na cabeça e cauda de cada cláusula são objetivos a serem atingidos. Uma pergunta tem resposta afirmativa se o objetivo que ela define é satisfeito usando as regras do programa;
 - Olha as cláusulas como regras de uma gramática, onde cada regra de PROLOG corresponde a uma regra da gramática.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

225

PROLOG

- Semântica
 - Exemplo
 - Seja $P :- Q, R$ onde P, Q e R possuem a sintaxe de termos PROLOG. Duas alternativas para a leitura declarativa destas cláusulas são:
 - P é verdadeira se Q e R são verdadeiras, e
 - De Q e R, segue P.
 - A semântica declarativa determina se um dado objetivo é verdadeiro e, se for, para que valores de variáveis isto se verifica.
 - Assim, dado um programa e um objetivo G, o significado declarativo nos diz que:
 - Um objetivo G é verdadeiro (isto é, é satisfatível ou segue logicamente do programa) se e somente se há uma cláusula C no programa e uma instância I de C tal que:
 - A cabeça de I é idêntica a G, e
 - Todos os objetivos no corpo de I são verdadeiros.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

226

PROLOG

- Semântica
 - A semântica PROCEDURAL define não apenas o relacionamento lógico existente entre a cabeça e o corpo da cláusula, como também exige a existência de uma ordem na qual os objetivos serão processados.
 - Exemplo
 - Seja $P :- Q, R$ onde P, Q e R possuem a sintaxe de termos PROLOG. Duas alternativas para a leitura procedural destas cláusulas são:
 - Para solucionar o problema P primeiro solucione o subproblema Q e depois solucione o subproblema R.
 - Para satisfazer P, primeiro satisfaça Q e depois R.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

227

PROLOG

- Semântica
 - A semântica OPERACIONAL define como PROLOG responde a uma pergunta.
 - Seria ótimo se não fosse necessário conhecer esta semântica, pois neste caso, PROLOG seria realmente uma implementação do paradigma de programação em lógica. Entretanto, este não é o caso.
 - PROLOG pesquisa se a pergunta é verdadeira ou falsa construindo a árvore de possibilidades para trás e faz a busca em profundidade. Se a árvore a percorrer é muito grande, o tempo pode se tornar proibitivo e é conveniente restringir o espaço de busca o mais possível, o que só é possível sabendo como o PROLOG vai visitar os nós da árvore.
 - O modo como PROLOG vai visitar os nós da árvore varia se as declarações são apresentadas em ordem diferente. Consequentemente, PROLOG não é realmente uma linguagem declarativa.

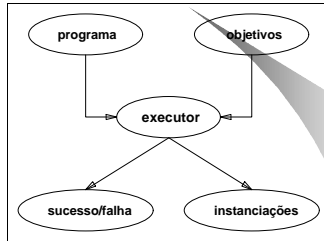
(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

228

PROLOG

- Semântica



(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

229

PROLOG

- Semântica

- Suas entradas e saídas são:
 - entrada: um programa e uma lista de objetivos;
 - saída: um indicador de sucesso/falha e instâncias de variáveis.
- O significado dos resultados de saída do *executor* é o seguinte:
 - O indicador de *sucesso/falha* tem o valor "sim" se os objetivos forem todos satisfeitos e "não" em caso contrário;
 - As *instâncias* são produzidas somente no caso de conclusão bem-sucedida e correspondem aos valores das variáveis que satisfazem os objetivos.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

230

PROLOG

- Semântica (Resumo)

- A interpretação declarativa de programas escritos em Prolog puro não depende da ordem das cláusulas nem da ordem dos objetivos dentro das cláusulas;
- A interpretação procedimental depende da ordem dos objetivos e cláusulas. Assim a ordem pode afetar a eficiência de um programa. Uma ordenação inadequada pode mesmo conduzir a chamadas recursivas infinitas;
- A semântica operacional representa um procedimento para satisfazer a lista de objetivos no contexto de um dado programa. A saída desse procedimento é o valor-verdade da lista de objetivos com a respectiva instanciación de sua variáveis. O procedimento permite o retorno automático (backtracking) para o exame de novas alternativas;

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

231

PROLOG

- Backtracking

- Na execução dos programas Prolog, a evolução da busca por soluções assume a forma de uma *árvore* - denominada "árvore de pesquisa" ou "search tree" - que é percorrida sistematicamente de cima para baixo (top-down) e da esquerda para direita, segundo o método denominado "depth-first search" ou "pesquisa primeiro em profundidade".

Exemplo

- Sejam a,b,c,etc... termos PROLOG


```

a :- b.
a :- c.
a :- d.
b :- e.
b :- f.
f :- g.
f :- h.
f :- i.
d.
      
```

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

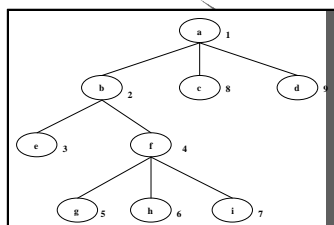
15/04/05

232

PROLOG

- Backtracking

- Ordem de visita aos nodos da árvore



a, b, e, (b), f, g, (f), h, (f), i, (f), (b), (a), c, (a), d
onde o caminho em backtracking é representado entre parênteses

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

233

PROLOG

- Backtracking

- Como foi visto, os objetivos em um programa Prolog podem ser bem-sucedidos ou falhar.
- Para um objetivo ser bem-sucedido ele deve ser unificado com a cabeça de uma cláusula do programa e todos os objetivos no corpo desta cláusula devem também ser bem-sucedidos. Se tais condições não ocorrerem, então o objetivo falha.
- Quando um objetivo falha, em um nodo terminal da árvore de pesquisa, o sistema Prolog aciona o mecanismo de backtracking, retornando pelo mesmo caminho percorrido, na tentativa de encontrar soluções alternativas.
- Ao voltar pelo caminho já percorrido, todo o trabalho executado é desfeito.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

234

PROLOG

- Backtracking

Exemplo 2

- `gosta(joão, jazz).`
- `gosta(joão, renata).`
- `gosta(joão, lasanha).`
- `gosta(renata, joão).`
- `gosta(renata, lasanha).`

- queremos saber de que ambos, joão e renata, gostam. Isto pode ser formulado pelos objetivos:

- `gosta(joão, X), gosta(renata, X).`

1. Encontra que joão gosta de jazz
2. Instancia X com "jazz"
3. Tenta satisfazer o segundo objetivo, determinando se "renata gosta de jazz"
4. Falha, porque não consegue determinar se renata gosta de jazz
5. Realiza um backtracking na repetição da tentativa de satisfazer `gosta(joão, X)`, esquecendo o valor "jazz"

(C) - Prof. Mauro Roisenberg 15/04/05 235

PROLOG

- Backtracking

Exemplo 2

6. Encontra que joão gosta de renata
7. Instancia X com "renata"
8. Tenta satisfazer o segundo objetivo determinando se "renata gosta de renata"
9. Falha porque não consegue demonstrar que renata gosta de renata
10. Realiza um backtracking, mais uma vez tentando satisfazer `gosta(joão, X)`, esquecendo o valor "renata"
11. Encontra que joão gosta de lasanha
12. Instancia X com "lasanha"
13. Encontra que "renata gosta de lasanha"
14. É bem-sucedido, com X instanciado com "lasanha"

(C) - Prof. Mauro Roisenberg 15/04/05 236

PROLOG

- Impurezas de PROLOG

- O backtracking automático é uma ferramenta muito poderosa e a sua exploração é de grande utilidade para o programador. Às vezes, entretanto, ele pode se transformar em fonte de ineficiência. A seguir se introduzirá um mecanismo para "podar" a árvore de pesquisa, evitando o backtracking quando este for indesejável.

- Para aumentar a eficiência no percurso da árvore de busca da solução do problema usam-se essencialmente dois operadores: CORTE ("CUT" representado por !) e FALHA ("FAIL").

- Seu uso deve ser considerado pelas seguintes razões:

- O programa irá executar mais rapidamente, porque não irá desperdiçar tempo tentando satisfazer objetivos que não irão contribuir para a solução desejada.
- (ii) Também a memória será economizada, uma vez que determinados pontos de backtracking não necessitam ser armazenados para exame posterior.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg 15/04/05 237

PROLOG

- CUT

- Algumas das principais aplicações do cut são as seguintes:

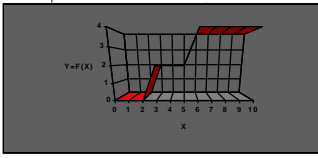
- Unificação de padrões, de forma que quando um padrão é encontrado os outros padrões possíveis são descartados
- Na implementação da negação como regra de falha
- Para eliminar da árvore de pesquisa soluções alternativas quando uma só é suficiente
- Para encerrar a pesquisa quando a continuação iria conduzir a uma pesquisa infinita, etc

(C) - Prof. Mauro Roisenberg 15/04/05 238

PROLOG

- CUT

Exemplo



(1) Se $X < 3$, então $Y = 0$
 (2) Se $3 \leq X < 6$, então $Y = 2$
 (3) Se $6 \leq X$, então $Y = 4$

que podem ser escritas em Prolog como uma relação binária $f(X, Y)$, como se segue:

```

f(X, 0) :- X < 3.
f(X, 2) :- 3 =< X, X < 6.
f(X, 4) :- 6 =< X.
  
```

(C) - Prof. Mauro Roisenberg 15/04/05 239

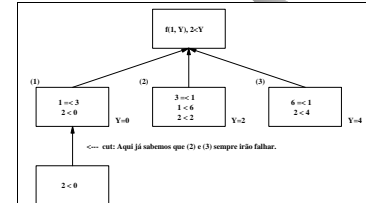
PROLOG

- CUT

Exemplo

- Vamos analisar o que ocorre quando a seguinte questão é formulada:

- `?- f(1, Y), 2 < Y`



(C) - Prof. Mauro Roisenberg 15/04/05 240

PROLOG

- CUT

- Exemplo

- O programa do exemplo, reescrito com cuts assume o seguinte aspecto:

- $f(X, 0) \text{ :- } X < 3, !.$

- $f(X, 2) \text{ :- } 3 \leq X, X < 6, !.$

- $f(X, 4) \text{ :- } 6 \leq X.$

- Aqui o símbolo "!" evita o backtracking nos pontos em que aparece no programa.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

241

PROLOG

- FALHA (FAIL)

- Negação por Falha

- "Maria gosta de todos os animais, menos de cobras". Como podemos dizer isto em Prolog? É fácil expressar uma parte dessa declaração: Maria gosta de X se X é um animal, isto é:

- $gosta(maria, X) \text{ :- } animal(X).$

- mas é necessário ainda excluir as cobras. Isto pode ser conseguido empregando-se uma formulação diferente:

- Se X é uma cobra, então não é verdade que maria gosta de X senão se X é um animal, então maria gosta de X.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

242

PROLOG

- FALHA (FAIL)

- Podemos dizer que alguma coisa não é verdadeira em Prolog por meio de um predicado pré-definido especial, "fail", que sempre falha, forçando o objetivo pai a falhar. A formulação acima pode ser dada em Prolog com o uso do fail da seguinte maneira:

- $gosta(maria, X) \text{ :- } cobra(X), !, fail.$

- $gosta(maria, X) \text{ :- } animal(X).$

- Aqui a primeira regra se encarrega das cobras. Se X é uma cobra, então o cut evita o backtracking (assim excluindo a segunda regra) e o fail irá ocasionar a falha da cláusula. As duas regras podem ser escritas de modo mais compacto como uma única cláusula, por meio do uso do conectivo ":-":

- $gosta(maria, X) \text{ :- } cobra(X), !, fail; animal(X).$

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

243

Raciocínio Inferencial

- As principais características do motor de inferência disponível em shells para sistemas especialistas dizem respeito às seguintes funcionalidades:

- Método de Raciocínio,
 - Estratégia de Busca,
 - Resolução de Conflito e
 - Representação de Incerteza e Imprecisão.

- Estas características compõem o Mecanismo de Raciocínio do Sistema Especialista.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

244

Raciocínio Inferencial

- Definição

- É aquele que se baseia em regras válidas de inferência. Pode ser aplicado em sistemas que adotam a representação do conhecimento sob a forma de regras de produção (os sistemas de produção) ou sob a forma de lógica.

- Modo de Raciocínio

- Existem basicamente dois modos de raciocínio:
 - Raciocínio para a Frente ou Forward Chaining, e
 - Raciocínio para Trás ou Backward Chaining.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

245

Raciocínio Inferencial

- Raciocínio para a Frente

- Consiste em começar com fatos encontrados em uma base de conhecimentos e manipulá-los com as regras (de inferência) tentando chegar a uma conclusão.
 - É também chamado de raciocínio dirigido por dados ("data driven").
 - A parte esquerda da regra (os antecedentes ou estado) é comparada com a descrição da situação atual contida na memória de trabalho. As regras que satisfazem a esta descrição tem a sua parte direita (ação ou novo estado) executada, o que, em geral, significa a introdução de novos fatos na memória de trabalho.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

246

Raciocínio Inferencial

- Raciocínio para a Frente

- Exemplo:

- REGRAS

- 1. $A \Rightarrow C$
 - 2. $B \Rightarrow D$
 - 3. $C \wedge D \Rightarrow E$

- MEMÓRIA DE TRABALHO

- A e B

- - C por 1
 - D por 2
 - E por 3

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

247

Raciocínio Inferencial

- Raciocínio para Trás

- Começa usando a conclusão e tenta provar se são verdadeiras ou falsas as premissas.
 - É também chamado de raciocínio dirigido por objetivos ("goal driven").
 - O comportamento do sistema é controlado por uma lista de objetivos. Um objetivo por ser satisfeito diretamente por um elemento da memória de trabalho, ou podem existir regras que permitam inferir algum dos objetivos correntes, isto é, que contenham uma descrição deste objetivo em suas partes direitas.
 - As regras que satisfazem esta condição têm as instâncias correspondentes às suas partes esquerdas adicionadas à lista de objetivos correntes.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

248

Raciocínio Inferencial

- Raciocínio para Trás

- Caso uma destas regras tenha todas as suas condições satisfeitas diretamente pela memória de trabalho, o objetivo em sua parte direita é também adicionado à memória de trabalho.
 - Um objetivo que não possa ser satisfeito diretamente pela memória de trabalho, nem inferido através de uma regra, é abandonado.
 - Quando o objetivo inicial é satisfeito, ou não há mais objetivos, o processamento termina.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

249

Raciocínio Inferencial

- Raciocínio para Trás

- O encadeamento para trás destaca-se em problemas nos quais há um grande número de conclusões que podem ser atingidas, mas o número de meios pelos quais elas podem ser alcançadas não é grande (um sistema de regras de alto grau de fan out), e em problemas nos quais não se pode reunir um número aceitável de fatos antes de iniciar-se a busca por respostas.
 - O encadeamento para trás também é mais intuitivo para o desenvolvedor, pois é fundamentada na recursão, um meio elegante e racional de programação, para onde a própria Programação em Lógica se direcionou.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

250

Raciocínio Inferencial

- Raciocínio para Trás

- Exemplo:

- REGRAS

- 1. $A \Rightarrow C$
 - 2. $B \Rightarrow D$
 - 3. $C \wedge D \Rightarrow E$

- MEMÓRIA DE TRABALHO

- A e B

- LISTA DE OBJETIVOS

- E

- - C e D por 3
 - C por 1 e A na M.T.
 - D por 2 e B na M.T.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

251

Raciocínio Inferencial

- O tipo de encadeamento normalmente é definido de acordo com o tipo de problema a ser resolvido.
- Problemas de planejamento, projeto e classificação tipicamente utilizam encadeamento para a frente,
- Problemas de diagnóstico, onde existem apenas algumas conclusões possíveis mas um grande número de estados iniciais, utilizam encadeamento para trás.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

252

Raciocínio Inferencial

- Uma característica importante do modo de raciocínio se refere à monotonicidade ou não do método de inferência.
- Sistemas monotônicos não permitem a revisão de fatos,
- Sistemas não monotônicos permitem a alteração dinâmica dos fatos e, portanto, quando um fato verdadeiro torna-se falso, todas as conclusões baseadas neste fato também devem tornar-se falsas.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

253

Métodos de Solução de Problemas

- Sistemas Especialistas focam um conjunto reduzido de problemas.
- O conhecimento é tanto teórico quanto prático.
- Devido a natureza heurística, os Sistemas Especialistas geralmente:
 - Suportam inspeção de seus processos de raciocínio;
 - Permite fácil modificação de habilidades a base de conhecimento (adição e exclusão);
 - Raciocinam heurísticamente.
- A facilidade de modificação da base de conhecimento é um fator muito importante na produção de um programa bem-sucedido.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

254

Métodos de Solução de Problemas

- Waterman (1986) classifica os problemas para S.E.:
 - **Interpretação:** conclusões de alto nível de dados brutos
 - **Predição:** projetar consequências prováveis
 - **Diagnose:** determinar causas de mau funcionamento com base em sintomas observáveis
 - **Projeto:** encontrar configurações de componentes que alcance objetivos de desempenho
 - **Planejamento:** estabelecer sequência de ações que alcançarão um conjunto de objetivos
 - **Monitoramento:** comparar comportamentos observados com esperado
 - **Instrução:** dar assistência ao processo de educação
 - **Controle:** governar o comportamento de um ambiente complexo

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

255

S.E. Baseados em Regras

- Sistema de Produção: Raciocínio Guiado por Objetivo
 - expressão-objetivo é colocada inicialmente na memória de trabalho
 - o sistema tenta casar as conclusões das regras com o objetivo, selecionando uma regra e colocando as suas premissas na memória de trabalho
 - Corresponde a uma decomposição do problema em subproblemas
 - O sistema trabalha retroativamente a partir do objetivo inicial até que todos sejam provados verdadeiros.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

256

S.E. Baseados em Regras

- Sistema de Produção: Raciocínio Guiado por Objetivo
 - Exemplo:
 - Regra 1: se o motor está recebendo combustível e o motor tentar pegar então o problema é vela
 - Regra 2: se o motor não tenta pegar e as luzes não acendem então o problema é bateria ou cabo
 - Regra 3: se houver combustível no tanque de combustível e houver combustível no carburador então o motor está recebendo combustível

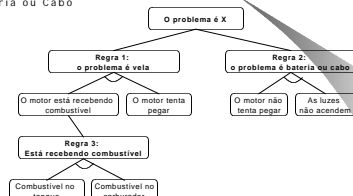
(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

257

S.E. Baseados em Regras

- Sistema de Produção: Raciocínio Guiado por Objetivo
 - X-Bateria ou Cabo



- O processo de busca se dá em profundidade, já que ele busca exaustivamente cada subobjetivo encontrado na base de regras antes de se mover para qualquer outro objetivo irmão.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

258

S.E. Baseados em Regras

- Sistema de Produção: Raciocínio Guiado por Dados
 - Compara o conteúdo da memória de trabalho com as condições de cada regra na base de regras.
 - Se os dados na memória de trabalho permitirem o disparo de uma nova regra, o resultado vai para a memória de trabalho e então o controle move para a próxima regra.
 - E após considerar todas as regras, a busca recomeça no início do conjunto de regras.

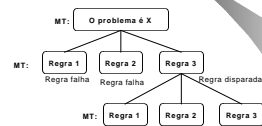
(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

259

S.E. Baseados em Regras

- Sistema de Produção: Raciocínio Guiado por Dados
Informação: Motor está recebendo Combustível



- O processo de busca se dá em amplitude

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

260

S.E. Baseados em Regras

- Heurística e Controle em Sistemas Especialistas
 - A regra **se p, q e r então s** pode ser interpretada como uma série de procedimentos ou passos para resolver problemas.
 - Esse método procedimental reflete a estratégia de solução do especialista.
 - **Exemplo:** ordenar as premissas de uma regra de forma que, seja testado primeiro aquilo que seja mais provável de não ser válido ou então mais fácil de se confirmar.
 - Isso permite eliminar uma regra (e com isso parte do espaço de busca) o mais cedo possível.
 - Assim: se o motor está tentando pegar, não importa se ele está ou não recebendo combustível.
 - Esses aspectos são fundamentados em naturezas heurísticas.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

261

S.E. Baseados em Regras

- Heurística e Controle em Sistemas Especialistas
 - O algoritmo RETE (Forgy, 1982) pode ser utilizado para otimizar a busca por todas as regras potencialmente úteis.
 - O RETE compila regras numa estrutura de rede que permite que o sistema realize o casamento de regras com dados, seguindo diretamente um ponteiro para a regra.
 - Esse algoritmo acelera bastante a execução, especialmente grandes conjuntos de regras.
 - Sistemas fortemente heurísticos podem falhar, ou por encontrar um problema que não se encaixe nas regras, ou aplicar erroneamente uma regra heurística não apropriada.
 - Outras abordagens, tais como baseadas em modelo, em casos ou híbridas, tentam conferir esta flexibilidade.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

262

Sistemas Baseados em Modelos

- Surgiram em meados dos anos 70 e evoluíram através dos anos 80 (Davis e Hamscher, 1982).
- Sistema de raciocínio baseado em conhecimento, com análise fundamentada diretamente na especificação e na funcionalidade de um sistema físico.
- É criada uma simulação, referida como "qualitativa", da função do que está sendo compreendido ou reparado.
- Uma falha se manifesta na discrepância entre os comportamentos previsto e observado.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

263

Sistemas Baseados em Modelos

- Raciocínio qualitativo baseado em modelo inclui:
 - Uma descrição de cada componente do dispositivo: simular o comportamento do componente.
 - Uma descrição da estrutura interna do dispositivo: representação dos componentes e interconexões, juntamente com a habilidade de simular interações dos componentes.
 - Diagnóstico de um problema particular, com desempenho real do dispositivo, geralmente medidas de suas entradas e saídas.
- A tarefa é determinar quais destes componentes poderiam ter falhado, de modo que explique o comportamento observado.
- Em vez de raciocinar diretamente a partir de fenômenos observados buscando explicações causais, a abordagem baseada em modelo tenta representar dispositivos e configurações de dispositivos num nível causal ou funcional.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

264

Sistemas Baseados em Casos

- Raciocínio a partir de casos, exemplos de problemas passados e suas soluções.
- Usa uma base de dados explícita de soluções de problema para tratar novas situações de solução de problema.
- Permitem que o sistema aprenda a partir da sua experiência, pois após encontrar uma solução, pode armazená-la

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

265

Sistemas Baseados em Casos

- Para cada novo caso:
 - Recupera casos da memória
 - Modificam um caso recuperado de modo que ele seja aplicável à situação corrente
 - Aplicam o caso transformado
 - Armazenam a solução, com um registro de sucesso ou fracasso, para uso futuro.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

266

Sistemas Baseados em Casos

- Kolodner (1993) propõe um conjunto de heurísticas organizar o armazenamento e recuperação de casos:
 - Preferência orientada a objetivo
 - Preferência por características salientes
 - Preferência por maior especificidade
 - Preferência por ocorrências frequentes
 - Preferência por atualidade
 - Preferência por facilidade de adaptação

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

267

Raciocínio baseado em regras

- **Vantagens:**
 - Capacidade de usar, de uma forma direta, o conhecimento experimental, adquirido de especialistas
 - As regras são apropriadas para busca em espaço de estados
 - É possível um bom desempenho em domínios limitados
 - Bons recursos de explanação
- **Desvantagens:**
 - Frequentemente regras são de natureza heurísticas e não capturam o conhecimento funcional.
 - Regras heurísticas tendem a ser 'frágeis' e não são capazes de lidar com informação faltante ou valores inesperados
 - Explicações funcionam apenas no nível descritivo omitindo explicações teóricas
 - O conhecimento tende a ser dependente da tarefa.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

268

Raciocínio baseado em Casos

- **Vantagens:**
 - Habilidade de codificar diretamente conhecimento histórico
 - Permite atalhos no raciocínio
 - Permite que um sistema evite erros passados e explore sucessos passados
 - Não é necessária a análise extensiva do conhecimento do domínio
 - Estratégias de indexação apropriadas aumentam a capacidade de compreensão e o poder de solução de problemas.
- **Desvantagens:**
 - Os casos frequentemente não incluem um conhecimento profundo do domínio.
 - Uma grande base de casos pode sofrer problemas de armazenamento
 - É difícil determinar bons critérios para indexar e fazer casamento de casos.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

269

Raciocínio baseado em Modelo

- **Vantagens:**
 - Habilidade de usar conhecimento funcional ou estrutural do domínio
 - Os raciocinadores tendem a ser robustos
 - Algum conhecimento pode ser transferido entre tarefas
 - Os raciocinadores podem fornecer explicações causais.
- **Desvantagens:**
 - Falta de conhecimento experimental (descritivo) do domínio
 - Requer um modelo explícito do domínio
 - Alta complexidade
 - Situações excepcionais

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

270

Lógicas Não-Clássicas e Tratamento de Incertezas

- Uma das características da lógica clássica é o axioma do terceiro excluído, isto é, não existe uma terceira alternativa para um valor verdade além do par {Verdadeiro, Falso}.
- No mundo real, é comum que os conhecimentos disponíveis não sejam nem absolutamente verdadeiros nem absolutamente falsos, podendo ser, por exemplo, paradoxais, incertos, desconhecidos, indeterminados, verdadeiros em geral, verdadeiros com uma certa probabilidade, etc.
- Para estender a lógica clássica, é necessário alterar o conjunto de valores verdade.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

271

Lógicas Não-Clássicas e Tratamento de Incertezas

- Dois tipos de formalismos foram propostos:
 - valores verdade numéricos
 - (probabilidade, lógica nebulosa, teoria das possibilidades, etc.)
 - valores verdade simbólicos
 - (3, 4 ou mais valores verdade)

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

272

Lógicas Não-Clássicas e Tratamento de Incertezas

- Lógica Multivalores - Valores de Verdade SIMBÓLICOS
 - Uma lógica com três valores de verdade admite um valor de verdade que representa um valor entre verdadeiro e falso.
 - A interpretação deste terceiro valor difere nas diversas lógicas
 - pode indicar um estado de parcial ignorância;
 - pode indicar a impossibilidade de se atribuir verdadeiro ou falso;
 - pode indicar a falta de sentido de se atribuir verdadeiro ou falso.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

273

Lógicas Não-Clássicas

♦ Lógica Multivalores

LÓGICA DE KLEENE

- Concebida originalmente para acomodar declarações matemáticas não decididas.
- O terceiro valor de verdade é \perp ou "u" de "undecided" (não decidido), indica que "não se sabe se é verdadeiro ou falso".
- Não admite a interpretação de que "não é verdadeiro nem falso".
- As tabelas verdade propostas por Kleene são:

	V	F	\perp
V	V	F	\perp
F	F	V	\perp
\perp	\perp	\perp	\perp

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

274

Lógicas Não-Clássicas

♦ Lógica Multivalores

LÓGICA DE KLEENE

- O valor de verdade **indecidido** indica este estado de ignorância, de maneira que quando uma fórmula lógica pode ter seu valor de verdade decidido, a despeito desta ignorância, este valor deve ser adotado, assim:
 - $V \vee \perp = V$ e $F \wedge \perp = F$, mas
 - $V \wedge \perp = \perp$ e $F \vee \perp = \perp$

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

275

Lógicas Não-Clássicas

♦ Lógica Multivalores

LÓGICA DE LUKASIEWICZ

- Lukasiewicz usa \perp ou "I" para terceiro valor de verdade (I de "indeterminate").
- Sua lógica foi desenvolvida para lidar com afirmações incertas futuras, ou seja, a existência de proposições contingentes sobre o futuro.
- De acordo com sua interpretação, tais proposições não são nem verdadeiras nem falsas, mas (metafisicamente) indeterminadas.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

276

Lógicas Não-Clássicas

• Lógica Multivalores

LÓGICA DE LUKASIEWICZ

- Há uma diferença em relação à interpretação de "u" de Kleene. O "i" não é resultante da falta de informação, mas sim do impedimento de se poder fazer uma avaliação conclusiva para verdadeiro ou falso. Algo que ainda não ocorreu é menos "real" do que algo verdadeiro ou falso.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

277

Lógicas Não-Clássicas

• Lógica Multivalores

LÓGICA DE LUKASIEWICZ

- A base da filosofia que suporta a lógica de Lukasiewicz é aristotélica, ou seja, considerar algo futuro como verdadeiro ou falso é adotar o fatalismo, doutrina que prega que o futuro é pré-determinado.
- A única diferença entre as tabelas verdade das lógicas de Kleene e Lukasiewicz é o valor de $\perp \rightarrow \perp$, que para Kleene é \perp e para Lukasiewicz é V.
- As tabelas verdade propostas por Kleene são:

	V	F	^
0	F	V	^

^	V	F	^
V	V		
F	F	F	
^	^	F	^

v	V	F	^
V	V		
F	V	F	
^	V	^	^

⊗	V	F	^
V	V	F	^
F	V	V	V
^	V	^	V

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

278

Lógicas Não-Clássicas

• Lógica Multivalores

LÓGICA DE BOCHVAR

- O objetivo de Bochvar ao propor uma lógica de três valores verdade foi o tratamento formal dos paradoxos semânticos.
 - Paradoxo do Cretense - Um cretense afirma que todos os cretenses são mentirosos.
 - "Esta sentença é falsa".
- O terceiro valor de verdade de Bochvar corresponde a uma proposição paradoxal "m" (de meaningless).
- Ao contrário de "u" e de "i", que correspondem a um grau de informação menor que verdadeiro ou falso, o valor de verdade paradoxal é ao mesmo tempo verdadeiro e falso.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

279

Lógicas Não-Clássicas

• Lógica Multivalores

LÓGICA DE BOCHVAR

- Os operadores \neg e \wedge propostos por Bochvar são idênticos aos de Kleene e Lukasiewicz, mas os operadores \vee e \rightarrow são distintos.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

280

Lógicas Não-Clássicas

• Lógica Multivalores

LÓGICA DE BOCHVAR

- De certa maneira, o valor verdade paradoxal tem um caráter "contagioso" tornando paradoxal qualquer fórmula onde um elemento seja paradoxal.

V	V	F	m	⊗	V	F	m
V	V				V	V	F m
F	V	F			F	V	V m
m	m	m	m		m	m	m m

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

281

Lógicas Não-Clássicas

• Lógica Multivalores

LÓGICA DE BELNAP

- As lógicas de Kleene (1952), Lukasiewicz (1920) e Bochvar (1939) são anteriores ao início da IA.
- Em 1977, Belnap propôs uma lógica de 4 valores verdade, projetada especificamente para servir como base para um sistema computacional de perguntas e respostas capaz de, mesmo em face de contradições, continuar a gerar respostas compatíveis com as informações anteriormente armazenadas.
- O conjunto de valores verdade é o seguinte:
 $B = \{\perp, \{V\}, \{F\}, \{V, F\}\}$
 onde os valores tem as seguintes interpretações:
 $\{\perp\}$ = desconhecido
 $\{V\}$ = absolutamente verdadeiro
 $\{F\}$ = absolutamente falso
 $\{V, F\}$ = contraditório

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

282

Lógicas Não-Clássicas

♦ Lógicas Não Monotônicas

- Fórmulas quantificadas universalmente na lógica de predicados são válidas para qualquer elemento do domínio, sem nenhuma exceção.
- Certas situações do mundo real (percepção, ambiguidade, senso comum, causalidade ou predição) são a tal ponto complexas, que qualquer conhecimento sobre elas será inevitavelmente incompleto.
- Um formalismo para raciocinar neste tipo de situação deve admitir expressões que sejam válidas em geral e capazes de reconhecer e assimilar exceções quando necessário.
- Neste caso, corre-se o risco de retirar conclusões anteriores face a novas informações, o que caracteriza a não-monotonicidade.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

283

Lógicas Não-Clássicas

♦ Lógica Não Monotônicas

EXEMPLO

- Todo pássaro pode voar.
- Tweety pode voar?
- Na ausência de informações contrárias um pássaro normal voa - Logo, Tweety voa.
- Mas descobre-se que Tweety é um pinguim (pinguins não são pássaros normais no que se refere à capacidade de voar) - Logo, Tweety não voa.
- Mas descobre-se que Tweety é um pinguim do planeta Krypton e que ele não é um pássaro ou um pinguim normal, e que no planeta Krypton pinguins voam - Logo, Tweety voa.
- Mas descobre-se ...

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

284

Tratamento de Incertezas

- ♦ A imperfeição da informação é geralmente conhecida na literatura de sistemas baseados em conhecimento de incerteza.
- ♦ No entanto, este termo é muito restritivo; o que se convencionou chamar de tratamento de incerteza pode, na verdade, estar endereçando outras imperfeições da informação, com imprecisão, conflito, ignorância parcial, etc.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

285

Tratamento de Incertezas

- ♦ **Informação perfeita:** O filme começa às 18h 15 min.
- ♦ **Informação imprecisa:** O filme começa entre 8h e 9h.
- ♦ **Informação incerta:** Eu acho que o filme começa às 8h.
- ♦ **Informação vaga:** O filme começa lá pelas 8h.
- ♦ **Informação probabilista:** É provável que o filme comece às 8h.
- ♦ **Informação possibilista:** É possível que o filme comece às 8h.
- ♦ **Informação inconsistente:** Maria disse que o filme começa às 8h mas João disse que ele começa às 10h.
- ♦ **Informação incompleta:** Eu não sei a que horas o filme começa, mas normalmente neste cinema os filmes começam às 8h.
- ♦ **Ignorância Total:** Eu não faço a menor idéia do horário do filme.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

286

Tratamento de Incertezas

- ♦ As informações podem variar de perfeitas a completamente imperfeitas.
- ♦ Mesmo lidando diariamente com este tipo de informações, conseguimos tomar decisões razoáveis.
- ♦ O mesmo deveria ocorrer com sistemas baseados em conhecimento, em face de informações imperfeitas.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

287

Tratamento de Incertezas

- ♦ Sabemos que o conhecimento humano não é determinístico. Não há especialista que sempre se encontre em condições de afirmar determinada conclusão com certeza absoluta. Graus de confiança são frequentemente atribuídos às suas respostas, principalmente quando existe mais de uma. Este, sem dúvida, é um dos mais fortes pontos críticos na elaboração de uma representação computacional do saber humano.
- ♦ Vejamos a dificuldade em representar a confiabilidade das informações:
 - Especialistas humanos não se sentem confortáveis em pensar em termos de probabilidade. Suas estimativas não precisam corresponder àquelas definidas matematicamente;
 - Tratamentos rigorosamente matemáticos de probabilidade utilizam informações nem sempre disponíveis ou simplificações que não são claramente justificáveis em aplicações práticas.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

288

Tratamento de Incertezas

- Para cada um dos tipos de informação existem modelos formais (e também informais) para tratamento.
 - A informação de conotação probabilística pode ser tratada pela teoria de probabilidades e pela teoria da crença ou evidência (também conhecida como Dempster-Schafer).
 - A informação imprecisa, de caráter possibilista e/ou vaga pode ser tratada pela teoria dos conjuntos nebulosos, "rough sets" ou teoria das possibilidades.
 - Informações inconsistentes e/ou incompletas podem ser tratadas por lógicas não clássicas (Belnap, Lucziewicz, etc).

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

289

Fatores de Certeza

- O primeiro sistema a utilizar-se dos fatores de certeza foi o MYCIN, para recomendar terapias apropriadas para pacientes com infecção bacteriológicas;
- O Fator de Certeza (FC) foi originalmente definido como a diferença entre a crença e a descrença:

$$FC[H, E] = MC[H, E] - MD[H, E]$$
- $FC[H, E] \Rightarrow$ FC na hipótese H dada a evidência E
- $MC[H, E] \Rightarrow$ medida de crença em H dado E
- $MD[H, E] \Rightarrow$ medida de descrença em H dado E

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

290

Fatores de Certeza - Utilidade

- É um mecanismo simples para combinar crença e descrença em um número;
- Pode ser usado para um conjunto de hipóteses em ordem de importância.
 - Por exemplo, se um paciente tem certos sintomas os quais sugerem diversas doenças possíveis, a doença com um alto FC poderia ser a primeira a ser investigada pelos testes ordenados;

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

291

Fatores de Certeza - Utilidade

- O FC indica a rede de crença em uma hipótese sobre alguma evidência. Um FC positivo significa que a evidência suporta a hipótese desde que $MC > MD$. Um $FC=1$ significa que a evidência definitivamente prova a hipótese. Um $FC=0$ significa:
 1. que não existe evidência ou ela é irrelevante ($MC=MD=0$) ou
 2. A crença é cancelada pela descrença pois as duas são igualmente fortes ou fracas ($MC=MD \neq 0$).

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

292

Fatores de Certeza - Utilidade

- O FC negativo significa que a evidência favorece a *negação* da hipótese, desde que $MC < MD$ (i.e., existem mais razões para a descrença em uma hipótese do que para a crença nela);
- Por exemplo, um $FC=-70\%$ significa que a descrença é 70% maior do que a crença, e vice-versa; entretanto, diferentes valores de MC e MD levam a um mesmo valor de FC:

$$FC = 0,80 = 0,80 - 0$$

$$FC = 0,80 = 0,95 - 0,15$$

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

293

Fatores de Certeza - Utilidade

Características	Valores
Variações	$0 \leq MC \leq 1$ $0 \leq MD \leq 1$ $-1 \leq FC \leq 1$
Certeza das Hipóteses Verdadeiras $P(H E) = 1$	$MC = 1$ $MD = 0$ $FC = 1$
Certeza das Hipóteses Falsas $P(\sim H E) = 1$	$MC = 0$ $MD = 1$ $FC = -1$
Perda de Evidência $P(H E) = P(H)$	$MC = 0$ $MD = 0$ $FC = 0$

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

294

Fatores de Certeza - Utilidade

- A combinação de evidências requer regras como as dadas a seguir:

Evidência, E	Certeza do Antecedente
E_1 e E_2	$\min[FC(H, E_1), FC(H, E_2)]$
E_1 ou E_2	$\max[FC(H, E_1), FC(H, E_2)]$
$\neg E$	$-FC(H, E)$

- Podemos criar ainda expressões mais complexas:

$$E = (E_1 \wedge E_2 \wedge E_3) \vee (E_4 \wedge \neg E_5)$$

$$E = \max[\min(E_1, E_2, E_3), \min(E_4, E_5)]$$

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

295

Fatores de Certeza

- A fórmula fundamental para o FC de uma regra "Se E então H " é dado pela fórmula:

$$FC(H, e) = FC(H, E) * FC(E, e)$$

- $FC(E, e)$ é o fator de certeza da evidência E baseada na evidência incerta e ;
- $FC(H, E)$ é o fator de certeza da hipótese supondo que a evidência E é conhecida com certeza, quando $FC(E, e) = 1$;
- $FC(H, e)$ é o FC da hipótese baseada na incerteza da evidência e .

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

296

Fatores de Certeza

- Por exemplo, tem-se a regra $A \wedge B \wedge C \rightarrow D$ com uma evidência de 0,7 (também chamado de fator de atenuação):

$$FC(D, E) = FC(H, A \wedge B \wedge C) = 0,7$$

- Seja e a evidência observada que dirige a conclusão de que as E_i são conhecidas com certeza, suponha que:

$$FC(A, e) = 0,5$$

$$FC(B, e) = 0,6$$

$$FC(C, e) = 0,3$$

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

297

Fatores de Certeza

- Logo:

$$FC(E, e) = FC(A \wedge B \wedge C, e)$$

$$FC(E, e) = \min[FC(A, e), FC(B, e), FC(C, e)]$$

$$FC(E, e) = 0,3$$

- O fator de certeza da conclusão é:

$$FC(D, E) = FC(D, E) * FC(D, e) = 0,7 * 0,3 = 0,21$$

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

298

Fatores de Certeza - Considerações

- Ainda que o MYCIN tenha tido sucesso em diagnóstico, existem dificuldade com os fundamentos teóricos dos FCs. A maior vantagem dos FC foi a simples computação pela qual a incerteza seria propagada no sistema.
- Conclusão: não existe uma técnica, ou forma de raciocínio melhor que outros. Dependendo do problema a ser resolvido, existem escolhas mais razoáveis.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

299

Raciocínio Probabilístico

- O Raciocínio Probabilístico é talvez o mais antigo que trata com mecanismos de incerteza.
- Apóia-se em informações probabilísticas sobre fatos de um domínio e chega a uma conclusão a respeito de um novo fato, conclusão esta, que fica associada a uma probabilidade.
- Quando se fala de probabilidade neste contexto, não se faz referência a números, e sim, a um tipo de raciocínio.
- Exemplo:
 - "A chance de que um paciente portador da doença D apresente no futuro próximo o sintoma S é p ".
- A verdade desta afirmação não é o valor preciso de p , mas um valor de crença do médico.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

300

Raciocínio Probabilístico

- A teoria da probabilidade adota a frase epistêmica "...posto que C é conhecido" como uma primitiva da linguagem. Sintaticamente isto é denotado por:

$$P(A | C) = p$$

- onde A é uma dada proposição.
- Esta frase combina as noções de conhecimento e crença pela atribuição à A de um grau de crença p, dado o conhecimento de C.
- C é chamado de "contexto da crença em A", e a notação $P(A | C)$ é chamada "Probabilidade Condicional de Bayes".
- O teorema de Bayes provê a base para o tratamento da imperfeição da informação. Ele computa a probabilidade de um dado evento, dado um conjunto de observações.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

301

Raciocínio Probabilístico

- Seja:
 - $P(H_i | E)$ a probabilidade de que a hipótese H_i seja verdadeira dada a evidência E.
 - $P(E | H_i)$ a probabilidade que a evidência E será observada se a hipótese H_i for verdadeira.
 - $P(H_i)$ a probabilidade "a priori" que a hipótese H_i é verdadeira na ausência de qualquer evidência específica.
 - K o número de hipóteses possíveis
- O teorema de Bayes é formulado como:

$$P(H_i | E) = \frac{P(E | H_i) \cdot P(H_i)}{\sum P(E | H_j) \cdot P(H_j)}$$

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

302

Raciocínio Probabilístico

Exemplo:

- Suponhamos que no meio da noite dispare o alarme contra ladrões da nossa casa. Queremos então saber quais são as chances de que esteja havendo uma tentativa de roubo. Suponhamos que existam 95% de chances de que o alarme dispare quando uma tentativa de roubo ocorre, que em 1% das vezes o alarme dispare por outros motivos, e que em nosso bairro existe uma chance em 10.000 de uma dada casa ser roubada em um dado dia.
- Temos então:
 - $P(\text{alarme} | \text{roubo}) = 0,95$
 - $P(\text{alarme} | \sim \text{roubo}) = 0,01$
 - $P(\text{roubo}) = 0,0001$
- Então $P(\text{roubo} | \text{alarme}) = 0,00941 = 0,9\%$
- Este valor pode ser intuitivamente entendido quando verificamos que as chances de haver um roubo e o alarme tocar (0,000095) são muito pequenas em relação às chances de haver um alarme falso.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

303

Raciocínio Probabilístico

- Hoje em dia se fala da probabilidade subjetiva.
- Ela trata com eventos que não tem uma base histórica sobre a qual se possa extrapolar.
- A probabilidade subjetiva é uma crença ou opinião expressa como uma probabilidade.
- Exemplo:
 - Em SE para diagnóstico médico, um evento poderia ser:
 - E = "O paciente está coberto com manchas vermelhas"
 - e a proposição é:
 - A = "O paciente tem sarampo".
 - A probabilidade condicional $P(A | E)$ não é uma probabilidade no sentido clássico ou frequentista.
 - Ela pode ser interpretada como o grau de crença que A é verdadeiro dado o evento E.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

304

Raciocínio Probabilístico

- Atualmente existem shells para o desenvolvimento de Sistemas Especialistas com raciocínio probabilista, dentre eles tem-se o SPIRIT, o HUGIN e o NETICA.
- Dificuldades com o Método Bayesiano
 - A obtenção das probabilidades das hipóteses H_i e as condicionais $P(H_i | E)$ é considerado uma tarefa difícil porque as pessoas não sabem estimar probabilidades. No entanto, as estimativas necessárias de probabilidade são feitas pelo especialista a partir de seu conhecimento e experiência no domínio pesquisado.
 - A base de conhecimento tem que ser completa. Isto é, todas as evidências relevantes às hipóteses consideradas devem estar explícitas na base de conhecimento.
 - Em probabilidade parte-se do fato que as evidências são independentes. Isto nem sempre é verdadeiro no caso das doenças, posto que alguns sintomas poderiam ser evidência de outros.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

305

Raciocínio por Crença

- Baseia-se essencialmente nos trabalhos feitos originalmente por Dempster, que tentou modelar a incerteza por uma faixa de probabilidades, mais do que um simples número probabilístico. Shafer estendeu e refinou o trabalho de Dempster.
- A teoria de Dempster-Shafer supõe que existe um conjunto fixo de elementos mutuamente exclusivos e exaustivos, chamado "meio" e simbolizado por Θ :

$$\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n\}$$

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

306

Raciocínio por Crença

- O meio é o conjunto de objetos que são de interesse, por exemplo:
 $\theta = \{\text{avião}, \text{submarino}, \text{trem}, \text{ônibus}\}$
- Como os elementos são mutuamente exclusivos (um trem não é um avião) e o meio exaustivo, pode existir somente um subconjunto para cada pergunta do sistema;
- Pergunta: "Qual deles é transporte terrestre?"
- Resposta: Um subconjunto de θ , $\{\theta_3, \theta_4\} = \{\text{trem}, \text{ônibus}\}$

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

307

Raciocínio por Crença

- Assim, cada subconjunto de θ pode ser interpretado como uma possível resposta a uma pergunta.
- Desde que os elementos são mutuamente exclusivos e o meio exaustivo, pode existir somente um subconjunto com a resposta correta.
- Neste modelo, a informação fornecida por uma fonte de conhecimento a respeito do valor real de uma variável x , definida em um universo de discurso θ , é codificada sob a forma de um corpo de evidência sobre θ .

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

308

Raciocínio por Crença

- Um corpo de evidência é caracterizado por um par (F, m) , onde F é uma família de subconjuntos de θ e m é uma função de massa.
- A função m é definida para todos os elementos de θ e todos os seus subconjuntos. Onde m é um valor que mede a quantidade de crença corretamente atribuída a um subconjunto de θ .
- Se θ contém n elementos, então existem 2^n subconjuntos de θ . Entretanto muitos destes subconjuntos não tem significado para o domínio do problema (e portanto o valor de m a eles associado será 0).
- A teoria de Dempster-Shafer não força crenças pelo desconhecimento de uma hipótese. Em vez disso a quantidade é designada somente aos subconjuntos do meio aos quais deseja-se designar crença.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

309

Raciocínio por Crença

Seja um conjunto $\theta = \{A, B, C\}$

Suponha-se que feita uma pergunta sobre o conjunto θ surge uma evidência de 0,7 que a resposta encontra-se sobre os elementos A e C ; temos então: $m1(\{A, C\}) = 0,7$

O restante da crença é designada ao meio.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

310

Raciocínio por Crença

- Crença designada ao meio: $m1(\theta) = 1 - 0,7 = 0,3$
- Note que a crença designada ao meio é diferente da descrença em relação ao fato (algo como $m1(\sim\{A, C\})$). Isso acontece porque a crença designada ao meio inclui todo o meio θ , ou seja, $\{A, B, C\}$;
- A crença do meio não necessariamente precisa ser 1, como na teoria da probabilidade.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

311

Raciocínio por Crença - Exemplo

- Inicia-se um universo exaustivo de hipóteses mutuamente exclusivas:
 $\theta = \{\text{artrite}, \text{lupus}, \text{poliartrite}, \text{gota}\}$
- A meta é anexar aos elementos de θ algum valor de crença. Nem todas as evidências sustentam diretamente elementos isolados. Em geral elas sustentam grupos de elementos (subconjuntos);

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

312

Raciocínio por Crença - Exemplo

- Por exemplo: febre pode sustentar {artrite, lupus} e erupções sustentam {lupus};
- Como os elementos são mutuamente exclusivos, as evidências em favor de um podem afetar a crença em outros;
- Inicialmente não se tem nenhuma informação sobre como escolher entre as quatro hipóteses (ou seja, não se tem nenhuma evidência) então $m(\theta) = 1$ o que significa que todos os outros valores são 0;

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

313

Raciocínio por Crença - Exemplo

- O valor real pode ser de um dos elementos: artrite (A), lupus (L), poliartrite (P) ou gota (G);
- Mas não se tem informações que permitam atribuir crença a algum deles (entretanto tem-se a certeza de que a resposta está em algum lugar deste conjunto);
- Supondo que surgiram evidências de febre, o que sugeriu, com fator de crença 0,6 que o diagnóstico correto é {A, L} (lupus ou artrite);

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

314

Raciocínio por Crença - Exemplo

- Temos então os seguinte fatores:

$$m1(\{A, L\}) = 0,6$$

$$m1(\theta) = 0,4$$

- Outro sintoma (evidência) apresentado pelo paciente: erupções. Esta sugere com crença de 0,8 que o diagnóstico seria lupus ({L}) temos o segundo fator de crença, dado por m2:

$$m2(\{L\}) = 0,8$$

$$m2(\theta) = 0,2$$

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

315

Raciocínio por Crença - Exemplo

As evidências podem ser combinadas numa soma ortogonal que é calculada pela somatória do produto das intersecções m .

Valores de m	$m2(\{L\}) = 0,8$	$m2(\theta) = 0,2$
$m1(\{A, L\}) = 0,6$	$\{L\} = 0,48$	$\{A, L\} = 0,12$
$m1(\theta) = 0,4$	$\{L\} = 0,32$	$(\theta) = 0,08$

$$m3(\{L\}) = m1 \otimes m2(\{L\}) = 0,48 + 0,32 = 0,80$$

$$m3(\{A, L\}) = m1 \otimes m2(\{A, L\}) = 0,12$$

$$m3(\theta) = m1 \otimes m2(\theta) = 0,08 \text{ (não crença)}$$

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

316

Raciocínio por Crença - Exemplo

Vamos supor que surja uma terceira evidência conflitante:

$$m3(\{P\}) = 0,95 \text{ e } m(\theta) = 0,05$$

Valores de m	$m1 \otimes m2(\{L\}) = 0,8$	$m1 \otimes m2(\{A, L\}) = 0,12$	$m1 \otimes m2(\theta) = 0,08$
$m3(\{P\}) = 0,95$	$\{P\} = 0,76$	$\{P\} = 0,114$	$\{P\} = 0,076$
$m3(\theta) = 0,05$	$\{L\} = 0,04$	$\{A, L\} = 0,006$	$(\theta) = 0,004$

O conjunto nulo, $\{\emptyset\}$, ocorre porque $\{P\}$ e $\{L\}$ não têm elementos comuns, assim como entre $\{P\}$ e $\{A, L\}$

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

317

Raciocínio por Crença - Exemplo

$$m1 \otimes m2 \otimes m3(\{P\}) = 0,076$$

$$m1 \otimes m2 \otimes m3(\{L\}) = 0,04$$

$$m1 \otimes m2 \otimes m3(\{A, L\}) = 0,006$$

$$m1 \otimes m2 \otimes m3(\theta) = 0,004$$

$$m1 \otimes m2 \otimes m3(\{\emptyset\}) = 0, \text{ pela definição do conjunto vazio}$$

- A soma de todos os m :

$$\sum m1 \otimes m2 \otimes m3(X) = 0,076 + 0,04 + 0,006 + 0,004 = 0,126$$

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

318

Raciocínio por Crença - Exemplo

- Uma soma de 1 é requerida desde que as evidências combinadas seja um m válido (como retiramos os valores para o conjunto vazio, todas as demais evidências são válidas). Como a soma é menor que 1, é preciso fazer uma normalização, que nada mais é do que uma regra de 3 que diz "a soma de todos os m está para 100 assim como cada combinação de m está para x ";
- Calculamos assim, proporcionalmente, os novos valores normalizados dos m 's:

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

319

Raciocínio por Crença - Exemplo

$$m1 \otimes m2 \otimes m3(\{P\}) = 0,603$$

$$m1 \otimes m2 \otimes m3(\{L\}) = 0,317$$

$$m1 \otimes m2 \otimes m3(\{A, L\}) = 0,0476$$

$$m1 \otimes m2 \otimes m3(\emptyset) = 0,0031$$

- Nota-se que a existência da evidência de $\{P\}$ prejudicou a crença em $\{L\}$, o que de fato era esperado.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

320

Raciocínio por Crença - Dificuldades

- A normalização pode levar a resultados opostos às expectativas;
- Acontece porque a normalização ignora a crença de que um objeto considerado não existe, ou seja, a solução deve estar no conjunto.
- Um exemplo citado por Zadeh é o da crença de dois médicos, A e B, em uma doença de um paciente.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

321

Raciocínio por Crença - Dificuldades

- As crenças são:

$$ma(meningite) = 0,99$$

$$ma(tumor\ cerebral) = 0,01$$

$$mb(traumatismo) = 0,99$$

$$mb(tumor\ cerebral) = 0,01$$

- Os médicos diferem grandemente no problema principal, mas a regra de Dempster valoriza a opinião comum, resultando 1 para o tumor cerebral. O resultado é inesperado e contra a nossa intuição.

(C) - Prof. Mauro Roisenberg

15/04/05

322