Inteligência Artificial
IA

Prof. João Luís Garcia Rosa

V. REPRESENTAÇÃO DE CONHECIMENTO ATRAVÉS DO PROLOG

2004

Introdução

- A idéia de usar lógica como um formalismo executável em computador recebeu um grande ímpeto com o advento da linguagem Prolog (“PROgrammation en LOGic”). Desenvolvida na década de 1970 em Edinburgh, a linguagem Prolog tem a sua aplicação dirigida à computação simbólica (não-numérica). Trata-se de uma evolução das linguagens de computador, pois Prolog tem características de linguagens procedimentais (o como), e de linguagens declarativas (o que).

Inferência Lógica do Prolog

- Prolog é uma linguagem de programação lógica. Um programa Prolog é uma base de conhecimento, onde cada asserção é uma tradução de uma implicação da lógica. A máquina de inferência do Prolog é capaz de realizar deduções lógicas a partir desta base de conhecimento e produzir conhecimento novo. Considere, por exemplo, as seguintes proposições (Pereira and Shieber, 1987):
  1. Todos os homens são mortais.
  2. Platão é um homem.
  3. Platão é mortal.

Inferência Lógica do Prolog

- Para a lógica, as duas primeiras proposições são premissas e a terceira é a conclusão lógica destas premissas. Na lógica de predicados de primeira ordem tem-se:

  $\forall X$ (homem(X) $\rightarrow$ mortal(X))

  homem(platão)

  mortal(platão)
- onde a terceira fórmula seria facilmente obtida a partir das duas primeiras usando qualquer ferramenta lógica de dedução, como por exemplo a regra da resolução.

Inferência Lógica do Prolog

- Toda implicação da lógica da forma $a \rightarrow b$, equivalente a $\neg a \vee b$, gera uma regra Prolog da forma *b* :- *a*. Logo, um programa Prolog para esta base de conhecimento seria:

```
mortal(X) :- homem(X).
homem(platão).
```

- A partir deste programa, ao se perguntar se *mortal(platão)* é verdadeiro, a máquina de inferência do Prolog responde que sim (*yes*).

Inferência Lógica do Prolog

- A linguagem Prolog trabalha com encadeamento regressivo. Por exemplo, seja o seguinte programa:

```
p(X,Y) :- q(X,Y).
q(a,b).
```

- E se coloque a seguinte questão:

```
?- p(a,b).
```

- Prolog faz as instanciações X = a e Y = b, e dispara a primeira regra, ou seja, troca p(a,b) por q(a,b). (Na verdade, como p(X,Y) :- q(X,Y) corresponde à implicação da lógica q(X, Y) → p(X,Y), então o Prolog está trocando o conseqüente da implicação p(a,b) pelo seu antecedente q(a,b), ou seja, encadeamento regressivo).

Cláusulas Definidas

- Uma cláusula (disjunção de literais) consiste de literais positivos e negativos:

  $p0 \vee p1 \vee ... \vee \neg n0 \vee \neg n1 \vee ...$

- Usando a lei de De Morgan:

  $\neg p \vee \neg q \equiv \neg(p \wedge q)$

- pode-se expressar as cláusulas como uma única implicação:

  $(n0 \wedge n1 \wedge ...) \rightarrow (p0 \vee p1 \vee ...)$

Cláusulas Definidas

- Prolog não é baseado na forma clausal completa, mas sim num subconjunto bem menos expressivo, as *cláusulas de Horn*, que são cláusulas com no máximo um literal positivo. Existem então apenas três tipos de cláusulas de Horn:
  - cláusulas unitárias: com um literal positivo da forma p0 (ou, equivalentemente, $\rightarrow$ p0).
  - cláusulas não unitárias: com um literal positivo e um ou mais literais negativos, isto é, da forma $p0 \vee \neg n0 \vee \neg n1 \vee ...$ (ou, equivalentemente, $(n0 \wedge n1 \wedge ...) \rightarrow p0$).
  - cláusulas negativas: sem literais positivos, com um ou mais literais negativos, isto é, da forma $\neg n0 \vee \neg n1 \vee ...$ (ou, equivalentemente, $(n0 \wedge n1 \wedge ...) \rightarrow$).

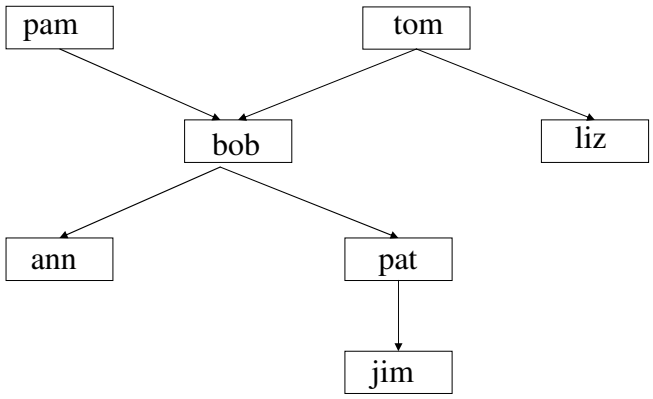
Cláusulas Definidas

- Os dois primeiros tipos de cláusulas de Horn são conhecidas como *cláusulas definidas* porque têm exatamente um literal positivo - uma única conclusão definida para a implicação - ao contrário de cláusulas gerais com seu conseqüente potencialmente disjuntivo e indefinido.

Exemplo: relações familiares

- Prolog é adequada para resolver problemas que envolvem objetos e relações entre objetos.
- Veja o exemplo da árvore familiar da figura do próximo slide (Bratko, 2000).

Exemplo: relações familiares



Exemplo: relações familiares

- O fato de que Tom é “pais” (pai/mãe) de Bob se escreve:

```
pais(tom,bob).
```

  - pais ⇒ relação
  - tom, bob ⇒ argumentos
- Os fatos na árvore familiar do exemplo são:

```
pais(pam,bob).
pais(tom,bob).
pais(bob,ann).
pais(bob,pat).
pais(tom,liz).
pais(pat,jim).
```

Exemplo: relações familiares

- São 6 cláusulas declarando fatos sobre a relação "pais". Uma vez comunicado ao sistema Prolog os fatos sobre a relação "pais", pode-se colocar questões:

```
? - pais(bob,pat).
yes
? - pais(liz,pat).
no
? - pais(X,liz).
X = tom
```

- Outra relação, avós:

```
? - pais(Y,jim),pais(X,Y).
X = bob
Y = pat
```


Resumo

- Uma relação é definida pelo estabelecimento das n-uplas de objetos que satisfazem a relação.
- Um programa Prolog é constituído de cláusulas. Cada cláusula termina com um ponto.
- Os argumentos das relações podem ser (entre outras coisas) constantes ou variáveis.
- Perguntas ao sistema Prolog são constituídas de um ou mais objetivos. Uma seqüência de objetivos separados por vírgulas significa a conjunção desses objetivos.

Estendendo o exemplo através de regras

- Vai-se incluir uma nova informação para a base de dados: o sexo das pessoas. Pode-se usar uma relação unária:

```
feminino(pam).
masculino(tom).
```

- ou usar uma relação binária:

```
sexo(pam,feminino).
sexo(tom,masculino).
```


Estendendo o exemplo através de regras

- Para a também nova relação "filhos" (filho/filha), que é o inverso da relação pais.

cabeça		**corpo**
`filhos(Y,X)`	`:-`	`pais(X,Y).`
(conclusão)		(condição)

- em Linguagem de Predicados de Primeira Ordem:

  $\forall X \forall Y(\text{pais}(X,Y) \rightarrow \text{filhos}(Y,X))$

Estendendo o exemplo através de regras

- A diferença principal entre fatos e regras, é que o fato é uma cláusula incondicionalmente verdadeira, e a regra é uma cláusula que pode ser verdade dependendo se alguma condição for verdade.
- Como as regras são usadas em Prolog? Para a verificação da veracidade do seguinte fato:

```
? - filhos(liz,tom).  % liz é filha de tom?
```

- o procedimento do Prolog, para executar a prova de tal fato é o seguinte:

Estendendo o exemplo através de regras

1) Procura tal fato na "base de conhecimento". Não existe tal fato.
2) Procura se existe uma regra sobre a relação filhos. Como existe, aplica a particular instanciação *X = tom* e *Y = liz*, ou seja,
   `filhos(liz,tom) :- pais(tom,liz).`
3) O objetivo original *filhos(liz,tom)* é substituído por um novo objetivo:
   `pais(tom,liz).`
4) O novo objetivo é encontrado como um fato na "base de conhecimento" e o Prolog responde *yes*.

Resumo

- Cláusulas em Prolog são de três tipos: fatos, regras e questões.
- Fatos declaram coisas verdadeiras. Regras declaram coisas que são verdade dependendo de uma condição. Questões: através delas o usuário pode perguntar ao programa sobre a verdade de certas coisas.
- Cláusulas em Prolog são constituídas de cabeça e corpo. O corpo é uma lista de objetivos separados por vírgulas, esta entendida como conjunção de objetivos.
- Fatos são cláusulas que possuem um corpo vazio. Questões são cláusulas que possuem somente corpo. Regras são cláusulas que possuem cabeça e corpo (não vazio).
- Durante a execução, uma variável pode ser instanciada por algum objeto.
- Variáveis são assumidas ser universalmente quantificadas e são lidas como *para todo*. Leituras alternativas são possíveis para variáveis que aparecem somente no corpo.

Definição recursiva de regra

- Para definir uma nova relação, *predecessor*, vai-se fazê-lo da seguinte forma:

```
predecessor(X,Z) :- pais(X,Z).
predecessor(X,Z) :- pais(X,Y),
  predecessor(Y,Z).
```

- Note que a definição do predicado *predecessor* usa recursividade. A programação recursiva é um dos princípios fundamentais da programação em Prolog. A relação *predecessor* é definida por duas cláusulas, o que consiste em um **procedimento**.

Como Prolog responde questões

- Uma questão em Prolog é uma seqüência de objetivos (um ou mais). Prolog tenta satisfazer os objetivos, isto é, demonstrar que os objetivos seguem logicamente a partir dos fatos e regras do programa. Se as questões contêm variáveis, Prolog também tenta achar a particular instanciação que satisfaz os objetivos. Os fatos e regras são aceitos como um conjunto de axiomas (hipóteses). A questão do usuário é aceita como uma possível tese de um teorema. Prolog tenta provar esse teorema (demonstrar que ele segue logicamente dos axiomas). Prolog realiza encadeamento lógico regressivo, ou seja, a partir da meta, aplica as regras (no sentido regressivo) e termina nos fatos. Pode-se dizer também que Prolog parte da negação (implícita) da meta até chegar a cláusula vazia, utilizando a estratégia por preferência unitária (demonstração por absurdo): *refutação*.

Como Prolog responde questões

- Exemplo: seqüência de prova da conjectura (tese):

```
?- predecessor(tom,pat).
```

- (Observação: note o sinal "-" após a interrogação no *prompt* do interpretador Prolog. Esse sinal representa que a cláusula meta deve ser *negada* antes do início da prova. Essa negação é feita internamente pelo mecanismo de inferência do Prolog. Mesmo porque, a *questão* Prolog deve ser um (ou mais) literal negativo!)

Como Prolog responde questões

- 1) Prolog procura um fato que combine com o objetivo:
  - se sim: *yes*
  - se não: vai para o passo 2.

Quando Prolog encontra o fato que unifica com a meta, aplica-se a regra da resolução (literal negativo da meta e literal positivo do fato se cancelam, resultando na cláusula vazia). A razão do Prolog procurar primeiro o fato é que a estratégia usada é a preferência unitária e o fato é cláusula unitária. Apesar da estratégia por preferência unitária não ser completa, é a mais eficiente de todas. Caso a busca não seja bem sucedida, o Prolog realiza o *backtracking* e uma nova busca é efetuada.

Como Prolog responde questões

- 2) Prolog procura uma regra cuja cabeça combine com o objetivo:
  - se não: *no*
  - se sim: vai para o passo 3.

Se não há fato e nem regra cuja cabeça (literal positivo), então não há como aplicar a regra da resolução. Portanto não há solução.

Como Prolog responde questões

- 3) Prolog "dispara" a regra para a particular instanciação

```
predecessor(X,Z) :- pais(X,Z).
```

X = tom

Z = pat

e substitui o objetivo corrente por

```
? - pais(tom,pat).
```

Lembre-se de que na regra Prolog, a cabeça corresponde ao conseqüente da implicação lógica (conclusão) e o corpo ao antecedente (condição). Quando Prolog *dispara* a regra, na verdade "troca" a cabeça pelo corpo, ou seja, "retorna" do conseqüente para o antecedente na implicação lógica, exatamente como deve ser no encadeamento regressivo. Além disso, pode-se pensar em termos de regra da resolução: trocar a cabeça pelo corpo significa "cancelar" o literal negativo da meta com o literal positivo da cabeça, resultando no literal negativo do corpo da cláusula Prolog.

Como Prolog responde questões

- 4) Prolog procura uma cláusula cuja cabeça combina com o objetivo (novo)
  - se sim e cláusula = fato: *yes*
  - se sim e cláusula = regra: "dispara" a regra
  - se não: *backtrack*

Repete-se o processo. Caso encontre um fato, termina, pois no encadeamento regressivo o encadeamento termina no fato. E na refutação, encontrar o fato significa chegar à cláusula vazia (lembre-se: havia um literal negativo e o fato é seu literal complementar).

Como Prolog responde questões

- 5) Prolog "dispara" a segunda regra

```
predecessor(X,Z) :- pais(X,Y),
  predecessor(Y,Z).
```

  - *X = tom*
  - *Z = pat*
  - e substitui o objetivo corrente

```
? - pais (tom,Y), predecessor (Y,pat).
```


Como Prolog responde questões

- 6) Prolog procura o primeiro objetivo, que combina com o fato *pais(tom,bob)*, instanciando *Y = bob*.
- 7) Resta analisar

```
? - predecessor(bob,pat).
```

- 8) Prolog "dispara" a primeira regra novamente e substitui o objetivo

```
? - pais(bob,pat).
```

que finalmente é encontrado como fato no banco de conhecimento.

Significado declarativo e procedimental

- É possível distinguir entre os significados declarativo (o que) do procedimental (o como) de um programa Prolog. A habilidade do Prolog realizar muitos detalhes procedimentais por si mesmo é considerado uma de suas vantagens.

Resumo

- A programação em Prolog consiste em definir relações e fazer questões sobre essas relações.
- Prolog consiste de cláusulas de três tipos: fatos, regras e questões.
- Uma relação pode ser especificada por fatos simplesmente estabelecendo as n-uplas de objetos que satisfazem a relação, ou estabelecendo regras a respeito da relação.
- Um procedimento é um conjunto de cláusulas a respeito de uma mesma relação.
- Questionar sobre relações, através de perguntas, lembra questionar um banco de dados. A resposta consiste de um conjunto de objetos que satisfazem a questão.
- A resposta é obtida através de um complexo processo que envolve inferência lógica, exploração entre alternativas, “backtracking”.
- Existem dois significados nos programas Prolog: declarativo e procedimental. O declarativo é vantajoso do ponto de vista da programação. Apesar de que os detalhes procedimentais muitas vezes devem ser considerados pelo programador.

Listas

- A *lista* é uma estrutura de dados simples muito usada em programação não-numérica. Uma lista é uma seqüência de qualquer número de itens, tais como *ana, tenis, tom, esqui*. Tal lista pode ser escrita em Prolog como:

```
[ana, tenis, tom, esqui]
```

- Esta é entretanto, apenas a aparência externa das listas, pois todos os objetos estruturados em Prolog são árvores.

Listas

- Como se pode representar uma lista como um objeto Prolog padrão? Deve-se considerar dois casos: ou a lista está vazia ou não vazia. No primeiro caso, a lista é simplesmente escrita como o átomo do Prolog, []. No segundo caso, a lista pode ser vista como consistindo de duas coisas:

  (1) o primeiro item, chamado a *cabeça* da lista;
  (2) a parte remanescente da lista, chamada de *cauda*.

Resumo

- Uma lista é uma estrutura de dados que ou está vazia ou consiste de duas partes: uma *cabeça* e uma *cauda*. A cauda por sua vez também é uma lista.
- As listas são manipuladas pelo Prolog com um caso especial de *árvores binárias*. Para melhorar a legibilidade, Prolog provê uma notação especial para listas:

```
[Item1, Item2, ...]
```

– ou

```
[Cabeca | Cauda]
```

– ou

```
[Item1, Item2, ... | Outros]
```


Conclusões

- Prolog é a linguagem para *programação lógica* e pode fazer muitas coisas. Mas tem quatro fraquezas lógicas fundamentais (Rowe, 1988):
  - Prolog não permite fatos ou conclusões disjuntivos, ou seja, sentenças onde uma ou mais coisas são verdadeiras, mas não se sabe quais.
  - Prolog não permite fatos ou conclusões negativos, isto é, sentenças diretas onde alguma coisa é falsa.
  - Prolog não permite que muitos fatos, conclusões ou regras tenham quantificação existencial, isto é, sentenças onde exista algum valor de variável, ainda que não se saiba qual, tal que o predicado que a contém seja verdadeiro.
  - Prolog não permite diretamente *lógica de segunda ordem*, nomes de predicados como variáveis, isto é, sentenças sobre P onde P significa um nome de predicado.