

**Universidad Nacional de Educación a Distancia**  
**Ingeniería Técnica en Informática de Sistemas**  
***Introducción a la Inteligencia Artificial (2º curso)***

**Soluciones exámenes septiembre 2011**

### Ejercicio 1. (Valoración: 4 puntos)

Enumere y clasifique los métodos de búsqueda en un espacio de estados, indicando brevemente las características de cada método.

**Solución** por Severino Fernández Galán:

Los métodos de búsqueda en un espacio de estados se pueden dividir en dos grandes grupos: *métodos de búsqueda sin información del dominio* y *métodos de búsqueda heurística*. Los primeros no utilizan conocimiento o información heurística para guiar el proceso de búsqueda, mientras que los segundos sí.

Los esquemas básicos de búsqueda sin información del dominio, en la que se suele suponer que el espacio de estados tiene forma de árbol, son la *búsqueda en amplitud* y la *búsqueda en profundidad*. En el primer tipo se utiliza una cola para explorar primero todos los nodos del mismo nivel, mientras que en el segundo tipo se utiliza una pila para pasar a explorar un nodo del nivel siguiente. Estos dos métodos tienen una complejidad temporal exponencial con la profundidad de la solución. Sin embargo, en el método de búsqueda en profundidad la complejidad espacial se reduce, ya que en cada momento sólo es necesario almacenar el camino desde el nodo actual hasta el inicial.

Hay varias formas de combinar la búsqueda en profundidad con la búsqueda en amplitud. Si se conoce el estado meta y los operadores son reversibles, se puede realizar una *búsqueda bidireccional* donde al menos una de las dos búsquedas sea en amplitud para garantizar que se intersecten en algún estado. De esta manera, el exponente de la complejidad temporal o exponencial de la búsqueda en amplitud habitual se reduce a la mitad. Por otra parte, la *búsqueda en profundidad progresiva* consiste en repetir una búsqueda en profundidad aumentando progresivamente el nivel de profundidad. En este método, la complejidad espacial coincide con la del método de búsqueda en profundidad.

Si se tiene en cuenta que el espacio de estados es en general un grafo, se puede utilizar una *búsqueda general en grafos*. En este método se hace uso de dos listas, ABIERTA y CERRADA, que almacenan respectivamente los nodos que han sido generados y los que han sido expandidos en el proceso de búsqueda. Como ahora existirán en general varios caminos desde cada nodo hasta el nodo inicial, se crea un “árbol de costes mínimos parciales” tal que cada arco del mismo indica el mejor camino encontrado desde cada nodo hasta el nodo inicial. Según avance el proceso de búsqueda puede haber redirecciones en los arcos del árbol de costes mínimos parciales.

Las *estrategias de exploración de alternativas*, ya dentro de los métodos de búsqueda heurística, quedan englobadas dentro del marco de búsqueda general en grafos. Utilizan una función de evaluación heurística para ordenar los nodos de ABIERTA. Generalmente el nodo más prometedor de ABIERTA es expandido. La estrategia *Primero el Mejor* utiliza la función de evaluación heurística:

$$f_{ev}(\text{estado}) = h(\text{estado})$$

donde  $h$  estima lo cercano que *estado* se encuentra de un estado meta. El *método A\** utiliza:

$$f_{ev}(\text{estado}) = g(\text{estado}) + h(\text{estado})$$

donde  $g$  se calcula a partir del árbol parcial de costes mínimos, siendo  $f_{ev}$  una estimación del coste del mejor camino que parte del nodo inicial, pasa por el nodo actual y llega a un nodo meta. El método de *búsqueda en haz* elimina los peores elementos de ABIERTA en cada ciclo.

Cuando la búsqueda se realiza en un grafo YO, se puede generalizar el método  $A^*$  para obtener el  $AO^*$  (o  $YO^*$ ). Ahora la solución no es un camino, sino un subgrafo. El método  $YO^*$  consta de tres fases: una descendente en la que se siguen los arcos de los mejores subgrafos que cuelgan de cada nodo, una de expansión de uno cualquiera de los nodos hoja a los que se llega tras la fase anterior y, finalmente, una fase ascendente de actualización de costes y subgrafos parciales óptimos que cuelgan de los predecesores de los nodos actualizados.

Las *estrategias irrevocables*, como el *método del gradiente*, nunca dan marcha atrás en la búsqueda. Esto permite que la complejidad espacial se reduzca. El siguiente nodo a explorar es aquél cuyo valor de  $f_{ev}$  es máximo (suponiendo que asociamos valores de  $f_{ev}$  mayores a los nodos más prometedores), siempre que mejore la  $f_{ev}$  del nodo actual.

Existen métodos de búsqueda para juegos entre adversarios. El más simple es el *método MINIMAX*, que realiza una búsqueda exhaustiva en profundidad del árbol que cuelga de la situación actual de la partida. Los árboles expandidos tienen una profundidad que fija el programador y a cada uno de los nodos hoja se les asigna su valor de la  $f_{ev}$ . El *método de poda alfa-beta* es similar al método MINIMAX, aunque identifica los subárboles cuya exploración no influye en el resultado final de la búsqueda.

## Ejercicio 2. (Valoración: 3 puntos)

Enumere las ampliaciones que conozca de la Lógica de Predicados tradicional. Enumere también, para cada lógica ampliada, qué nuevos operadores, predicados y reglas de inferencia se introducen en la misma. Finalmente, para cada lógica ampliada escriba un ejemplo de fórmula válida que ilustre el uso de sus nuevos operadores y predicados.

**Solución** por Severino Fernández Galán:

### 1) Lógicas de predicados de orden superior

Respecto a la Lógica de Predicados tradicional, permiten cuantificar predicados (no sólo variables) mediante los operadores universal o existencial, y también permiten utilizar predicados como argumentos de otros predicados. Esto complica la inferencia hasta el punto de provocar que este tipo de lógicas pierdan la propiedad de consistencia de la Lógica de Predicados, es decir, pueden aparecer paradojas.

Ejemplos: 1)  $\exists P \forall x (Hombre(x) \rightarrow P(x))$

2) Predicado-binario(P)

### 2) Lógica de predicados con identidad

Introduce el predicado identidad (=), que permite establecer que dos objetos son el mismo.

Nuevas reglas de inferencia: 1)  $a = a \quad \forall \text{cte. } a$

2)  $F(a)$

$a = b$

$F(b) \quad \forall \text{ctes. } a, b$

Ejemplo: “Hay por lo menos dos entidades que tienen la propiedad P.”

$\exists x \exists y (P(x) \wedge P(y) \wedge x \neq y)$

### 3) Lógicas multivaluadas

Permiten la existencia de más de dos valores de verdad. Por ejemplo, en la Lógica Trivalente de Lukasiewicz hay tres valores de verdad posibles: verdadero (1), falso (0) e indeterminado (1/2). En este tipo de lógica dejan de satisfacerse cierto tipo de leyes de la Lógica de Predicados, por ejemplo, la ley de contradicción: “ $p \wedge \neg p$  es falso”

### 4) Lógica modal

Introduce dos nuevos modos de verdad: la *necesidad* de un predicado (representada mediante el operador  $\Box$ ) y la *posibilidad* de un predicado (representada mediante el operador  $\Diamond$ ). Introduce también la idea de “mundo”: descripción consistente y completa de cómo las cosas podrían ser.

Nuevas reglas: 1)  $\neg \Diamond A \leftrightarrow \Box \neg A$

$$2) \neg \Box A \leftrightarrow \Diamond \neg A$$

$$3) \Box A \rightarrow A \text{ (en cualquier mundo)}$$

$$4) \Diamond A \rightarrow A \text{ (en un nuevo mundo)}$$

Ejemplo: "Necesariamente, si no como, muero."

$$\Box(\neg C \rightarrow M)$$

## 5) Lógica borrosa

Introduce los predicados borrosos, que definen el grado de pertenencia ---al predicado--- de cada elemento o elementos del universo de discurso mediante un número comprendido entre 0 y 1. Define operadores lingüísticos como "muy", "algo", etc. a partir de operaciones matemáticas sobre la función de pertenencia del predicado modificado.

Cada regla de inferencia (principio de herencia, reglas de composición, modus ponens generalizado, modus tollens generalizado o silogismo hipotético, entre otras) consiste en operaciones matemáticas sobre las funciones de pertenencia correspondientes.

Ejemplo: "Ser adinerado" es un predicado borroso al que se le puede asociar la siguiente función de pertenencia:

$$\{0 \mid 0, 6 \mid 0.1, 30 \mid 0.2, 60 \mid 0.4, 300 \mid 0.8, 600 \mid 0.9, 3000 \mid 1\}$$

donde a la izquierda se representan cantidades en miles de euros.

## 6) Lógicas no monótonas

Permiten realizar razonamientos de carácter no monótono en los que una conclusión podría llegar a estar en contradicción con nuestro conocimiento previo. Una forma de llevar esto a cabo es mediante el operador modal "M", tal que  $M(p)$  representaría que "p es cierto si no hay nada que indique lo contrario". En cuanto a la inferencia, estas lógicas poseen mecanismos para el mantenimiento de la coherencia en el sistema.

Ejemplo: "Si el aire acondicionado está en funcionamiento, no hace calor."  
(Si no hay nada que indique lo contrario.)

$$\text{Aire-acondicionado} \rightarrow M(\neg \text{calor})$$

### Ejercicio 3. (Valoración: 3 puntos)

Realice un estudio comparativo de los siguientes métodos de representación de conocimiento: *método clásico de diagnóstico probabilista* (también conocido como *método probabilista clásico*) y *reglas*. Haga especial énfasis en los siguientes aspectos:

- a) Tipo de conocimiento que permiten modelar
- b) Tipo de inferencias que permiten realizar
- c) Dominios del mundo real en que aplicaría dichos métodos

**Solución** por Severino Fernández Galán:

**a)** Mientras que el *Método Probabilista Clásico* (MPC) utiliza un **grafo** como forma de representación, en un conjunto de reglas cada una de ellas está formada por un antecedente y un consecuente; no obstante, también se pueden utilizar grafos en diferentes contextos dentro de un sistema basado en reglas:

1. Cuando en encadenamiento hacia delante se hace uso del algoritmo RETE para agilizar el proceso de resolución de conflictos.
2. Cuando en encadenamiento hacia atrás se genera un grafo (árbol) de búsqueda, que es explorado en profundidad.

Mientras que en el MPC el grafo sólo consta de un nodo padre desde el que se traza un arco hacia cada uno de sus nodos hijo, los grafos mencionados anteriormente para el caso de encadenamiento de reglas pueden ser mucho más complejos.

En el MPC, cada nodo del grafo representa una determinada **variable aleatoria**. Mientras que el nodo padre hace referencia a posibles diagnósticos o enfermedades, cada nodo hijo lo hace a un hallazgo. En una regla, el antecedente contiene condiciones que se deben cumplir para que la regla pueda ser ejecutada. En cada condición o cláusula del antecedente pueden aparecer hipótesis, datos, relaciones de comparación, relaciones de pertenencia y también variables. El consecuente de una regla está formado por conclusiones o acciones a desarrollar cuando la regla sea ejecutada. Dentro de las conclusiones, se pueden afirmar o retractar hechos.

En el MPC, los **valores** que puede tomar cada variable deben ser exclusivos y exhaustivos. Exclusivos significa que dos o más valores no pueden ser ciertos a la vez. Exhaustivos significa que no puede existir un valor diferente. En reglas, los valores que pueden tomar las variables o datos no tienen en principio las restricciones anteriores.

En el MPC, los **enlaces** expresan relaciones de causalidad o simplemente de dependencia probabilística. Una regla se asocia generalmente a una relación de causalidad o implicación. Se puede introducir incertidumbre en una regla a través de los factores de certeza de MYCIN o de la incorporación de conceptos difusos en el antecedente y consecuente.

El MPC define una serie de **relaciones de independencia** de forma implícita: los hallazgos son condicionalmente independientes entre sí dado el diagnóstico. En un sistema de reglas, las únicas relaciones que surgen entre

los diferentes conceptos manejados en antecedentes y consecuentes se derivan del proceso de encadenamiento.

El MPC maneja una serie de **parámetros probabilísticos** asociados a cada nodo: para el nodo padre, la probabilidad a priori de cada uno de sus valores, mientras que para cada nodo hijo, la probabilidad condicional de cada uno de sus valores dado cualquier posible valor del nodo padre. Una regla generalmente no tiene parámetros numéricos asociados. Únicamente en el caso del método de factores de certeza de MYCIN, se asocia un número comprendido entre -1 y 1 a cada regla.

**b)** En cuanto a la inferencia, en el MPC está basada en el Teorema de Bayes, mientras que en reglas se utiliza encadenamiento hacia delante o hacia atrás.

Mientras que en el MPC la inferencia persigue calcular la probabilidad a posteriori del nodo padre dado un conjunto de hallazgos sobre sus nodos hijo, en un sistema basado en reglas se pretende comprobar qué hechos se derivan (o si un hecho se deriva) de un conjunto de reglas contenidos en la base de conocimiento y de otros hechos contenidos en la base de afirmaciones.

**c)** Mientras que el MPC se suele aplicar a dominios con presencia de incertidumbre, un sistema basado en reglas se puede aplicar también a dominios deterministas. Mientras que el MPC está más enfocado al diagnóstico, las reglas modelan el conocimiento experto en cualquier dominio.