

P2.1.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS (en TEMA 5)

1

Conocimiento

Introducción y definición

Tipos de conocimiento y fases de utilización

Propiedades de las representaciones del conocimiento

Sistemas Basados en Reglas (SBR)

Componentes básicos de los SBR

Inferencia en un SBR

Técnicas de equiparación y de resolución de conflictos

Ventajas e inconvenientes de los SBR

Representación del Conocimiento mediante Lógicas No Clásicas

Lógicas No Monótonas

Lógica de Situaciones

Lógica Difusa: representación de la vaguedad

Representación y Razonamiento con Incertidumbre

Representación y fuentes de la Incertidumbre

Teoría de la Certidumbre o de los factores de certeza

Representaciones estructuradas del conocimiento

Práctica 2



SISTEMAS BASADOS EN REGLAS E INCERTIDUMBRE

Los Sistemas Basados en Reglas (SBR) clásicos son sistemas de resolución de problemas basados en conocimiento y buscan encontrar caminos solución desde un estado inicial hasta un estado meta. Los SBR clásicos se inspiran en los sistemas de deducción en lógica proposicional o de primer orden, y por tanto, estamos suponiendo que el conocimiento disponible es verdadero (o falso).

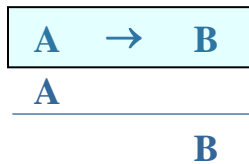
Pero cuando el conocimiento disponible es incierto (es decir, disponemos un grado de creencia de que ocurran) debemos adaptar/modificar los SBR para que pueda aplicarse a tales sistemas. Para ello, en esta presentación trataremos lo siguiente:

- a) Los SBR clásicos mostrando sus elementos y los métodos de razonamiento.
- b) Un sistema de representación y razonamiento de conocimiento incierto.
- c) Comentarios sobre la adaptación de un SBR clásico cuando le incluimos el conocimiento incierto.

LOS SBR CLÁSICOS

- Utilizan la estructura de inferencia *modus ponens* (razonamiento deductivo) para obtener conclusiones lógicas.
- Un *modus ponens* utiliza una regla de la forma IF condición THEN acción y un hecho

Modus Ponens:



IF:	starter = no-gira AND luces = encienden
THEN:	fallo = starter
IF:	starter = no-gira AND luces = no-encienden
THEN:	fallo = batería-descargada

Los SBR constituyen un campo importante de la IA, porque:

- En la vida diaria nos encontramos con escenarios gobernados por reglas deterministas.
- Permiten capturar de forma natural la experiencia humana en la resolución de problemas (se identifica con las heurísticas o formas de proceder experta).
- En dominios en los que escasean expertos (permite difundir razonamientos).

A menudo se les llama Sistemas Expertos (SE) porque el conocimiento suele proceder de expertos humanos, y los SBR permiten capturarlo bien.

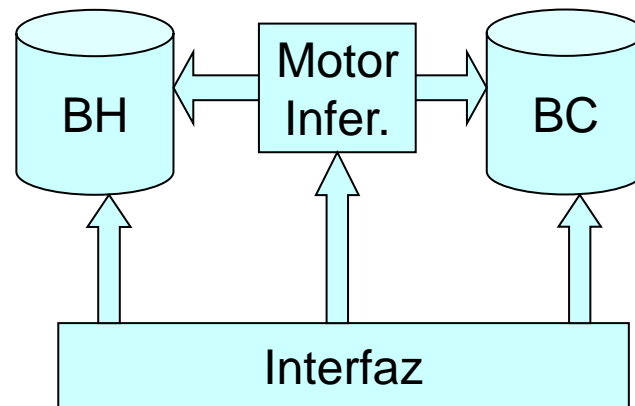
Los SBR clásicos

4

COMPONENTES BÁSICOS DE LOS SBR

Un SBR consta de:

- Una Base de Hechos (BH): Contiene hechos establecidos como verdaderos, tanto datos de entrada como conclusiones inferidas.
- Una Base de Conocimiento (BC): Contiene las reglas que codifican todo el conocimiento.
- Un Mecanismo de Inferencias (MI): Selecciona las reglas que se pueden aplicar y las ejecuta, con el objetivo de obtener alguna conclusión. También se llama Motor de Inferencias.



Los SBR clásicos

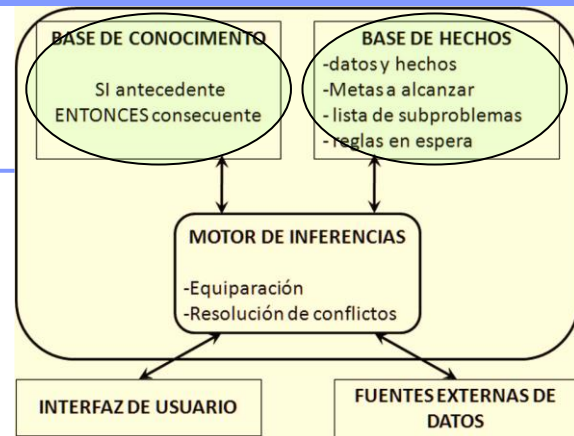
Componentes básicos de los SBR

Base de Hechos (BH):

Representa el estado actual de resolución del problema (también se llama Memoria de Trabajo).

Contiene:

- Datos de entrada:
 - Introducidos por el usuario o procedentes de sistemas externos (sensores o bases de datos).
 - Iniciales o introducidos durante el proceso, conforme el exterior proporciona nuevas evidencias.
- Hechos inferidos por el sistema durante el proceso.
- Metas a alcanzar, subproblemas, ...



Base de Conocimiento (BC):

Conjunto de reglas.

Una regla consta de dos partes:

- Parte Izquierda (LHS o Left Hand Side):
Denominada condición o antecedente.
- Parte Derecha (RHS o Right Hand Side):
Denominada acción o consecuente.

Así, definimos una regla como un par condición-acción. El antecedente será una lista de cláusulas a verificar y el consecuente una lista de acciones a ejecutar.

Los SBR clásicos

Componentes básicos de los SBR

6

La BC (las reglas) opera sobre el espacio de trabajo de la BH:

- La condición expresa algún tipo de test sobre el contenido de la BH, que se puede verificar o no.
- Si se verifica el test de una regla, se puede ejecutar su parte de acción. La ejecución de una acción puede cambiar el contenido de la BH.

Una diferencia importante entre la BH y la BC es que:

- La BH almacena información puntual sobre un problema concreto (dinámico).
- La BC almacena porciones de conocimiento (estático) sobre cómo resolver el problema, cualquiera que sea la instancia de problema.

Ejemplo:

Paciente J. López (menor de 10 años) con manchas rojas, fiebre

BC = Regla 1: { **Si** (fiebre **y** manchas rojas) **entonces** varicela }
Conocimiento estático genérico

BH = { fiebre, manchas rojas, tos }
Información concreta sobre la instancia de problema actual

Los SBR clásicos

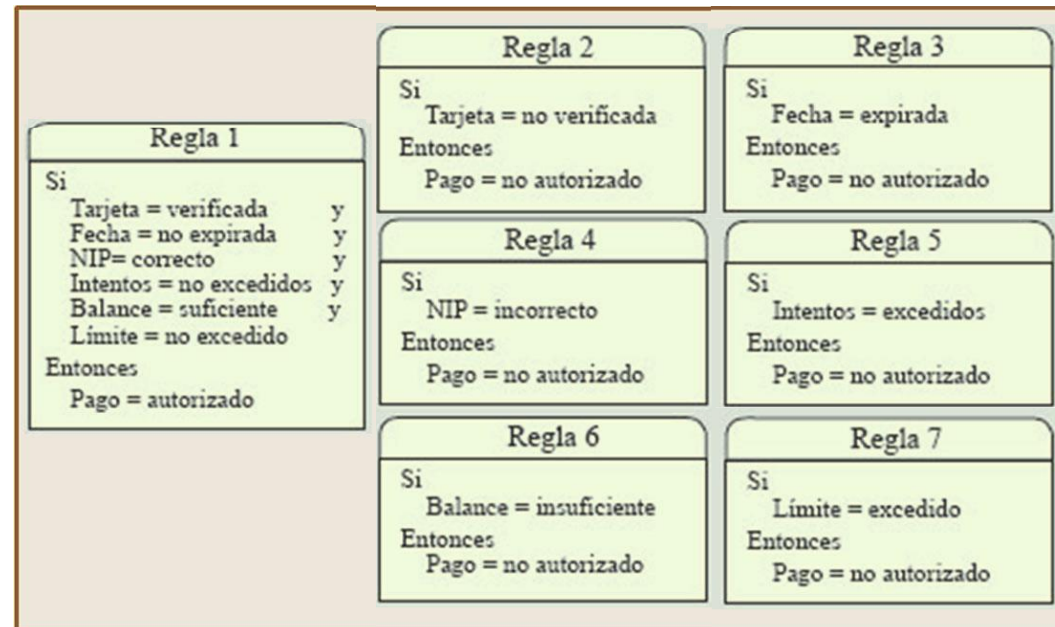
Componentes básicos de los SBR

7

Ejemplo: Un cliente desea sacar dinero de su cuenta corriente mediante un cajero automático (CA).

- Cuando el usuario introduce la tarjeta en el CA, la máquina la lee y la verifica. Si la tarjeta no es verificada con éxito, el CA devuelve la tarjeta al usuario con el mensaje de error correspondiente.
- En otro caso, el CA pide al usuario su número de identificación personal (PIN). Si el PIN fuese incorrecto, se dan tres oportunidades de corregirlo.
- Si PIN es correcto, el CA pregunta al usuario cuánto dinero desea sacar.
- Para que el pago se autorice, la cantidad solicitada no debe exceder de una cierta cantidad límite diaria, además de haber suficiente dinero en su cuenta.

Objeto	Conjunto de valores posibles
Tarjeta	{verificada, no verificada}
Fecha	{expirada, no expirada}
NIP	{correcto, incorrecto}
Intentos	{excedidos, no excedidos}
Balance	{suficiente, insuficiente}
Límite	{excedido, no excedido}
Pago	{autorizado, no autorizado}



Los SBR clásicos

Componentes básicos de los SBR

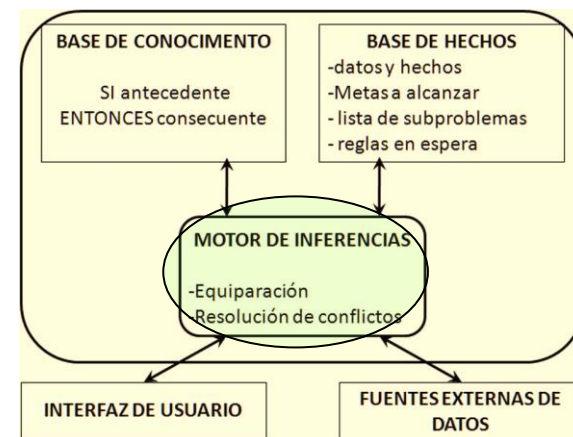
Mecanismo o Motor de Inferencias (MI):

Es un mecanismo algorítmico para obtener conclusiones aplicando la BC a los hechos conocidos almacenados en la BH.

Las conclusiones se introducen, a su vez, en la BH.

Podemos verlo como una Caja Negra:

- Entrada: BH y BC
- Salida: BH'



Algoritmo genérico de
un Motor de Inferencias

funcion MOTOR-INFERENCIA

BH=HechosIniciales;

mientras NoVerificaCondicionFinalizacion(BH) y NoseEjecutaAcciondeParada **hacer**

ConjuntoConflicto=Equiparar(BC,BH);

R=Resolver(ConjuntoConflicto);

NuevosHechos=Aplicar(R,BH);

Actualizar(BH,NuevosHechos);

Los SBR clásicos

Componentes básicos de los SBR

9

funcion MOTOR-INFERENCIA

BH=HechosIniciales;

mientras NoVerificaCondicionFinalizacion(BH) y NoseEjecutaAcciondeParada **hacer**

 ConjuntoConflicto=Equiparar(BC,BH);

 R=Resolver(ConjuntoConflicto);

 NuevosHechos=Aplicar(R,BH);

 Actualizar(BH,NuevosHechos);

En este algoritmo genérico podemos destacar los siguientes elementos:

- Mientras no se verifique una condición de parada se realiza una serie de pasos.
- La Equiparación es el proceso de búsqueda del conjunto de reglas cuyas condiciones o acciones sean compatibles con los datos almacenados (son las aplicables o activadas).
- El conjunto de reglas que se obtiene durante el proceso de equiparación se denomina Conjunto Conflicto (CC).
- La Resolución selecciona una regla del conjunto conflicto (regla disparable).
- Finalmente, el algoritmo ejecuta la regla seleccionada y actualiza la BH con los nuevos hechos resultantes de aplicar la regla.

Los SBR clásicos

Componentes básicos de los SBR

10

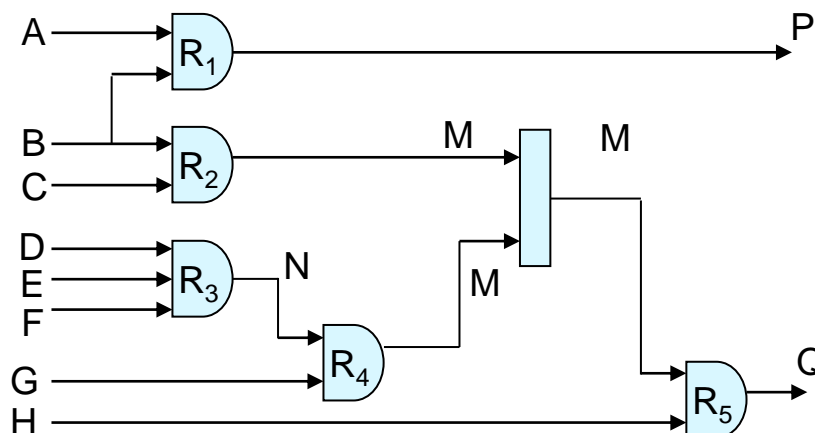
La Red de Inferencia (útil cuando nº de reglas no muy grande): grafo dirigido donde.

- Los nodos son las reglas. Se representan mediante puertas lógicas.
- Las condiciones del antecedente son las entradas a los nodos.
- Las acciones del consecuente son las salidas de los nodos que, a su vez, pueden ser las condiciones del antecedente de otros nodos.
- Los antecedentes que no son consecuentes de ninguna otra regla de la red, son los posibles hechos de partida.
- El consecuente, que no es antecedente de ninguna otra regla, se convierte en la meta a alcanzar por el sistema.
- Si varias reglas llegan a una misma conclusión se representa con un rectángulo.

Ejemplo:

BASE CONOCIMIENTO:

- R_1 : Si A y B entonces P
- R_2 : Si B y C entonces M
- R_3 : Si D y E y F entonces N
- R_4 : Si N y G entonces M
- R_5 : Si H y M entonces Q



INFERENCIA EN UN SBR

Hay dos posibles formas de razonamiento:

A) Encadenamiento hacia delante o Dirigido por Datos:

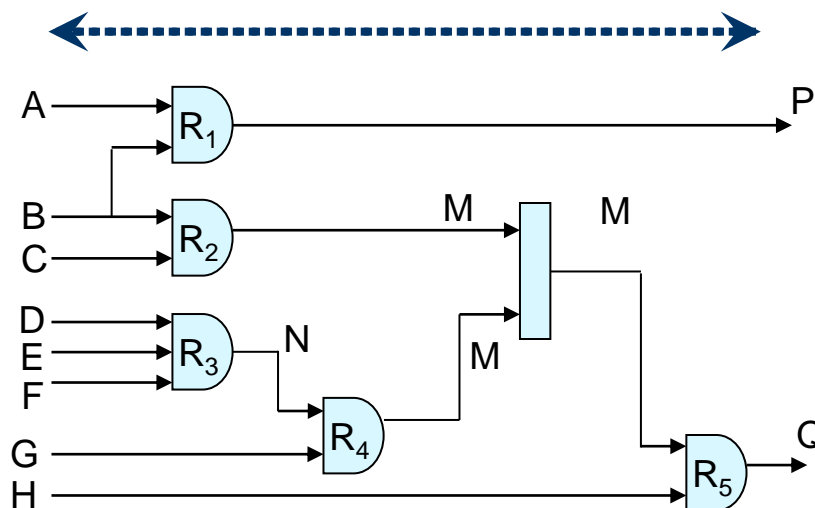
Buscar el conjunto de metas que se verifican a partir de un conjunto de hechos. En este tipo de razonamiento, la inferencia progresa en la red de izquierda a derecha.

B) Encadenamiento hacia atrás o Dirigido por Metas:

Determinar si se verifica una cierta meta con los hechos disponibles. Aquí, la inferencia progresa en la red de derecha a izquierda.

BASE CONOCIMIENTO:

- R_1 : Si A y B entonces P
- R_2 : Si B y C entonces M
- R_3 : Si D y E y F entonces N
- R_4 : Si N y G entonces M
- R_5 : Si H y M entonces Q



Los SBR clásicos

Inferencia en un SBR

12

A) Encadenamiento hacia delante:

Es una instanciación del algoritmo general MOTOR-INFERENCIAS para el caso particular del encadenamiento hacia delante.

La particularidad es la etapa de equiparación, donde se seleccionan las reglas cuyos antecedentes se verifican, dado el contenido de la BH.

funcion ENCADENAMIENTO-HACIA-DELANTE

BH=HechosIniciales; CC={ }; ReglasAplicadas={ };

repetir

CC=CC-ReglasAplicadas;

CC=CC+Equiparar(Antecedentes(BC),BH);

si NoVacio(CC) **entonces**

R=Resolver(CC);

NuevosHechos=Aplicar(R,BH);

ReglasAplicadas=ReglasAplicadas+{R};

Actualizar(BH,NuevosHechos);

hasta Contendida(Meta,BH) o Vacio(CC);

si Contendida(Meta,BH) **entonces** devolver "exito"

Los SBR clásicos

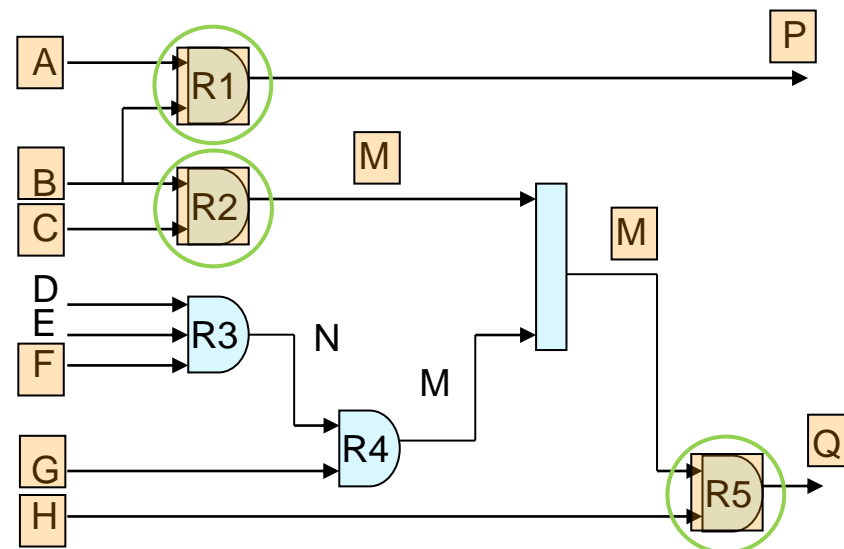
Inferencia en un SBR

13

Ejemplo: Encadenamiento hacia delante → Condición fin: Q en BH

BH={A,B,C,F,G,H}

- Conjunto Conflicto={R1, R2}
 - Resolver Conflicto: R1
 - BH={A,B,C,F,G,H,**P**} // aplicada R1
 - ReglasAplicadas = {R1}
-
- Conjunto Conflicto={R2}
 - Resolver Conflicto: R2
 - BH={A,B,C,F,G,H,P,**M**} // aplicada R2
 - ReglasAplicadas={R1,R2}
-
- Conjunto Conflicto={R5}
 - Resolver Conflicto: R5
 - BH={A,B,C,F,G,H,P,M,**Q**} // aplicada R5
 - ReglasAplicadas={R1,R2,R5}
 - Condición fin: Q en BH (FIN)



Solución: R2-R5

Los SBR clásicos

Inferencia en un SBR

14

B) Encadenamiento hacia atrás:

Es una instanciación del algoritmo general MOTOR-INFERENCIAS para el caso del encadenamiento hacia atrás. Se especifica una meta objetivo y se trata de determinar si la meta se verifica o no teniendo en cuenta el contenido de la BH.

función ENCADENAMIENTO-HACIA-ATRAS

```
BH=HechosIniciales;  
si Verificar(Meta,BH) entonces devolver “exito”;  
si no devolver “fracaso”;
```

Se investigan los consecuentes de todas las reglas, y se seleccionan aquellas cuyos consecuentes contengan la meta a verificar.

Estas reglas se examinan para descubrir alguna que verifique todos sus antecedentes, teniendo en cuenta los contenidos de la BH.

Si existe, entonces se verifica el objetivo; en caso contrario, los antecedentes no verificados pasan a ser nuevos objetivos a verificar recursivamente.

función VERIFICAR

```
Verificado=Falso;  
si Contendida(Meta,BH) entonces devolver “Verdadero”;  
si no  
  CC=Equiparar(Consecuentes(BC),Meta);  
  mientras NoVacio(CC) y No(Verificado) hacer  
    R=Resolver(CC);  
    Eliminar(R,CC);  
    NuevasMetas=ExtraerAntecedentes(R);  
    Verificado=Verdadero;  
    mientras noVacio(NuevasMetas) y Verificado hacer  
      Nmet=SeleccionarMeta(NuevasMetas);  
      Eliminar(NMet,NuevasMetas);  
      Verificado=VERIFICAR(NMet,BH);  
    si Verificado entonces Añadir(Meta,BH);  
  devolver(Verificado);
```

Los SBR clásicos

Inferencia en un SBR

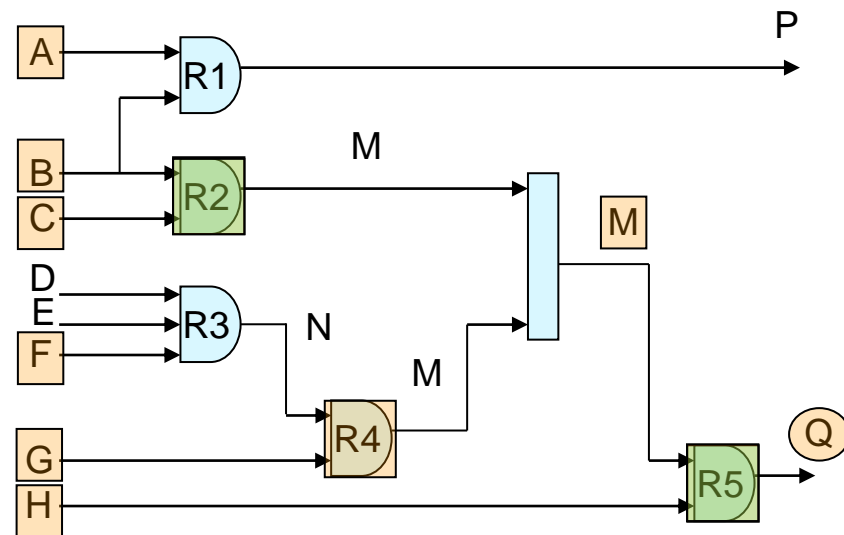
15

Ejemplo: Encaminamiento hacia atrás → Condición fin: Q en BH.

BH={A,B,C,F,G,H}

```

CC={ R5 }    // Q en consecuente de R5
R={ R5 }     // Seleccionar regla R5
Eliminar R5 → CC={ }
NuevasMetas={M,H} // Antecedentes de R5; Verificado=true
  • Meta=H // Seleccionar H de NuevasMetas
  • NuevasMetas={ M } // Eliminar H de NuevasMetas
  • Verificar ( H,{A,B,C,F,G,H} ) → true // Recursión: H en BH
  • BH={ A,B,C,F,G,H }
  • Meta=M // Seleccionar M de NuevasMetas
  • NuevasMetas={ } // Eliminar M de NuevasMetas
  • Verificar ( M, {A,B,C,F,G,H} ) // Recursión
    • CC={ R2,R4 } // M en consecuente de R2 y R4
    • R={ R2 } // Seleccionar regla R2
    • Eliminar R2 → CC = { R4 }
    • NuevasMetas={ B,C } // Antecedentes de R2; Verificado=true
    • Meta=B // Seleccionar B de NuevasMetas
    • NuevasMetas={ C } // Eliminar B de NuevasMetas
    • Verificar ( B,{A,B,C,F,G,H} ) → true // Recursión: B en BH
    • BH={ A,B,C,F,G,H }
    • Meta=C // Seleccionar C de NuevasMetas
    • NuevasMetas={ } // Eliminar C de NuevasMetas
    • Verificar ( C,{A,B,C,F,G,H} ) → true // Recursión: C en BH
    • BH={ A,B,C,F,G,H }
    • Verificado= true; CC={ R4 }; BH={ A,B,C,F,G,H,M }
  Return TRUE
    
```



Solución: R2-R5

TÉCNICAS DE EQUIPARACIÓN Y DE RESOLUCIÓN DE CONFLICTOS

Técnicas de Equiparación: La equiparación del antecedente de una regla con un estado no siempre es trivial.

- El antecedente puede no describir situaciones particulares sino generales.
- Por ejemplo, el antecedente contiene variables.

Otro problema es la necesidad de examinar todas las reglas en cada ciclo de inferencias. Este proceso es poco eficiente si la BC es extensa. Se mejora con:

- Indexación de reglas.
- Técnicas de aceleración (sin necesidad de examinar toda la BC). El método más conocido es el algoritmo RETE (C. Forgy. 1974): busca patrones en reglas y construye un grafo para acelerar la equiparación de reglas en algoritmos de encadenamiento hacia delante.

Técnicas de resolución de conflictos: Seleccionan, a partir del CC, la regla a aplicar. Es importante ya que de ello depende “el tiempo de respuesta del sistema ante cambios del entorno” y “la facultad de ejecutar reglas más prometedoras”.

Las principales técnicas de resolución de conflictos son las siguientes:

Según la BC (criterios estáticos): Seleccionar las reglas que están ordenadas por “Prioridades (pesos) de las reglas”, “según nº de antecedentes (reglas más específicas)”.

Según la BH (criterios dinámicos): Reglas que usan elementos más recientes de la BH.

Según la ejecución (criterios dinámicos): Usar reglas no utilizadas previamente.

REPRESENTACIÓN Y RAZONAMIENTO CON INCERTIDUMBRE

REPRESENTACIÓN Y FUENTES DE LA INCERTIDUMBRE

En muchos Sistemas Inteligentes es preciso considerar • hechos cuya fiabilidad o precisión es limitada y • conocimiento en el que no tenemos una certeza absoluta. Es frecuente incorporar la incertidumbre sobre una representación que originalmente no la incluye: consideramos los SBR.

TEORÍA DE LA CERTIDUMBRE O DE LOS FACTORES DE CERTEZA

Mycin fue de los primeros SBR usados con éxito (desarrollado en los 70, sirvió de base para otros SBR y como punto de partida de la Ingeniería del Conocimiento).

En Mycin, una regla típica tiene la forma: Si la coloración del ... y la morfología del ... y el crecimiento del ... entonces la identidad es .. (0.7)

El coeficiente 0.7, que se denomina Factor de Certeza (FC), se entiende como la credibilidad del consecuente o hipótesis (h) en función de la conjunción de antecedentes o evidencias (e). Los FCs son valoraciones subjetivas proporcionadas por los expertos.

Representación y razonamiento con incertidumbre

Teoría de la Certidumbre o de los Factores de Certeza

18

Un FC (factor de certeza) se define en términos de dos componentes definidos subjetivamente:

- $MC(h,e)$: medida de la creencia en la hipótesis h , dada la evidencia e (MC mide hasta qué punto la evidencia soporta a la hipótesis). $MC(h,e) \in [0,1]$ y $MC(h,e)=0$ si la evidencia no soporta a h .
- $MI(h,e)$: medida de la incredulidad en la hipótesis h , dada la evidencia e (MI mide hasta qué punto la evidencia soporta la negación de la hipótesis). $MI(h,e) \in [0,1]$ y $MI(h,e)=0$ si la evidencia soporta a h .

Una evidencia e no puede apoyar al mismo tiempo la creencia y la incredulidad en la hipótesis h . Por tanto:

$$\text{Si } MC(h, e) > 0 \Rightarrow MI(h, e) = 0$$

$$\text{Si } MI(h, e) > 0 \Rightarrow MC(h, e) = 0$$

El factor de certeza (FC) se define a partir de estos componentes, como:

$$FC(h, e) = MC(h, e) - MI(h, e)$$

Por tanto, FC es un número entre -1 y 1: $-1 \leq FC(h, e) \leq 1$

Basta conocer uno de los tres valores $FC(h,e)$, $MC(h,e)$ o $MI(h,e)$, excepto cuando solo conocemos que o bien $MC(h,e)=0$ ó $MI(h,e)=0$.

Representación y razonamiento con incertidumbre

Teoría de la Certidumbre o de los Factores de Certeza

19

Combinación de factores de certeza. Inferencia:

Durante el proceso de razonamiento, los *FCs* tienen que combinarse para reflejar el uso de las múltiples evidencias y reglas que se aplican.

Las funciones de combinación de factores de certeza se definen de forma que satisfagan ciertas propiedades intuitivas:

- Las funciones de combinación deben ser conmutativas y asociativas, ya que el orden en el que se recolecta las evidencias es arbitrario.
- Si una evidencia adicional confirma una hipótesis, el grado *MC* previo debe incrementarse, al menos hasta que no se alcance la certeza absoluta (de forma similar, las evidencias que restan confirmación deben aumentar *MI*).
- Si las inferencias inciertas se encadenan juntas, el resultado debe tener menor certeza que cada una de las inferencias por separado.

El proceso de inferencia de los SBR se adaptan para incorporar el razonamiento con los grados de incertidumbre que proporcionan los factores de certeza.

El razonamiento o inferencia de los SBR con los *FCs* se basa en esos tres casos:

Representación y razonamiento con incertidumbre

Teoría de la Certidumbre o de los Factores de Certeza

20

CASO 1.- Combinación de antecedentes: es necesario combinar las piezas de evidencia, e_1 y e_2 , que afectan al factor de certeza de h .

R: Si e_1 y/o e_2 entonces h

$$FC(h, e_1 \wedge e_2) = \min\{FC(h, e_1), FC(h, e_2)\}$$

$$FC(h, e_1 \vee e_2) = \max\{FC(h, e_1), FC(h, e_2)\}$$

CASO 2.- Adquisición incremental de evidencia: Se combinan dos piezas de evidencia, e_1 y e_2 , que afectan al factor de certeza de una misma hipótesis.

R₁: Si e_1 entonces h

R₂: Si e_2 entonces h

$$FC(h, e_1 \wedge e_2) = \begin{cases} FC(h, e_1) + FC(h, e_2) * (1 - FC(h, e_1)) & \text{si } FC(h, e_1), FC(h, e_2) \geq 0 \\ FC(h, e_1) + FC(h, e_2) * (1 + FC(h, e_1)) & \text{si } FC(h, e_1), FC(h, e_2) \leq 0 \\ \frac{FC(h, e_1) + FC(h, e_2)}{1 - \min\{|FC(h, e_1)|, |FC(h, e_2)|\}} & \text{si } FC(h, e_1), FC(h, e_2) \text{ distinto signo} \end{cases}$$

CASO 3.- Encadenamiento de evidencia: Se combinan dos reglas, de forma que, el resultado de una regla es la entrada de otra.

R₁: Si e entonces s (s)

R₂: Si s entonces h

$$FC(h, e) = FC(h, s) * \max\{0, FC(s, e)\}$$

Representación y razonamiento con incertidumbre

Ejemplo

21

Ejemplo de aplicación de los tres CASOS de combinación.

Sea un SBR simple con tres reglas:

R_1 : Si A entonces G (FC=0.5)

R_2 : Si B y C entonces G (FC=0.9)

R_3 : Si G entonces R (FC=0.99)

Disponemos de los hechos iniciales:

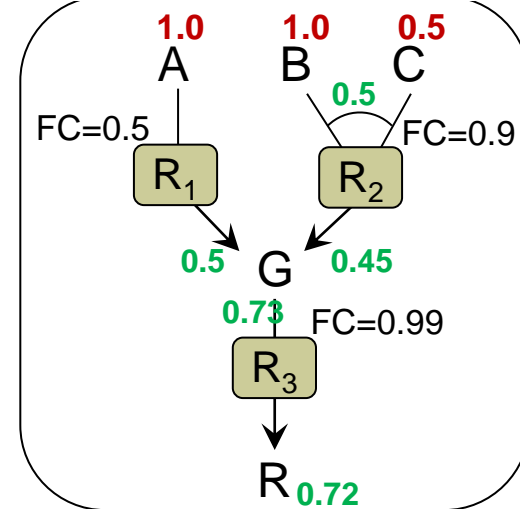
FC(A)=1.0; FC(B)=1.0; FC(C)=0.5

Comenzamos el proceso de inferencia.-

- Combinación de antecedentes de R_2 (Caso 1):
 $FC(B \wedge C) = \min(FC(B), FC(C)) = 0.5$
- Combinación de la evidencia con la regla R_1 (Caso 3):
 $FC(G_{R_1}) = 0.5 * FC(A) = 0.5$
- Combinación de la evidencia con la regla R_2 (Caso 3):
 $FC(G_{R_2}) = 0.9 * FC(B \wedge C) = 0.45$
- Combinación de las reglas R_1 y R_2 (Caso 2):
 $FC(G) = FC(G_{R_1}) + FC(G_{R_2}) * (1 - FC(G_{R_1})) = 0.73$
- Combinación de la evidencia con la regla R_3 (Caso 3):
 $FC(R) = 0.99 * FC(G) = 0.72$

Con esta información, creemos que R se está dando.

Red de inferencia



LOS SISTEMAS BASADOS EN REGLAS CON FACTORES DE CERTEZA

La solución que obtiene un SBR clásico está definida por una secuencia de reglas que hacen cierto el hecho objetivo a partir de un subconjunto de hechos de entrada. Pero, cuando a un SBR se le introduce incertidumbre (en hechos y reglas) mediante FCs, esta provoca un cambio sustancial en el motor de inferencia. Ahora necesitamos agregar/acumular toda la información que se va obteniendo cuando se aplican distintas reglas. Por ejemplo, si obtenemos mediante una regla que un hecho **A** tiene una certeza c_1 , y por otra regla que el mismo hecho **A** tiene una certeza c_2 , estas deben acumularse para obtener la certeza que nos indican las dos reglas sobre el hecho **A**.

Si observamos el ejemplo de la transparencia anterior, con un SBR clásico (suponiendo verdaderos los hechos A, B y C) una solución podría ser la secuencia de reglas R_1 - R_3 . Pero cuando el conocimiento contiene incertidumbre (medida mediante FCs) la solución se obtiene agregando/acumulando toda la información disponible (como hemos calculado en el ejemplo).

De forma natural, la aplicación del razonamiento de los FCs se realiza mediante encadenamiento hacia atrás, y por tanto, el encadenamiento hacia atrás de los SBR debe reformularse/adaptarse para incluir los FCs.