Lógica informática (2006–07)

Tema 9: Modelos de Herbrand

José A. Alonso Jiménez
María J. Hidalgo Doblado

Grupo de Lógica Computacional
Dpto. Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial
Universidad de Sevilla

Reducción de la LPO básica a proposicional

- Observación:
  - En este tema sólo se consideran lenguajes de primer orden sin igualdad.
- Reducción de la LPO básica a proposicional
  - Def.: Una fórmula básica es una fórmula sin variables ni cuantificadores.
  - Prop.: Sea S un conjunto de fórmulas básicas. Son equivalentes:
    1. S es consistente en el sentido de la lógica de primer orden.
    2. S es consistente en el sentido de la lógica proposicional.

Ejemplos de reducción de la LPO básica a proposicional

- $\{P(a) \lor P(b), \neg P(b) \lor P(c), P(a) \to P(c)\}$
  es consistente en el sentido de la lógica de primer orden
  (con modelos $\mathscr{I}_4, \mathscr{I}_6, \mathscr{I}_8$).
- $\{P(a) \lor P(b), \neg P(b) \lor P(c), P(a) \to P(c), \neg P(c)\}$
  es inconsistente en el sentido de la lógica de primer orden.

	P^I	$P(a) \lor P(b)$	$\neg P(b) \lor P(c)$	$P(a) \to P(c)$	$\neg P(c)$
$\mathscr{I}_1$	$\emptyset$	0	1	1	1
$\mathscr{I}_2$	$\{c^I\}$	0	1	1	0
$\mathscr{I}_3$	$\{b^I\}$	1	0	1	1
$\mathscr{I}_4$	$\{b^I, c^I\}$	1	1	1	0
$\mathscr{I}_5$	$\{a^I\}$	1	1	0	1
$\mathscr{I}_6$	$\{a^I, c^I\}$	1	1	1	0
$\mathscr{I}_7$	$\{a^I, b^I\}$	1	0	0	1
$\mathscr{I}_8$	$\{a^I, b^I, c^I\}$	1	1	1	0

Ejemplos de reducción de la LPO básica a proposicional

- $\{P(a) \lor P(b), \neg P(b) \lor P(c), P(a) \to P(c)\}$
  es consistente en el sentido proposicional (con modelos v_4, v_6, v_8).
- $\{P(a) \lor P(b), \neg P(b) \lor P(c), P(a) \to P(c), \neg P(c)\}$
  es inconsistente en el sentido proposicional.
  Se consideran los cambios $P(a)/p, P(b)/q, P(c)/r$

	p	q	r	$p \lor q$	$\neg q \lor r$	$p \to r$	$\neg r$
v_1	0	0	0	0	1	1	1
v_2	0	0	1	0	1	1	0
v_3	0	1	0	1	0	1	1
v_4	0	1	1	1	1	1	0
v_5	1	0	0	1	1	0	1
v_6	1	0	1	1	1	1	0
v_7	1	1	0	1	0	0	1
v_8	1	1	1	1	1	1	0

Notación

- L representa un lenguaje de primer orden sin igualdad.
- $\mathscr{C}$ es el conjunto de constantes de L.
- $\mathscr{F}$ es el conjunto de símbolos de función de L.
- $\mathscr{R}$ es el conjunto de símbolos de relación de L.
- $\mathscr{F}_n$ es el conjunto de símbolos de función n–aria de L.
- $\mathscr{R}_n$ es el conjunto de símbolos de relación n–aria de L.
- f/n indica que f es un símbolo de función n–aria de L.
- P/n indica que f es un símbolo de relación n–aria de L.

Universo de Herbrand

- Def.: El universo de Herbrand de L es el conjunto de los términos básicos de L. Se representa por $\mathrm{UH}(L)$.
- Prop.: $\mathrm{UH}(L) = \bigcup_{i \geq 0} H_i(L)$, donde $H_i(L)$ es el nivel i del $\mathrm{UH}(L)$ definido por

$$\begin{aligned} H_0(L) &= \begin{cases} \mathscr{C}, & \text{si } \mathscr{C} \neq \emptyset; \\ \{a\}, & \text{en caso contrario. (} a \text{ es una nueva constante).} \end{cases} \\ H_{i+1}(L) &= H_i(L) \cup \{ f(t_1,\dots,t_n) : f \in \mathscr{F}_n \text{ y } t_1,\dots,t_n \in H_i(L)\} \end{aligned}$$

- Prop.: $\mathrm{UH}(L)$ es finito syss L no tiene símbolos de función.

Ejemplos de universo de Herbrand

- Si $\mathscr{C} = \{a,b,c\}$ y $\mathscr{F} = \emptyset$, entonces

$$\begin{aligned} H_0(L) &= \{a,b,c\} \\ H_1(L) &= \{a,b,c\} \\ &\vdots \\ \mathrm{UH}(L) &= \{a,b,c\} \end{aligned}$$

- Si $\mathscr{C} = \emptyset$ y $\mathscr{F} = \{f/1\}$, entonces

$$\begin{aligned} H_0(L) &= \{a\} \\ H_1(L) &= \{a, f(a)\} \\ H_2(L) &= \{a, f(a), f(f(a))\} \\ &\vdots \\ \mathrm{UH}(L) &= \{a, f(a), f(f(a)), \dots\} = \{f^i(a) : i \in \mathbb{N}\} \end{aligned}$$

Ejemplos de universo de Herbrand

- Si $\mathscr{C} = \{a,b\}$ y $\mathscr{F} = \{f/1, g/1\}$, entonces

$$\begin{aligned} H_0(L) &= \{a,b\} \\ H_1(L) &= \{a,b,f(a),f(b),g(a),g(b)\} \\ H_2(L) &= \{a,b,f(a),f(b),g(a),g(b), \quad f(f(a)),f(f(b)),f(g(a)),f(g(b)), \\ &\qquad g(f(a)),g(f(b)),g(g(a)),g(g(b))\ \} \\ &\vdots \end{aligned}$$

- Si $\mathscr{C} = \{a,b\}$ y $\mathscr{F} = \{f/2\}$, entonces

$$\begin{aligned} H_0(L) &= \{a,b\} \\ H_1(L) &= \{a,b,f(a,a),f(a,b),f(b,a),f(b,b)\} \\ H_2(L) &= \{a,b,f(a,a),f(a,b),f(b,a),f(b,b),f(a,f(a,a)),f(a,f(a,b)),\dots\} \\ &\vdots \end{aligned}$$

Base de Herbrand

- Def.: La base de Herbrand de L es el conjunto de los átomos básicos de L. Se representa por $\mathrm{BH}(L)$.
- Prop.: $\mathrm{BH}(L) = \{P(t_1,\dots,t_n) : P \in \mathscr{R}_n \text{ y } t_1,\dots,t_n \in \mathrm{UH}(L)\}$.
- Prop.: $\mathrm{BH}(L)$ es finita syss L no tiene símbolos de función.
- Ejemplos:
  - Si $\mathscr{C} = \{a,b,c\}$, $\mathscr{F} = \emptyset$ y $\mathscr{R} = \{P/1\}$, entonces
    $$\begin{aligned} \mathrm{UH}(L) &= \{a,b,c\} \\ \mathrm{BH}(L) &= \{P(a),P(b),P(c)\} \end{aligned}$$
  - Si $\mathscr{C} = \{a\}$, $\mathscr{F} = \{f/1\}$ y $\mathscr{R} = \{P/1,Q/1,R/1\}$, entonces
    $$\begin{aligned} \mathrm{UH}(L) &= \{a, f(a), f(f(a)),\dots\} = \{f^i(a) : i \in \mathbb{N}\} \\ \mathrm{BH}(L) &= \{P(a),Q(a),R(a),P(f(a)),Q(f(a)),R(f(a)),\dots\} \end{aligned}$$

Interpretaciones de Herbrand

- Def.: Una interpretación de Herbrand es una interpretación $\mathscr{I} = (U,I)$ tal que
  - U es el universo de Herbrand de L;
  - $I(c) = c$, para cada constante c de L;
  - $I(f) = f$, para cada símbolo de función f de L.
- Prop.: Sea $\mathscr{I}$ una interpretación de Herbrand de L. Si t es un término básico de L, entonces $\mathscr{I}(t) = t$.
- Prop.: Una interpretación de Herbrand queda determinada por un subconjunto de la base de Herbrand, el conjunto de átomos básicos verdaderos en esa interpretación.

Modelos de Herbrand

- Nota: Las definiciones de universo de Herbrand, base de Herbrand e interpretación de Herbrand definidas para un lenguaje se extienden a fórmulas y conjuntos de fórmulas considerando el lenguaje formado por los símbolos no lógicos que aparecen.
- Def.: Un modelo de Herbrand de una fórmula F es una interpretación de Herbrand de F que es modelo de F.
- Def.: Un modelo de Herbrand de un conjunto de fórmulas S es una interpretación de Herbrand de S que es modelo de S.
- Ejemplo: Los modelos de Herbrand de $\{P(a) \lor P(b), \neg P(b) \lor P(c), P(a) \to P(c)\}$ son $\{P(b),P(c)\}, \{P(a),P(c)\}$ y $\{P(a),P(b),P(c)\}$ (ver página 3).
- Ejemplo: Sea $S = \{\forall x\, \forall y\, [Q(b,x) \to P(a) \lor R(y)], P(b) \to \neg\exists z\, \exists u\, Q(z,u)\}$. Entonces,
  $$\begin{aligned} \mathrm{UH}(S) &= \{a,b\} \\ \mathrm{BH}(S) &= \{P(a),P(b),Q(a,a),Q(a,b),Q(b.a),Q(b,b),R(a),R(b)\} \end{aligned}$$
  Un modelo de Herbrand de S es $\{P(a)\}$.

Interpretación de Herbrand correspondiente

- Sea $S = \{\{\neg Q(b,x),P(a),R(y)\},\{\neg P(b),\neg Q(z,u)\}\}$ e $\mathscr{I} = (\{1,2\},I)$ con $a^I = 1, b^I = 2, P^I = \{1\}, Q^I = \{(1,1),(2,2)\}, R^I = \{2\}$. Entonces, $\mathscr{I} \models S$.
  Cálculo de la interpretación de Herbrand $\mathscr{I}^*$ correspondiente a $\mathscr{I}$:
  $$\begin{aligned} \mathscr{I}^* &= (\mathrm{UH}(S), I^*) \\ \mathrm{UH}(S) &= \{a,b\} \\ \mathrm{BH}(S) &= \{P(a),P(b),Q(a,a),Q(a,b),Q(b.a),Q(b,b),R(a),R(b)\} \\ I^*(P(a)) &= P^I(a^I) = P^I(1) = \mathrm{V} \\ I^*(P(b)) &= P^I(b^I) = P^I(2) = \mathrm{F} \\ I^*(Q(a,a)) &= Q^I(a^I,a^I) = Q^I(1,1) = \mathrm{V} \\ I^*(Q(a,b)) &= Q^I(a^I,b^I) = Q^I(1,2) = \mathrm{F} \\ I^*(Q(b,a)) &= Q^I(b^I,a^I) = Q^I(2,1) = \mathrm{F} \\ I^*(Q(b,b)) &= Q^I(b^I,b^I) = Q^I(2,2) = \mathrm{V} \\ I^*(R(a))) &= R^I(a^I) = R^I(1) = \mathrm{F} \\ I^*(R(b)) &= R^I(b^I) = R^I(2) = \mathrm{V} \end{aligned}$$
  $I^* = \{P(a),Q(a,a),Q(b,b),R(b)\}$ y $\mathscr{I}^* \models S$.

Interpretación de Herbrand correspondiente

- Sea S el conjunto de cláusulas $\{\{P(a)\},\{Q(y,f(a))\}\}$ e $\mathscr{I} = (\{1,2\}, I)$ con $a^I = 1, f^I = \{(1,2),(2,1)\}, P^I = \{1\}, Q^I = \{(1,2),(2,2)\}$. Entonces, $\mathscr{I} \models S$.
  Cálculo de la interpretación de Herbrand $\mathscr{I}^*$ correspondiente a $\mathscr{I}$:

$$
\begin{array}{ll}
\mathscr{I}^* & = (\mathrm{UH}(S), I^*) \\
\mathrm{UH}(S) & = \{a, f(a), f(f(a)), \dots\} = \{f^i(a) : i \in \mathbb{N}\} \\
\mathrm{BH}(S) & = \{P(f^n(a)) : n \in \mathbb{N}\} \cup \{Q(f^n(a), f^m(a)) : n,m \in \mathbb{N}\} \\
I^*(P(a)) & = P^I(a^I) = P^I(1) = \mathrm{V} \\
I^*(P(f(a))) & = P^I(f^I(a^I)) = P^I(f^I(1)) = P^I(2) = \mathrm{F} \\
I^*(P(f(f(a)))) & = P^I(f^I(f^{(}a^I))) = P^I(1) = \mathrm{V} \\
I^*(P(f^n(a))) & = \begin{cases} \mathrm{V}, & \text{si } n \text{ es par;} \\ \mathrm{F}, & \text{en caso contrario.} \end{cases} \\
I^*(Q(f^n(a), f^m(a))) & = \begin{cases} \mathrm{V}, & \text{si } m \text{ es impar;} \\ \mathrm{F}, & \text{en caso contrario.} \end{cases}
\end{array}
$$

  $I^* = \{P(f^{2n}(a)) : n \in \mathbb{N}\} \cup \{Q(f^n(a), f^{2m+1}(a)) : n,m \in \mathbb{N}\}$
  $\mathscr{I}^* \models S$.

Consistencia mediante modelos de Herbrand

- Prop.: Sea S un conjunto de fórmulas básicas. Son equivalentes:
  1. S es consistente.
  2. S tiene un modelo de Herbrand.
- Prop.: Sea S un conjunto de cláusulas. Si $\mathscr{I}^*$ es una interpretación de Herbrand correspondiente a un modelo $\mathscr{I}$ de S, entonces $\mathscr{I}^*$ es un modelo de S.
- Prop.: Sea S un conjunto de cláusulas. Son equivalentes:
  1. S es consistente.
  2. S tiene un modelo de Herbrand.
- Prop.: Sea S un conjunto de cláusulas. Son equivalentes:
  1. S es inconsistente.
  2. S no tiene ningún modelo de Herbrand.
- Prop.: Existen conjuntos de fórmulas consistentes sin modelos de Herbrand.

Ejemplo de consistente sin modelos de Herbrand

- Sea $S = \{\exists x\, P(x), \neg P(a)\}$. Entonces,
  - S es consistente.
    $\mathscr{I} \models S$ con $\mathscr{I} = (\{1,2\}, I)$, $a^I = 1$ y $P^I = \{2\}$.
  - S no tiene modelos de Herbrand
    $\mathrm{UH}(S) = \{a\}$
    $\mathrm{BH}(S) = \{P(a)\}$
    Las interpretaciones de Herbrand de S son $\emptyset$ y $\{P(a)\}$.
    $\emptyset \not\models S$
    $\{P(a)\} \not\models S$
  - Una forma clausal de S es $S' = \{P(b), \neg P(a)\}$.
  - Un modelo de Herbrand de S' es $\mathscr{I} = (U, I)$ con $U = \{a, b\}$ y $P^I = \{b\}$.

Instancias básicas de una cláusula

- Def.: Una sustitución σ (de L) es una aplicación $\sigma : \mathrm{Var} \to \mathrm{Térm}(L)$.
- Def.: Sea $C = \{L_1, \dots, L_n\}$ una cláusula de L y σ una sustitución de L. Entonces, $C\sigma = \{L_1\sigma, \dots, L_n\sigma\}$ es una instancia de C.
- Ejemplo: Sea $C = \{P(x,a), \neg P(x, f(y))\}$.
  $C[x/a, y/f(a)] = \{P(f(a),a), \neg P(f(a), f(f(a)))\}$
- Def.: $C\sigma$ es una instancia básica de C si todos los literales de $C\sigma$ son básicos.
- Ejemplo: Sea $C = \{P(x,a), \neg P(x, f(y))\}$.
  $\{P(f(a),a), \neg P(f(a), f(f(a)))\}$ es una instancia básica de C.
  $\{P(f(a),a), \neg P(f(f(a)), f(a))\}$ no es una instancia básica de C.
  $\{P(x,a), \neg P(f(f(a)), f(a))\}$ no es una instancia básica de C.

Extensiones de Herbrand

- Def.: La extensión de Herbrand de un conjunto de cláusulas S es el conjunto de fórmulas
  $\text{EH}(S) = \{C\sigma : C \in S$ y, para toda variable x en $C, \sigma(x) \in \text{UH}(S)\}$.
- Prop.: $\text{EH}(L) = \bigcup_{i \geq 0} \text{EH}_i(L)$, donde $\text{EH}_i(L)$ es el nivel i de la $\text{EH}(L)$ definido por $\text{EH}_i(S) = \{C\sigma : C \in S$ y, para toda variable x en $C, \sigma(x) \in \text{UH}_i(S)\}$.
- Ejemplos:
  - Sea $S = \{\{P(x)\}, \{\neg P(f(x))\}\}$ (p. 8.17). Entonces,
    $$\begin{aligned} \text{EH}_0(S) &= \{\{P(a)\}, \{\neg P(f(a))\}\} \\ \text{EH}_1(S) &= \text{EH}_0(S) \cup \{\{P(f(a))\}, \{\neg P(f(f(a)))\}\} \\ \text{EH}_2(S) &= \text{EH}_1(S) \cup \{\{P(f(f(a)))\}, \{\neg P(f(f(f(a))))\}\} \end{aligned}$$
  - Sea $S = \{\{\neg P(x), Q(x)\}, \{P(a)\}, \{\neg Q(z)\}\}$ (p. 8.21).
    Entonces, $\text{EH}(S) = \{\{\neg P(a), Q(a)\}, \{P(a)\}, \{\neg Q(a)\}\}$.
  - Sea $S = \{\{\neg P(x), Q(x)\}, \{\neg Q(y), R(y)\}, \{P(a)\}, \{\neg R(a)\}\}$ (p. 8.21).
    Entonces, $\text{EH}(S) = \{\{\neg P(a), Q(a)\}, \{\neg Q(a), R(a)\}, \{P(a)\}, \{\neg R(a)\}\}$.

Teorema de Herbrand

- Teorema de Herbrand: Sea S un conjunto de cláusulas. Son equivalentes:
  1. S es consistente.
  2. $\text{EH}(S)$ es consistente (en el sentido proposicional).
- Prop.: Sea S un conjunto de cláusulas. Entonces, son equivalentes
  1. S es inconsistente.
  2. $\text{EH}(S)$ tiene un subconjunto finito inconsistente (en el sentido proposicional).
  3. Para algún i, $\text{EH}_i(S)$ es inconsistente (en el sentido proposicional).

Semidecisión mediante el teorema de Herbrand

Entrada: Un conjunto finito de cláusulas, S.
Salida: *Inconsistente*, si S es inconsistente.

$i := 0$
bucle
  si $\text{EH}_i(S)$ es inconsistente (en el sentido proposicional) **entonces**
    Devolver *Inconsistente* y terminar
  en caso contrario
    $i := i + 1$
  fsi
fbucle

Ejemplos de decisión mediante el teorema de Herbrand

- $S = \{\{\neg P(x), Q(x)\}, \{P(a)\}, \{\neg Q(z)\}\}$ (p. 17) es inconsistente.
  $\text{EH}_0(S) = \{\{\neg P(a), Q(a)\}, \{P(a)\}, \{\neg Q(a)\}\}$ es inconsistente.

1	$\{\neg P(a), Q(a)\}$	
2	$\{P(a)\}$	
3	$\{\neg Q(a)\}$	
4	$\{Q(a)\}$	Res $1,2$
5	$\square$	Res $3,4$

- $S = \{\{\neg P(x), Q(x)\}, \{\neg Q(y), R(y)\}, \{P(a)\}, \{\neg R(a)\}\}$ es inconsistente.
  $\text{EH}_0(S) = \{\{\neg P(a), Q(a)\}, \{\neg Q(a), R(a)\}, \{P(a)\}, \{\neg R(a)\}\}$.

1	$\{\neg P(a), Q(a)\}$	
2	$\{\neg Q(a), R(a)\}$	
3	$\{P(a)\}$	
4	$\{\neg R(a)\}$	
5	$\{Q(a)\}$	Res $1,3$
6	$\{R(a)\}$	Res $5,2$
7	$\square$	Res $6,4$

Ejemplos de decisión mediante el teorema de Herbrand

- $S = \{\{P(x)\}, \{\neg P(f(x))\}\}$ es inconsistente (p. 17).
  – $\text{EH}_0(S) = \{\{P(a)\}, \{\neg P(f(a))\}\}$ es consistente
  $\mathscr{I} = \{P(a)\} \models \text{EH}_0(S)$
  – $\text{EH}_1(S) = \text{EH}_0(S) \cup \{\{P(f(a))\}, \{\neg P(f(f(a)))\}\}$ es inconsistente.

1	$\{P(f(a))\}$	
2	$\{\neg P(f(a))\}$	
3	$\square$	Res $1,2$

- $S = \{\{\neg P(x), Q(f(x),x)\}, \{P(g(b))\}, \{\neg Q(y,z)\}\}$ es inconsistente. Dem.:
  $S' = \{\{\neg P(g(b)), Q(f(g(b)),g(b))\}, \{P(g(b))\}, \{\neg Q(f(g(b)),g(b))\}\} \subset \text{EH}(S)$ es inconsistente.

1	$\{\neg P(g(b)), Q(f(g(b)),g(b))\}$	
2	$\{P(g(b))\}$	
3	$\{\neg Q(f(g(b)),g(b))\}$	
4	$\{Q(f(g(b)),g(b))\}$	Res $1,2$
5	$\square$	Res $3,3$

Bibliografía

1. M.L. Bonet *Apuntes de LPO.* (Univ. Politécnica de Cataluña, 2003) pp. 31–34.
2. C.L. Chang y R.C.T. Lee *Symbolic logic and mechanical theorem proving* (Academic Press, 1973) pp. 51–62.
3. M. Ojeda e I. Pérez *Lógica para la computación (Vol. 2: Lógica de Primer Orden)* (Ágora, 1997) pp. 59–74.
4. E. Paniagua, J.L. Sánchez y F. Martín *Lógica computacional* (Thomson, 2003) pp. 160–169.
5. L. Paulson *Logic and proof* (U. Cambridge, 2002) pp. 47–50.
6. U. Schöning *Logic for computer scientists* (Birkäuser, 1989) pp. 70–78.