

Métodos Formais em Inteligência Artificial Distribuída

Representação e Raciocínio Baseados em Lógicas

Cláudia Nalon

<http://www.cic.unb.br/~nalon>

`nalon@{cic.unb.br, unb.br}`

Universidade de Brasília
Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

Motivação

Motivação – I

Motivação – II

Motivação – III

Roteiro

Lógica
Proposicional

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas
Cognitivas

Conclusões

Motivação

Motivação – I

Motivação

Motivação – I

Motivação – II

Motivação – III

Roteiro

Lógica
Proposicional

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas
Cognitivas

Conclusões

- ✓ Linguagens lógicas estão intrinsicamente ligadas ao conceito de computação (e.g. circuitos implementando um computador digital podem ser descritos através de linguagem proposicional).
- ✓ A utilização de linguagens lógicas para descrever problemas computacionais data da época em que os primeiros computadores digitais foram construídos.
- ✓ Datam da mesma época também, os esforços para se implementar provadores automáticos de teoremas.

Motivação – II

Motivação

Motivação – I

Motivação – II

Motivação – III

Roteiro

Lógica Proposicional

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas Cognitivas

Conclusões

- ✓ Agentes têm sido empregados em ambientes complexos, onde falha em seus comportamentos podem ocasionar perdas ou danos fatais;
- ✓ Assegurar correção de sistemas é um desafio em toda a ciência da computação;
- ✓ Métodos formais:
 - ✗ exigem precisão: não permitem implementações *ad hoc*;
 - ✗ encontrar o formalismo correto, natural e tratável.
- ✓ Formalismos são utilizados com dois diferentes propósitos:
 - ✗ linguagem de especificação, utilizada pelos agentes em seus raciocínios e ações;
 - ✗ metalinguagem utilizada pelo projetista para especificar e verificar propriedades comportamentais dos agentes em ambientes dinâmicos.

Motivação – III

Motivação

Motivação – I

Motivação – II

Motivação – III

Roteiro

Lógica
Proposicional

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas
Cognitivas

Conclusões

- ✓ Desenvolvimentos teóricos fizeram com que as linguagens modais deixassem o contexto da discussão filosófica e fossem adotadas na descrição de problemas matemáticos e computacionais.
- ✓ Linguagens modais expressam tais problemas de modo natural, através, por exemplo, do uso das noções de necessidade, conhecimento, crença e tempo.
- ✓ Linguagens modais possuem boas características, ou seja, os problemas de decisão relativos a tais linguagens são computacionalmente tratáveis.

Roteiro

Motivação

Motivação – I

Motivação – II

Motivação – III

Roteiro

Lógica
Proposicional

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas
Cognitivas

Conclusões

1. Lógica Proposicional
2. Lógicas Modais
3. Lógicas Temporais
4. Lógicas Dinâmicas

Uma **Lógica** compreende três diferentes aspectos:

1. sintaxe (o que pode ser escrito, em termos de símbolo);
2. semântica (a teoria de modelos diz o que é verdade e o que não é); e
3. cálculo dedutivo (a teoria de provas diz o que pode ou não ser inferido).

Motivação

**Lógica
Proposicional**

Introdução e
Sintaxe

Semântica – I

Semântica – II

Propriedades

Semânticas

Métodos de Prova

– I

Semântica e Prova

Métodos de Prova

– II

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas

Cognitivas

Conclusões

Lógica Proposicional

Introdução e Sintaxe

Motivação

Lógica
Proposicional
Introdução e
Sintaxe

Semântica – I

Semântica – II

Propriedades

Semânticas

Métodos de Prova

– I

Semântica e Prova

Métodos de Prova

– II

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas

Cognitivas

Conclusões

A linguagem da Lógica Proposicional $\mathcal{L}_{\mathcal{P}}$ é definida por:

- ✓ *Símbolos Proposicionais:* $\mathcal{P} = \{p, q, r, p', q', r', \dots\}$;
- ✓ *Constantes:* **true**, **false**;
- ✓ *Operadores Clássicos:*

$\neg\varphi$	(negação),
$(\varphi \wedge \phi)$	(conjunção),
$(\varphi \vee \phi)$	(disjunção),
$(\varphi \rightarrow \phi)$	(implicação),
$(\varphi \leftrightarrow \phi)$	(dupla implicação).

Semântica – I

Motivação

Lógica
Proposicional

Introdução e
Sintaxe

Semântica – I

Semântica – II
Propriedades

Semânticas
Métodos de Prova
– I

Semântica e Prova
Métodos de Prova
– II

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas
Cognitivas

Conclusões

- ✓ Uma **valoração** é uma função π_0 a qual atribui um *valor de verdade* a cada um dos símbolos proposicionais:

$$\pi_0 : \mathcal{P} \rightarrow \{true, false\}$$

- ✓ A função de valoração é estendida para lidar com fórmulas complexas, e.g.:

$$\pi(\neg\varphi) = true \text{ se, e somente se, } \pi_0(\varphi) = false$$

$$\pi(\varphi \wedge \psi) = true \text{ se, e somente se, } \pi_0(\varphi) = true \text{ e } \pi_0(\psi) = true$$

Semântica – II

Motivação

Lógica
Proposicional

Introdução e
Sintaxe

Semântica – I

Semântica – II

Propriedades
Semânticas
Métodos de Prova
– I

Semântica e Prova
Métodos de Prova
– II

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas
Cognitivas

Conclusões

- ✓ Seja $L \subseteq \mathcal{P}$ uma interpretação. Intuitivamente, L é o conjunto de fatos *verdadeiros*.
- ✓ Seja $M_0 = \langle L \rangle$.
- ✓ O significado de fórmulas é dado por:
 1. $M_0 \models \varphi$, onde $\varphi \in \mathcal{P}$, se, e somente se, $\varphi \in L$;
 2. $M_0 \models \neg\varphi$ se, e somente se, $M_0 \not\models \varphi$; e
 3. $M_0 \models \varphi \wedge \psi$ se, e somente se, $M_0 \models \varphi$ e $M_0 \models \psi$.

Propriedades Semânticas

Motivação

Lógica
Proposicional

Introdução e
Sintaxe

Semântica – I

Semântica – II

Propriedades
Semânticas

Métodos de Prova
– I

Semântica e Prova
Métodos de Prova
– II

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas
Cognitivas

Conclusões

- ✓ Uma valoração π **satisfaz** uma fórmula φ se, e somente se, $\pi(\varphi) = \text{true}$.
Um modelo M_0 **satisfaz** uma fórmula φ se, e somente se, $M_0 \models \varphi$.

Propriedades Semânticas

Motivação

Lógica
Proposicional

Introdução e
Sintaxe

Semântica – I
Semântica – II

Propriedades
Semânticas

Métodos de Prova
– I

Semântica e Prova
Métodos de Prova
– II

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas
Cognitivas

Conclusões

- ✓ Uma valoração π **satisfaz** uma fórmula φ se, e somente se, $\pi(\varphi) = true$.
Um modelo M_0 **satisfaz** uma fórmula φ se, e somente se, $M_0 \models \varphi$.
- ✓ Uma fórmula φ é **válida** se, e somente se, $\pi(\varphi) = true$ para toda valoração π .
Uma fórmula φ é **válida** se, e somente se, $M_0 \models \varphi$ para todo M_0 .

Propriedades Semânticas

Motivação

Lógica
Proposicional

Introdução e
Sintaxe

Semântica – I
Semântica – II

Propriedades
Semânticas

Métodos de Prova
– I

Semântica e Prova
Métodos de Prova
– II

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas
Cognitivas

Conclusões

- ✓ Uma valoração π **satisfaz** uma fórmula φ se, e somente se, $\pi(\varphi) = \text{true}$.
Um modelo M_0 **satisfaz** uma fórmula φ se, e somente se, $M_0 \models \varphi$.
- ✓ Uma fórmula φ é **válida** se, e somente se, $\pi(\varphi) = \text{true}$ para toda valoração π .
Uma fórmula φ é **válida** se, e somente se, $M_0 \models \varphi$ para todo M_0 .
- ✓ Uma fórmula φ é uma **contradição** se, e somente se, $\pi(\varphi) = \text{false}$ para toda valoração π .
Uma fórmula φ é uma **contradição** se, e somente se, para todo M_0 , $M_0 \not\models \varphi$.

Propriedades Semânticas

Motivação

Lógica
Proposicional

Introdução e
Sintaxe

Semântica – I
Semântica – II

Propriedades
Semânticas

Métodos de Prova
– I

Semântica e Prova
Métodos de Prova
– II

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas
Cognitivas

Conclusões

- ✓ Uma valoração π **satisfaz** uma fórmula φ se, e somente se, $\pi(\varphi) = true$.
Um modelo M_0 **satisfaz** uma fórmula φ se, e somente se, $M_0 \models \varphi$.
- ✓ Uma fórmula φ é **válida** se, e somente se, $\pi(\varphi) = true$ para toda valoração π .
Uma fórmula φ é **válida** se, e somente se, $M_0 \models \varphi$ para todo M_0 .
- ✓ Uma fórmula φ é uma **contradição** se, e somente se, $\pi(\varphi) = false$ para toda valoração π .
Uma fórmula φ é uma **contradição** se, e somente se, para todo M_0 , $M_0 \not\models \varphi$.
- ✓ $\Gamma \models \varphi$: φ é conseqüência lógica de Γ .
 $\models \varphi$ abrevia $\emptyset \models \varphi$: φ é válida.

Métodos de Prova – I

Motivação

Lógica
Proposicional

Introdução e
Sintaxe

Semântica – I

Semântica – II

Propriedades
Semânticas

Métodos de Prova
– I

Semântica e Prova
Métodos de Prova
– II

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas
Cognitivas

Conclusões

- ✓ Um **cálculo** para uma determinada linguagem lógica consiste de um conjunto de **axiomas** e um conjunto de **regras de inferência**.

Métodos de Prova – I

Motivação

Lógica
Proposicional

Introdução e
Sintaxe

Semântica – I

Semântica – II
Propriedades
Semânticas

Métodos de Prova
– I

Semântica e Prova
Métodos de Prova
– II

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas
Cognitivas

Conclusões

- ✓ Um **cálculo** para uma determinada linguagem lógica consiste de um conjunto de **axiomas** e um conjunto de **regras de inferência**.
- ✓ A **prova de φ a partir de um conjunto de fórmulas Γ** é uma seqüência de fórmulas $\varphi_0, \dots, \varphi_n$, onde $\varphi_n = \varphi$ e cada φ_i é
 - ✗ um axioma;
 - ✗ um membro de Γ ; ou
 - ✗ foi obtido a partir da aplicação das regras de inferência às fórmulas anteriores na seqüência.

Métodos de Prova – I

Motivação

Lógica
Proposicional

Introdução e
Sintaxe

Semântica – I

Semântica – II
Propriedades
Semânticas

Métodos de Prova
– I

Semântica e Prova
Métodos de Prova
– II

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas
Cognitivas

Conclusões

- ✓ Um **cálculo** para uma determinada linguagem lógica consiste de um conjunto de **axiomas** e um conjunto de **regras de inferência**.
- ✓ A **prova de φ a partir de um conjunto de fórmulas Γ** é uma seqüência de fórmulas $\varphi_0, \dots, \varphi_n$, onde $\varphi_n = \varphi$ e cada φ_i é
 - ✗ um axioma;
 - ✗ um membro de Γ ; ou
 - ✗ foi obtido a partir da aplicação das regras de inferência às fórmulas anteriores na seqüência.
- ✓ $\Gamma \vdash \varphi$: existe uma prova de φ a partir de Γ ;
 $\vdash \varphi$ abrevia $\emptyset \vdash \varphi$: φ é um **teorema**.

Relação entre Semântica e Prova

Motivação

Lógica
Proposicional

Introdução e
Sintaxe

Semântica – I

Semântica – II

Propriedades

Semânticas

Métodos de Prova

– I

Semântica e Prova

Métodos de Prova

– II

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas

Cognitivas

Conclusões

- ✓ O cálculo é **consistente** se todo teorema é uma fórmula válida.

$$\vdash \varphi \implies \models \varphi$$

Relação entre Semântica e Prova

Motivação

Lógica
Proposicional

Introdução e
Sintaxe

Semântica – I

Semântica – II

Propriedades

Semânticas

Métodos de Prova
– I

Semântica e Prova

Métodos de Prova
– II

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas
Cognitivas

Conclusões

- ✓ O cálculo é **consistente** se todo teorema é uma fórmula válida.

$$\vdash \varphi \implies \models \varphi$$

- ✓ O cálculo é **completo** se toda fórmula válida é um teorema.

$$\models \varphi \implies \vdash \varphi$$

Relação entre Semântica e Prova

Motivação

Lógica
Proposicional

Introdução e
Sintaxe

Semântica – I

Semântica – II

Propriedades

Semânticas

Métodos de Prova

– I

Semântica e Prova

Métodos de Prova

– II

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas

Cognitivas

Conclusões

- ✓ O cálculo é **consistente** se todo teorema é uma fórmula válida.

$$\vdash \varphi \implies \models \varphi$$

- ✓ O cálculo é **completo** se toda fórmula válida é um teorema.

$$\models \varphi \implies \vdash \varphi$$

- ✓ Uma lógica é **decidível** se existe um *procedimento*, cuja *terminação* seja garantida, que *determine* se uma dada fórmula é um teorema ou não.

Métodos de Prova – II

Motivação

Lógica
Proposicional

Introdução e
Sintaxe

Semântica – I

Semântica – II

Propriedades

Semânticas

Métodos de Prova

– I

Semântica e Prova

Métodos de Prova

– II

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas

Cognitivas

Conclusões

$$\{p \rightarrow q, q \rightarrow r\} \models \{p \rightarrow r\}$$

Métodos de Prova – II

Motivação

Lógica
Proposicional

Introdução e
Sintaxe

Semântica – I

Semântica – II

Propriedades

Semânticas

Métodos de Prova
– I

Semântica e Prova
Métodos de Prova
– II

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas
Cognitivas

Conclusões

$$\{p \rightarrow q, q \rightarrow r\} \models \{p \rightarrow r\}$$

p	q	r	$p \rightarrow q$	$q \rightarrow r$	$p \rightarrow r$
F	F	F	T	T	T
F	F	T	T	T	T
F	T	F	T	F	T
F	T	T	T	T	T
T	F	F	F	T	F
T	F	T	F	T	T
T	T	F	T	F	F
T	T	T	T	T	T

Métodos de Prova – II

$$\{p \rightarrow q, q \rightarrow r\} \models \{p \rightarrow r\}$$

p	q	r	$p \rightarrow q$	$q \rightarrow r$	$p \rightarrow r$
F	F	F	T	T	T
F	F	T	T	T	T
F	T	F	T	F	T
F	T	T	T	T	T
T	F	F	F	T	F
T	F	T	F	T	T
T	T	F	T	F	F
T	T	T	T	T	T

Motivação

Lógica
Proposicional

Introdução e
Sintaxe

Semântica – I

Semântica – II

Propriedades

Semânticas

Métodos de Prova
– I

Semântica e Prova

Métodos de Prova
– II

Lógica Modal

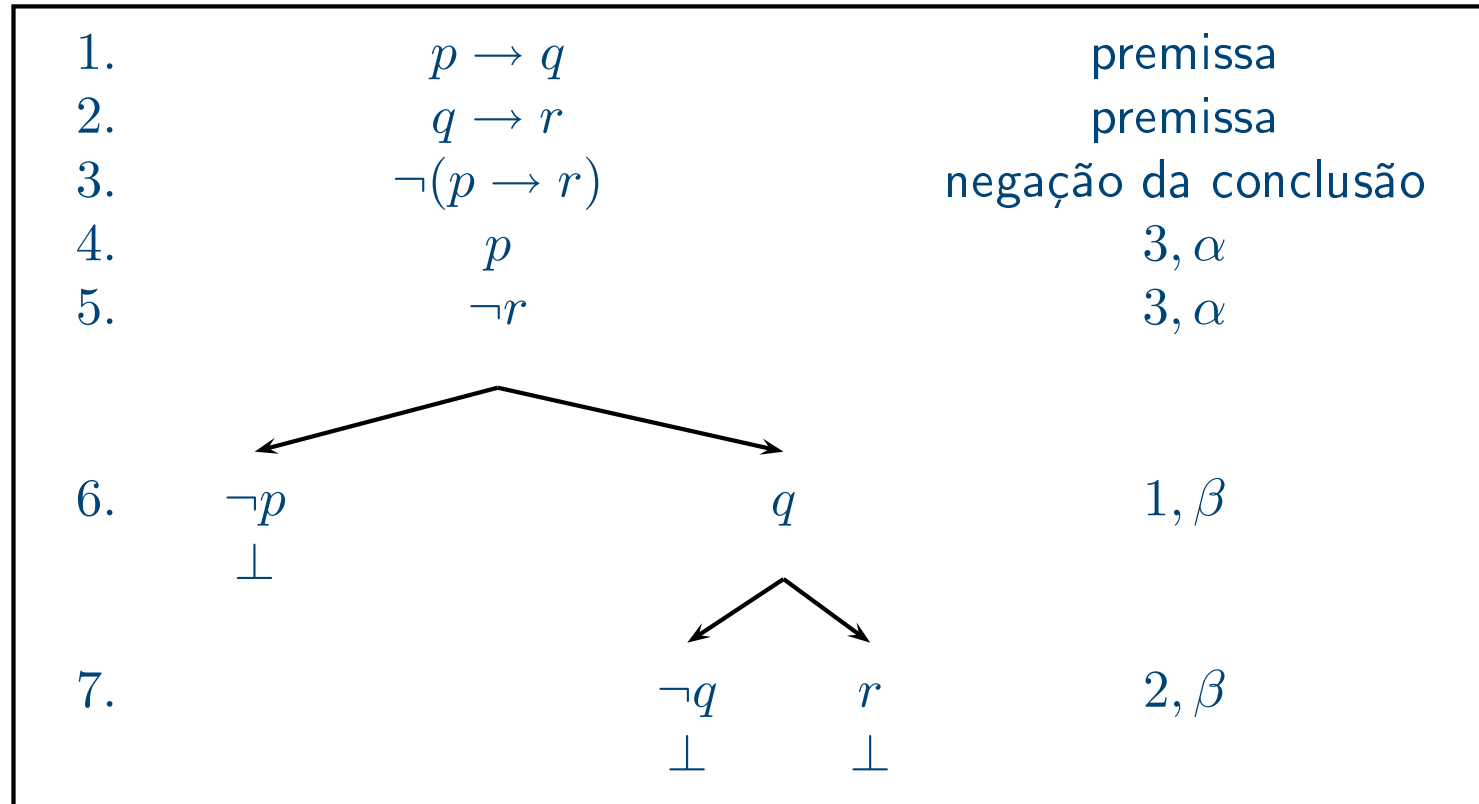
Lógica Temporal

Primitivas
Cognitivas

Conclusões

Métodos de Prova – II

$$\{p \rightarrow q, q \rightarrow r\} \vdash \{p \rightarrow r\}$$



Motivação

Lógica
Proposicional

Lógica Modal

Introdução e
Sintaxe

Semântica
Propriedades da
Relação de
Acessibilidade

Lógica Deôntica
Lógica Dinâmica

Sintaxe
Semântica

Lógica Temporal

Primitivas
Cognitivas

Conclusões

Lógica Modal

Introdução e Sintaxe

Motivação

Lógica Proposicional

**Lógica Modal
Introdução e
Sintaxe**

Semântica
Propriedades da
Relação de
Acessibilidade

Lógica Deôntica
Lógica Dinâmica
Sintaxe
Semântica

Lógica Temporal

Primitivas
Cognitivas

Conclusões

✓ Sintaxe: mesmas regras de $\mathcal{L}_{\mathcal{P}} + \Box\varphi$ e $\Diamond\varphi$

\Diamond *chove*

\Box *o_sol_nasce_a_leste*

Semântica

Motivação

Lógica
Proposicional

Lógica Modal

Introdução e
Sintaxe

Semântica

Propriedades da
Relação de
Acessibilidade

Lógica Deôntica

Lógica Dinâmica

Sintaxe

Semântica

Lógica Temporal

Primitivas

Cognitivas

Conclusões

- ✓ Semântica: deve-se considerar todos os mundos possíveis e a relação de acessibilidade entre esses mundos.
- ✓ Seja $M_1 = \langle W, L, R \rangle$ um modelo, onde W é o conjunto de mundos; $L : W \rightarrow 2^{\mathcal{P}}$ é o conjunto de símbolos proposicionais que são verdadeiros em cada mundo; e $R \subseteq W \times W$ é a relação de acessibilidade.
 1. $M_1 \models_w \varphi$, onde $\varphi \in \mathcal{P}$, se, e somente se, $\varphi \in L(w)$;
 2. $M_1 \models_w \neg\varphi$ se, e somente se, $M_1 \not\models_w \varphi$;
 3. $M_1 \models_w \varphi \wedge \psi$ se, e somente se, $M_1 \models_w \varphi$ e $M_1 \models_w \psi$;
 4. $M_1 \models_w \Box\varphi$ se, e somente se, para todo w' tal que $(w, w') \in R$ temos $M_1 \models_{w'} \varphi$; e
 5. $M_1 \models_w \Diamond\varphi$ se, e somente se, para existe algum w' tal que $(w, w') \in R$ temos $M_1 \models_{w'} \varphi$.

Propriedades da Relação de Acessibilidade

Motivação

Lógica
Proposicional

Lógica Modal

Introdução e
Sintaxe

Semântica

Propriedades da
Relação de
Acessibilidade

Lógica Deôntica
Lógica Dinâmica
Sintaxe
Semântica

Lógica Temporal

Primitivas
Cognitivas

Conclusões

- ✓ Reflexiva: para todo $w \in W$, $(w, w) \in R$
- ✓ Serial: para todo $w \in W$, existe $w' \in W$ tal que $(w, w') \in R$
- ✓ Transitiva: para todo $w, w', w'' \in W$, se $(w, w') \in R$ e $(w', w'') \in R$, então $(w, w'') \in R$
- ✓ Simétrica: para todo $w, w' \in W$, se $(w, w') \in R$, então $(w', w) \in R$
- ✓ Euclidiana: para todo $w, w', w'' \in W$, se $(w, w') \in R$ e $(w, w'') \in R$, então $(w', w'') \in R$

Lógica Deôntica

Motivação

Lógica
Proposicional

Lógica Modal

Introdução e
Sintaxe

Semântica
Propriedades da
Relação de
Acessibilidade

Lógica Deôntica

Lógica Dinâmica
Sintaxe
Semântica

Lógica Temporal

Primitivas
Cognitivas

Conclusões

- ✓ Introduce um novo operador Obl_i para obrigação.
- ✓ Por exemplo, a fórmula:

$$Obl_i \varphi \rightarrow \neg Obl_i \neg \varphi$$

diz que o agente i é obrigado a fazer com que φ valha a menos que não seja obrigado a fazer com que $\neg \varphi$ valha.

- ✓ Esta formalização leva a uma série de paradoxos.

Lógica Dinâmica

Motivação

Lógica
Proposicional

Lógica Modal

Introdução e
Sintaxe

Semântica
Propriedades da
Relação de
Acessibilidade

Lógica Deontica

Lógica Dinâmica

Sintaxe

Semântica

Lógica Temporal

Primitivas
Cognitivas

Conclusões

- ✓ Lógica modal que formaliza ações;
- ✓ Os operadores de necessidade e possibilidade são baseados em um conjunto fixo de ações;
- ✓ Lógica dinâmica de programas regulares possui uma sublinguagem baseada em expressões regulares para definir as expressões que caracterizam ações complexas;
- ✓ As ações são comandos do ALGOL-60, daí o nome da lógica;

Sintaxe

Motivação

Lógica
Proposicional

Lógica Modal

Introdução e
Sintaxe

Semântica
Propriedades da
Relação de
Acessibilidade

Lógica Deôntica
Lógica Dinâmica

Sintaxe

Semântica

Lógica Temporal

Primitivas
Cognitivas

Conclusões

✓ São definidas duas linguagens: \mathcal{L}_D e \mathcal{L}_R (onde \mathcal{B} é o conjunto de ações atômicas):

1. as expressões de \mathcal{L}_P são expressões de \mathcal{L}_D ;
2. se $\beta \in \mathcal{B}$, então $\beta \in \mathcal{L}_R$;
3. se $a, b \in \mathcal{L}_R$, então $(a; b)$, $(a + b)$ e $a^* \in \mathcal{L}_R$;
4. se $\varphi \in \mathcal{L}_P$, então $\varphi? \in \mathcal{L}_R$;
5. se $a \in \mathcal{L}_R$, então $\Box a$ e $\Diamond a \in \mathcal{L}_R$.

✓ Exemplo:

$$((q?; a) + (\neg q?; b))$$

Semântica

Motivação

Lógica
Proposicional

Lógica Modal

Introdução e
Sintaxe

Semântica
Propriedades da
Relação de
Acessibilidade

Lógica Deôntica
Lógica Dinâmica

Sintaxe

Semântica

Lógica Temporal

Primitivas
Cognitivas

Conclusões

Seja $M_2 = \langle W, L, \delta \rangle$ um modelo, onde W e L são definidos como antes e $\delta \subseteq W \times \mathcal{B} \times \mathcal{W}$ é a relação de transição. A classe de relações de acessibilidade é definida em relação a $\mathcal{L}_{\mathcal{R}}$

1. $R_{\beta}(w, w')$ se, e somente se, $\delta(w, \beta, w')$
2. $R_{a;b}(w, w')$ se, e somente se, existe w'' tal que $R_a(w, w'')$ e $R_b(w'', w')$
3. $R_{a+b}(w, w')$ se, e somente se, $R_a(w, w')$ ou $R_b(w, w')$
4. $R_{a^*}(w, w')$ se, e somente se, existe uma seqüência w_0, \dots, w_n tal que $w_0 = w$, $w_n = w'$ e, para todo $0 \leq i \leq n - 1$, temos $R_a(w_i, w_{i+1})$

Motivação

Lógica
Proposicional

Lógica Modal

Lógica Temporal

Introdução

Estrutura
Subjacente de
Modelos

Branching Time

Sintaxe

Semântica
Sentenças
Temporais

Branching Time

Branching Time e
Ação

Primitivas
Cognitivas

Conclusões

Lógica Temporal

Introdução

Motivação

Lógica
Proposicional

Lógica Modal

Lógica Temporal

Introdução

Estrutura
Subjacente de
Modelos

Branching Time

Sintaxe

Semântica
Sentenças
Temporais

Branching Time

Branching Time e
Ação

Primitivas
Cognitivas

Conclusões

- ✓ Úteis na especificação e verificação de hardware e de programas, sistemas concorrentes e distribuídos, bases de dados temporais, planejamento, sistemas multi-agentes, etc.
- ✗ Um flip-flop nunca atinge um estado instável;
- ✗ Um determinado programa eventualmente termina;
- ✗ *Invariância*: uma determinada propriedade \mathcal{P} se preserva a partir de um determinado momento;
- ✗ *Fairness*: Um determinado recurso será sempre acessível;
- ✗ Dois processos nunca atingem seu ponto crítico num mesmo instante.

Estrutura Subjacente de Modelos

Motivação

Lógica
Proposicional

Lógica Modal

Lógica Temporal

Introdução

**Estrutura
Subjacente de
Modelos**

Branching Time
Sintaxe

Semântica
Sentenças
Temporais

Branching Time
Branching Time e
Ação

Primitivas
Cognitivas

Conclusões

Diferenças nos modelos subjacentes:

- ✓ Linear X Ramificada
- ✓ Discreta X Densa
- ✓ Pontual X Intervalar

Branching Time

Motivação

Lógica Proposicional

Lógica Modal

Lógica Temporal

Introdução

Estrutura Subjacente de Modelos

Branching Time

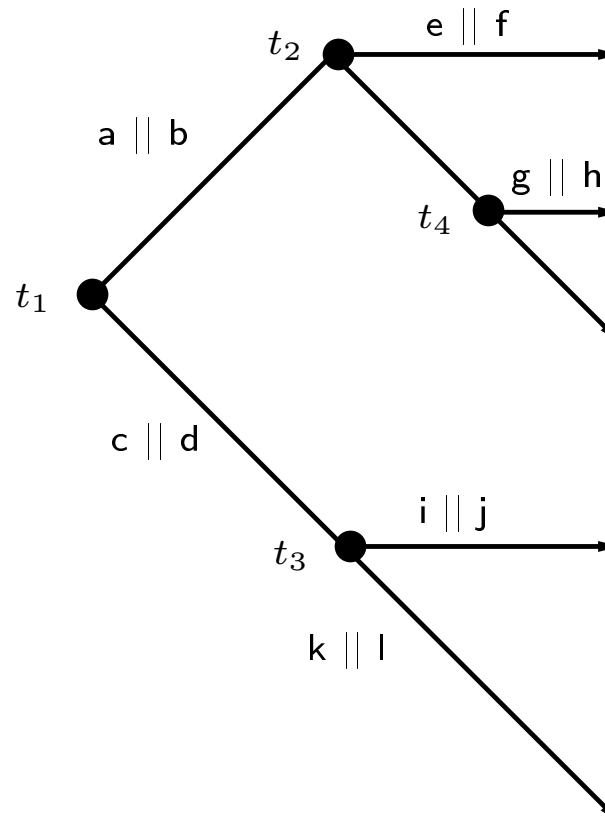
Sintaxe

Semântica Sentenças Temporais

Branching Time e Ação

Primitivas Cognitivas

Conclusões



Motivação

Lógica
Proposicional

Lógica Modal

Lógica Temporal

Introdução

Estrutura
Subjacente de
Modelos

Branching Time

Sintaxe

Semântica
Sentenças
Temporais

Branching Time

Branching Time e
Ação

Primitivas
Cognitivas

Conclusões

Lógica Temporal Linear

- ✓ *Símbolos Proposicionais:* $\mathcal{P} = \{p, q, r, p', q', r', \dots\}$;
- ✓ *Constantes:* true, false;
- ✓ *Operadores Clássicos:* $\neg\varphi$, $(\varphi \wedge \psi)$, $(\varphi \vee \psi)$, $(\varphi \rightarrow \psi)$, $(\varphi \leftrightarrow \psi)$;
- ✓ *Operadores Temporais:* $\diamond\varphi$, $\square\varphi$, $\bigcirc\varphi$, $(\varphi \mathcal{U} \psi)$, $(\varphi \mathcal{W} \psi)$;
- ✓ *Operadores Temporais (passado):* $\blacklozenge\varphi$, $\blacksquare\varphi$, $\bullet\varphi$, $(\varphi \mathcal{S} \psi)$

Semântica

Motivação

Lógica Proposicional

Lógica Modal

Lógica Temporal

Introdução

Estrutura Subjacente de Modelos

Branching Time

Sintaxe

Semântica

Sentenças Temporais

Branching Time

Branching Time e Ação

Primitivas Cognitivas

Conclusões

Modelos são retas infinitas, onde cada ponto representa um momento no tempo: tempo é discreto



Semântica

Modelos são retas infinitas, onde cada ponto representa um momento no tempo: tempo é discreto



- Motivação
- Lógica Proposicional
- Lógica Modal
- Lógica Temporal**
- Introdução
- Estrutura Subjacente de Modelos
- Branching Time
- Sintaxe
- Semântica**
- Sentenças Temporais
- Branching Time
- Branching Time e Ação
- Primitivas Cognitivas
- Conclusões

Semântica

Modelos são retas infinitas, onde cada ponto representa um momento no tempo: tempo é discreto



- Motivação
- Lógica Proposicional
- Lógica Modal
- Lógica Temporal**
- Introdução
- Estrutura Subjacente de Modelos
- Branching Time
- Sintaxe
- Semântica**
- Sentenças Temporais
- Branching Time
- Branching Time e Ação
- Primitivas Cognitivas
- Conclusões

Semântica

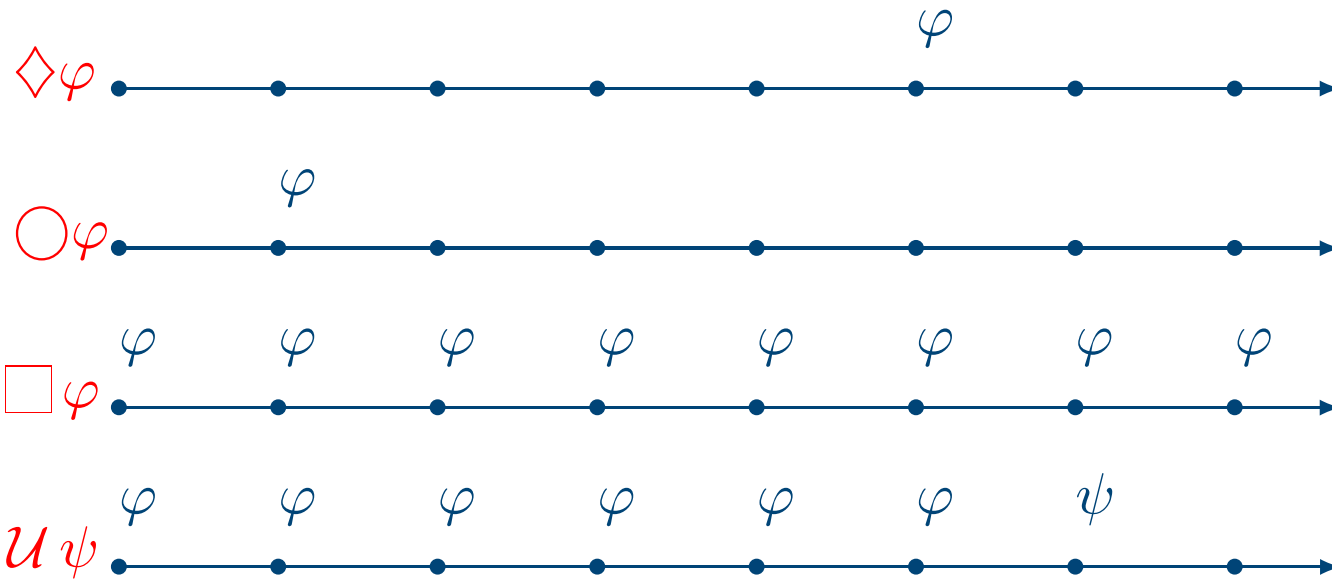
Modelos são retas infinitas, onde cada ponto representa um momento no tempo: tempo é discreto



- Motivação
- Lógica Proposicional
- Lógica Modal
- Lógica Temporal**
- Introdução
- Estrutura Subjacente de Modelos
- Branching Time
- Sintaxe
- Semântica**
- Sentenças Temporais
- Branching Time
- Branching Time e Ação
- Primitivas Cognitivas
- Conclusões

Semântica

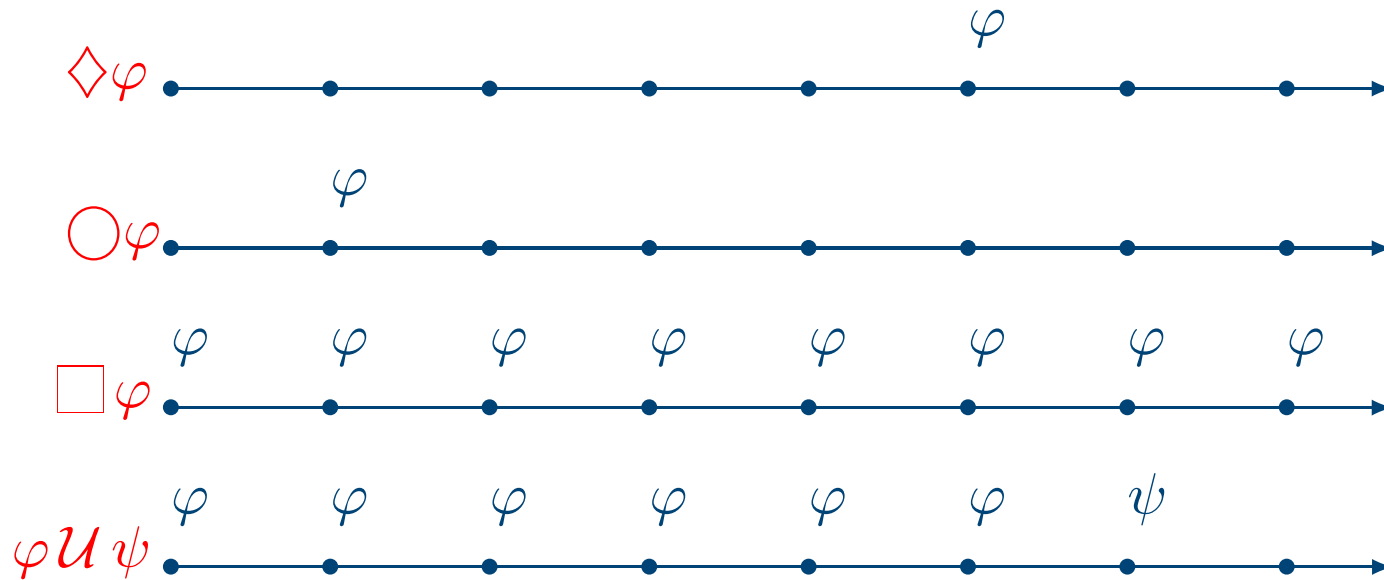
Modelos são retas infinitas, onde cada ponto representa um momento no tempo: tempo é discreto



- Motivação
- Lógica Proposicional
- Lógica Modal
- Lógica Temporal**
- Introdução
- Estrutura Subjacente de Modelos
- Branching Time
- Sintaxe
- Semântica**
- Sentenças Temporais
- Branching Time
- Branching Time e Ação
- Primitivas Cognitivas
- Conclusões

Semântica

Modelos são retas infinitas, onde cada ponto representa um momento no tempo: tempo é discreto



$$\varphi \mathcal{W} \psi \leftrightarrow (\varphi \mathcal{U} \psi) \vee \square \varphi$$

Sentenças Temporais

Motivação

Lógica
Proposicional

Lógica Modal

Lógica Temporal

Introdução

Estrutura
Subjacente de
Modelos

Branching Time

Sintaxe

Semântica

Sentenças
Temporais

Branching Time

Branching Time e
Ação

Primitivas
Cognitivas

Conclusões

✓ \diamond terminate_program

✓ $\square \diamond$ resource

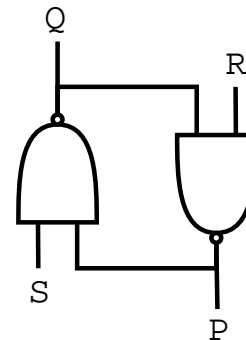
✓ walking \mathcal{U} (reaches_target \vee ends_fuel)

✓

a. $\square (q \leftrightarrow \neg(p \wedge s))$

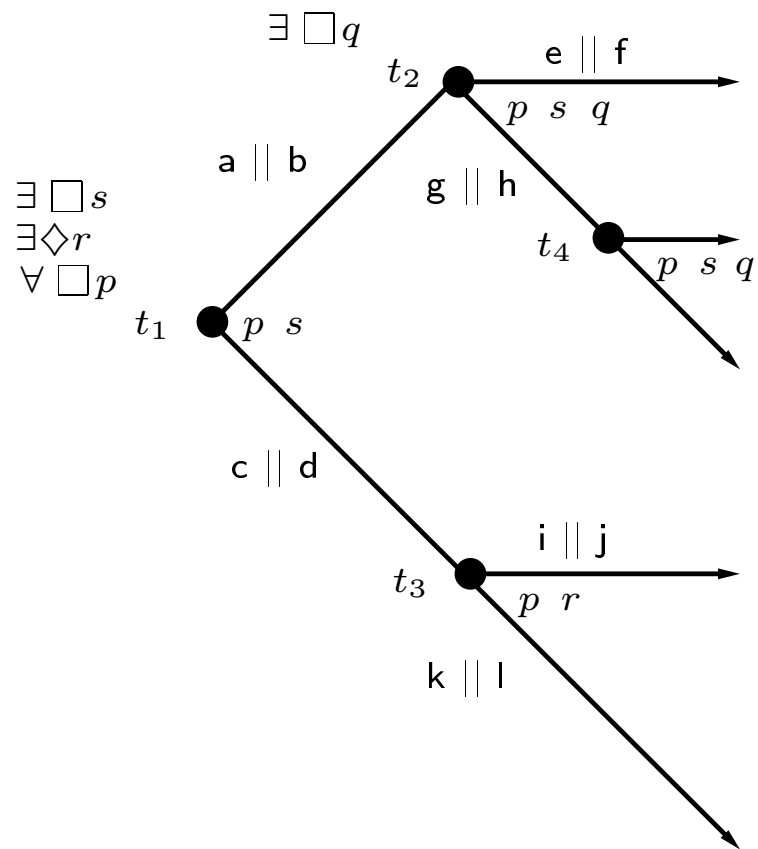
b. $\square (p \leftrightarrow \neg(q \wedge r))$

c. $\square (s \vee r)$



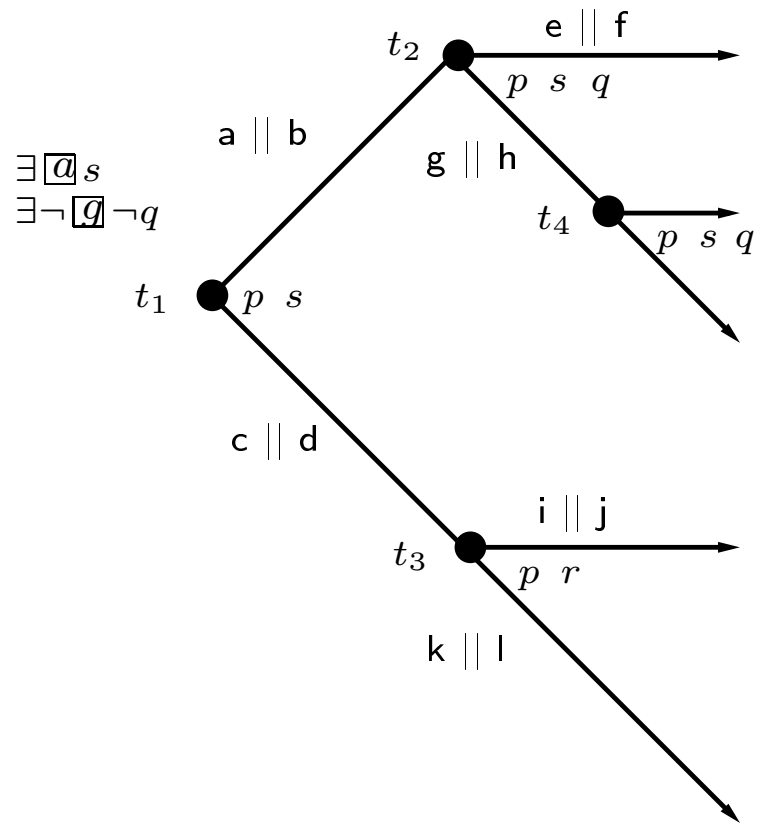
Branching Time

- ✓ Quantificação sobre possíveis caminhos;
- ✓ Operadores $\forall \Box \varphi, \forall \Diamond \varphi, \dots, \exists \Box \varphi, \exists \Diamond \varphi, \dots$
- ✓ Exemplos:



Branching Time e Ação

- ✓ Quantificação sobre possíveis caminhos;
- ✓ Operadores $\forall \square \varphi, \forall \diamond \varphi, \dots, \exists \square \varphi, \exists \diamond \varphi, \dots$
- ✓ Exemplos:



- Motivação
- Lógica Proposicional
- Lógica Modal
- Lógica Temporal**
- Introdução
- Estrutura Subjacente de Modelos
- Branching Time
- Sintaxe
- Semântica
- Sentenças Temporais
- Branching Time
- Branching Time e Ação**
- Primitivas Cognitivas
- Conclusões

Motivação

Lógica
Proposicional

Lógica Modal

Lógica Temporal

**Primitivas
Cognitivas**

Especificações de
Alto Nível

Lógica de Crença

Exemplo

Lógica de
Conhecimento

Semântica

Lógica de
Conhecimento

Exemplo -
Formalização

Desejos e
Intenções

Axiomas

Comprometimento

Como Fazer

Conclusões

Primitivas Cognitivas

Especificações de Alto Nível

Motivação

Lógica
Proposicional

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas
Cognitivas
Especificações de
Alto Nível

Lógica de Crença

Exemplo

Lógica de
Conhecimento

Semântica

Lógica de
Conhecimento

Exemplo -
Formalização

Desejos e
Intenções

Axiomas

Comprometimento
Como Fazer

Conclusões

- ✓ Agentes são vistos a partir de noções cognitivas;
- ✓ Tais noções devem ser rigorosamente definidas;
- ✓ BDI - *beliefs, desires and intentions*;
- ✓ Lógicas introduzem novos operadores:

Bel_i, Des_i e Int_i

onde $i \in \mathcal{A} = \{1, \dots, n\}, n \in \mathbb{N}$.

- ✓ Exemplo:

$Des_1 \forall \square \text{ganhar_loteria} \wedge Int_1 \exists \diamond \text{apostar} \wedge \neg Bel_1 \forall \square \text{ganhar}$

Lógica de Crença

Motivação

Lógica Proposicional

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas Cognitivas

Especificações de Alto Nível

Lógica de Crença

Exemplo

Lógica de Conhecimento

Semântica

Lógica de Conhecimento

Exemplo -

Formalização

Desejos e Intenções

Axiomas

Comprometimento

Como Fazer

Conclusões

✓ Relações de acessibilidade são seriais, transitivas e euclidianas.

✓ Axiomatização: $KL_{(n)} = K, D, 4, 5$.

K:	$\vdash \text{Bel}_i(\varphi \rightarrow \psi) \rightarrow (\text{Bel}_i\varphi \rightarrow \text{Bel}_i\psi)$
D:	$\vdash \text{Bel}_i\varphi \rightarrow \neg\text{Bel}_i\neg\varphi$
4:	$\vdash \text{Bel}_i\varphi \rightarrow \text{Bel}_i\text{Bel}_i\varphi$
5:	$\vdash \neg\text{Bel}_i\neg\varphi \rightarrow \text{Bel}_i\neg\text{Bel}_i\neg\varphi$

✓ Sintaxe: *Símbolos proposicionais, constantes e operadores clássicos* e *operadores modais*: $\text{Bel}_i\varphi, \forall i \in \mathcal{A} = \{1, \dots, n\}$.

✓ Semântica: $M = \langle W, \mathcal{B}_1, \dots, \mathcal{B}_n, \pi \rangle$, $M \models_w \text{Bel}_i\varphi$ sse para todo w' tal que $(w, w') \in \mathcal{B}_i$ temos $M \models_{w'} \varphi$.

Exemplo

Motivação

Lógica Proposicional

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas Cognitivas

Especificações de Alto Nível

Lógica de Crença

Exemplo

Lógica de Conhecimento

Semântica

Lógica de Conhecimento

Exemplo - Formalização

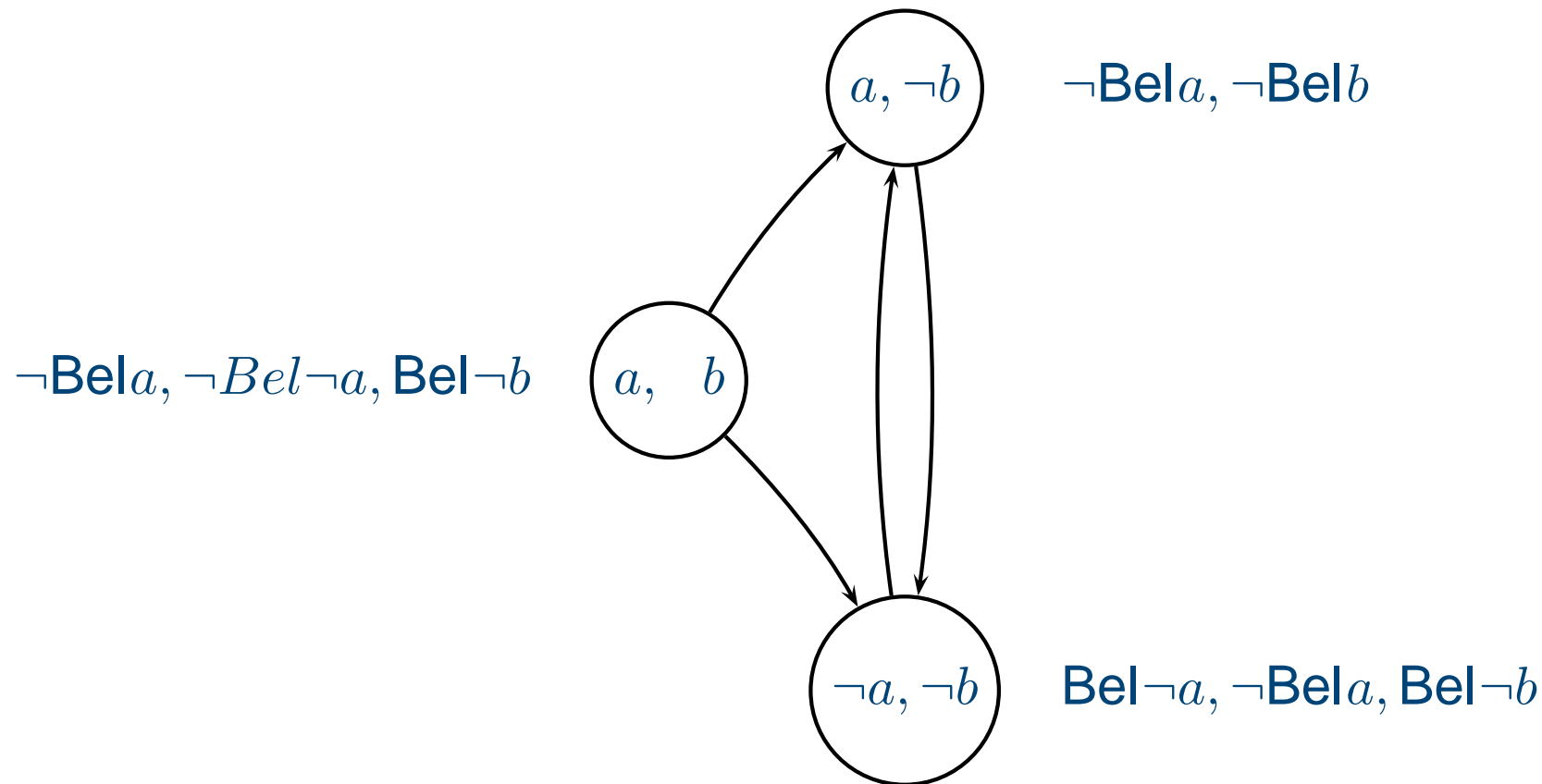
Desejos e Intenções

Axiomas

Comprometimento

Como Fazer

Conclusões



Lógica de Conhecimento

Motivação

Lógica Proposicional

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas Cognitivas

Especificações de Alto Nível

Lógica de Crença Exemplo

Lógica de Conhecimento

Semântica Lógica de Conhecimento

Exemplo - Formalização

Desejos e Intenções

Axiomas

Comprometimento Como Fazer

Conclusões

✓ Axiomatização: $KL_{(n)} = K, T, D, 4, 5$.

K: $\vdash K_i (\varphi \rightarrow \psi) \rightarrow (K_i \varphi \rightarrow K_i \psi)$

T: $\vdash K_i \varphi \rightarrow \varphi$

D: $\vdash K_i \varphi \rightarrow \neg K_i \neg \varphi$

4: $\vdash K_i \varphi \rightarrow K_i K_i \varphi$

5: $\vdash \neg K_i \neg \varphi \rightarrow K_i \neg K_i \neg \varphi$

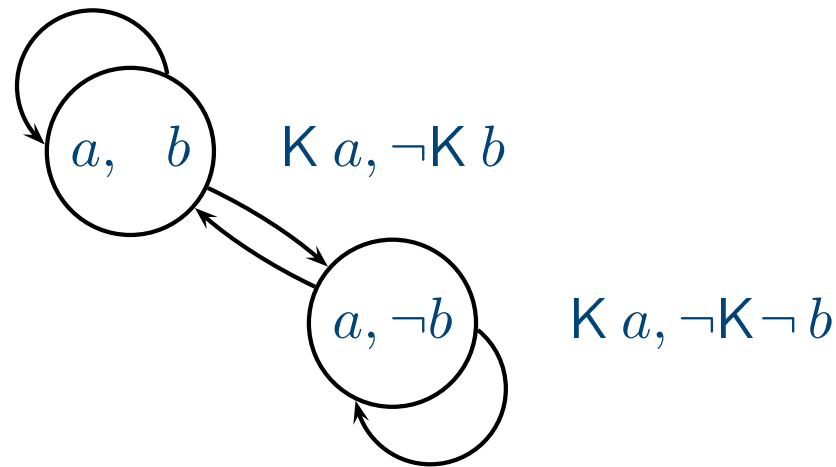
✓ Sintaxe: *Símbolos proposicionais, constantes e operadores clássicos* e *operadores modais*: $K_i \varphi, \forall i \in \mathcal{A} = \{1, \dots, n\}$.

Semântica

Semântica baseada em estruturas de Kripke

$$M = \langle W, \mathcal{K}_1, \dots, \mathcal{K}_n, \pi \rangle$$

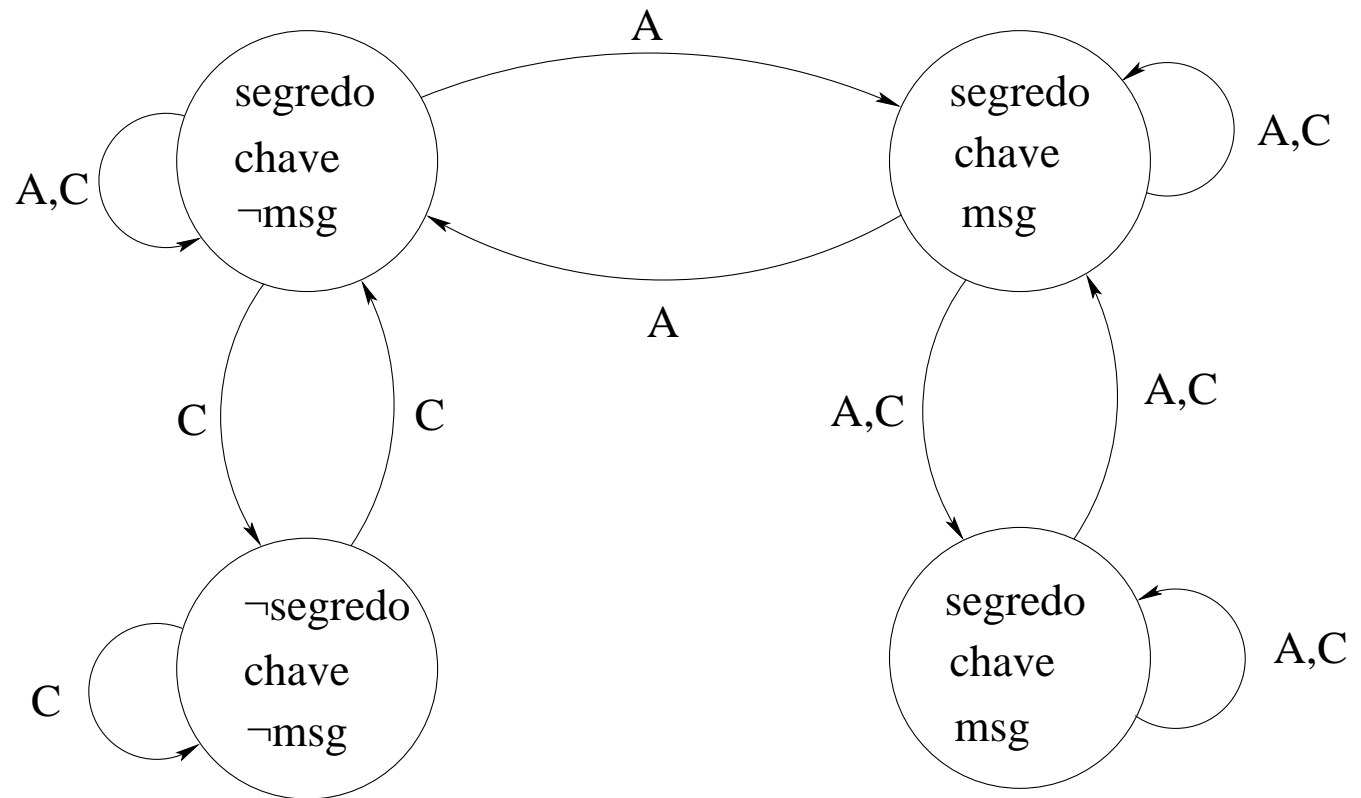
onde W é um conjunto de mundos; \mathcal{K}_i são relações de equivalência; e $\pi : W \times \mathcal{P} \rightarrow \{true, false\}$ é uma função.



- Motivação
- Lógica Proposicional
- Lógica Modal
- Lógica Temporal
- Primitivas Cognitivas**
- Especificações de Alto Nível
- Lógica de Crença
- Exemplo
- Lógica de Conhecimento
- Semântica**
- Lógica de Conhecimento
- Exemplo - Formalização
- Desejos e Intenções
- Axiomas
- Comprometimento
- Como Fazer
- Conclusões

Lógica de Conhecimento

- ✓ Úteis na especificação de sistemas multi-agentes, sistemas distribuídos, protocolos, bases de conhecimento, etc.



- Motivação
- Lógica Proposicional
- Lógica Modal
- Lógica Temporal
- Primitivas Cognitivas**
- Especificações de Alto Nível
- Lógica de Crença
- Exemplo
- Lógica de Conhecimento
- Lógica de Conhecimento**
- Exemplo - Formalização
- Desejos e Intenções
- Axiomas
- Comprometimento
- Como Fazer
- Conclusões

Exemplo - Formalização

Motivação

Lógica
Proposicional

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas
Cognitivas

Especificações de
Alto Nível

Lógica de Crença

Exemplo

Lógica de
Conhecimento

Semântica
Lógica de
Conhecimento

Exemplo -
Formalização

Desejos e
Intenções

Axiomas

Comprometimento
Como Fazer

Conclusões

Introduz uma nova modalidade para cada agente: $K_i \varphi$.

K_{Alice} segredo

$K_{Alice} K_{Charlie}$ chave

$K_{Alice} K_{Charlie} (\text{chave} \wedge \text{send}(Alice, Charlie, msg) \rightarrow K_{Charlie} \text{segredo})$

$\text{send}(Alice, Charlie, msg) \rightarrow K_{Alice} K_{Charlie} \text{segredo}$

$K_{Alice} K_{Bob} \neg \text{chave} \rightarrow K_{Alice} K_{Bob} \neg \text{segredo}$

Desejos e Intenções

Motivação

Lógica
Proposicional

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas
Cognitivas

Especificações de
Alto Nível

Lógica de Crença
Exemplo

Lógica de
Conhecimento

Semântica
Lógica de
Conhecimento
Exemplo -
Formalização

Desejos e
Intenções

Axiomas

Comprometimento
Como Fazer

Conclusões

- ✓ São introduzidos **operadores modais** $\text{Int}_i\varphi$ e $\text{Des}_i\varphi$ onde $i \in \mathcal{A} = \{1, \dots, n\}$.
- ✓ Semântica, não há restrições sobre modelos:
 $M = \langle W, \mathcal{I}_1, \dots, \mathcal{I}_n, \pi \rangle$, $M \models_w \text{Int}_i\varphi$ sse para todo w' tal que $(w, w') \in \mathcal{I}_i$ temos $M \models_{w'} \varphi$.
 $M = \langle W, \mathcal{D}_1, \dots, \mathcal{D}_n, \pi \rangle$, $M \models_w \text{Des}_i\varphi$ sse para todo w' tal que $(w, w') \in \mathcal{D}_i$ temos $M \models_{w'} \varphi$.
- ✓ **Desejos** podem ser inconsistentes; **objetivos** são subconjuntos consistentes de desejos; **intenções** têm que ser inevitavelmente alcançadas.

Axiomas

Motivação

Lógica Proposicional

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas Cognitivas

Especificações de Alto Nível

Lógica de Crença

Exemplo

Lógica de Conhecimento

Semântica

Lógica de Conhecimento

Exemplo -

Formalização

Desejos e Intenções

Axiomas

Comprometimento

Como Fazer

Conclusões

✓ $\text{Int}_i\varphi \rightarrow \exists\Diamond\varphi$

✓ $\text{Int}_i\varphi \wedge \text{Int}_i\psi \rightarrow \text{Int}_i(\Diamond\varphi \wedge \Diamond\psi)$

✓ $\exists \square((\text{Int}_i\varphi) \wedge \neg\varphi)$ é satisfeita

Comprometimento

Motivação

Lógica
Proposicional

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas
Cognitivas

Especificações de
Alto Nível

Lógica de Crença
Exemplo

Lógica de
Conhecimento

Semântica
Lógica de
Conhecimento

Exemplo -
Formalização

Desejos e
Intenções

Axiomas

Comprometimento

Como Fazer

Conclusões

- ✓ Desejos e intenções têm caracterizações semânticas semelhantes;
- ✓ Diferem no modo como se relacionam com outras modalidades e evoluem com o tempo;
- ✓ **Comprometimento** é uma das propriedades que diferenciam desejos de intenções;
- ✓ O comprometimento determina se o agente irá persistir nas suas intenções e por quanto tempo;
- ✓ O comprometimento determina as restrições sobre como intenções são revisadas e alteradas.
- ✓ Pode ser caracterizado qualitativamente/semanticamente.

Como Fazer

Motivação

Lógica Proposicional

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas Cognitivas

Especificações de Alto Nível

Lógica de Crença

Exemplo

Lógica de Conhecimento

Semântica

Lógica de Conhecimento

Exemplo - Formalização

Desejos e Intenções

Axiomas

Comprometimento

Como Fazer

Conclusões

- ✓ Agentes executam ações para satisfazer suas intenções;
- ✓ Para alcançar determinado objetivo, o agente precisa saber as conseqüências de suas ações no futuro: exige formalização de conhecimento e tempo;
- ✓ O conceito de **árvore de ações** é utilizado para caracterizar semanticamente *know-how*:

$$1. \quad M \models_i [(\emptyset)]\varphi \text{ sse } M \models_i K_i \varphi;$$

$$2. \quad M \models_i [(\beta)]\varphi \text{ sse } M \models_i K_i (\exists \blacklozenge \mathbf{true} \wedge \forall \square K_i \varphi)$$

$$3. \quad M \models_i [(\beta; \tau_1, \dots, \tau_n)]\varphi \text{ sse } \\ M \models_i K_i (\exists \blacklozenge \mathbf{true} \wedge \forall \square (\bigvee_{1 \leq j \leq n} \tau_j : [(\tau_j)]\varphi))$$

Motivação

Lógica
Proposicional

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas
Cognitivas

Conclusões

Outros Enfoques
Raciocínio com
Conceitos Lógicos

Conclusões

Outros Enfoques

Motivação

Lógica
Proposicional

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas
Cognitivas

Conclusões

Outros Enfoques

Raciocínio com
Conceitos Lógicos

- ✓ Onisciência lógica não é característica necessária a agentes inteligentes;
- ✓ Representação explícita de crenças ou intenções resolve este problema, mas não permite inferências entre os diferentes contextos;
- ✓ Restrições semânticas impostas via mecanismos de representação podem ser utilizados, mas não têm sido explorados pela literatura.

Raciocínio com Conceitos Lógicos

Motivação

Lógica
Proposicional

Lógica Modal

Lógica Temporal

Primitivas
Cognitivas

Conclusões

Outros Enfoques

Raciocínio com
Conceitos Lógicos

- ✓ Formalizações podem ser utilizadas pelo agente e/ou para o projeto do agente;
- ✓ Em ambos os casos, é necessária utilização de técnicas eficientes de raciocínio;
- ✓ Prova automática de teoremas será utilizada pelo agente para decidir quais ações tomar;
- ✓ Prova automática de teoremas e verificação de modelos será utilizada pelo projetista para relacionar a especificação lógica à construção do agente;