Causalidade e dependência em raciocínio sobre ações

Ivan J. Varzinczak*, **Marcos A. Castilho**

Departamento de Informática — Universidade Federal do Paraná
Caixa Postal 19081 — 81531-990 Curitiba PR Brasil

`ivan@irit.fr, marcos@inf.ufpr.br`

Abstract. *In this work we propose a solution to the frame and ramification problems based on a dependence relation that states in which circumstances a given action may change the truth value of a literal. We show how to integrate such a dependence in the modal framework of the Logic of Actions and Plans $\mathcal{LAP}$, which gives us a simple and powerful formalism for reasoning about actions.*

Resumo. *Neste trabalho propomos uma solução para os problemas da persistência e da ramificação em termos de uma relação de dependência que indica em que circunstâncias uma dada ação pode alterar o valor de verdade de um certo literal. Mostramos como integrar a dependência ao formalismo modal da Lógica de Ações e Planos $\mathcal{LAP}$, obtendo uma abordagem causal simples e poderosa para tratar problemas que envolvem ações.*

1. Introdução

Uma das coisas que distingue o ser humano de uma máquina hoje é a capacidade de raciocínio, em especial quando envolve a realização de inferências levando em conta a execução de ações. Tais inferências consistem, dentre outras, em saber o estado do mundo antes da execução de uma certa ação, ou os efeitos produzidos por uma outra, ou até mesmo encontrar uma seqüência de ações que nos leve a um estado desejado.

Querer integrar a uma máquina a capacidade de realizar tais tarefas está dentro dos objetivos da Inteligência Artificial. Quando estas teorias são estudadas tendo como base a lógica matemática, estamos dentro da área conhecida como *Raciocínio Sobre Ações* [Shanahan, 1997]. Alguns desafios perseguem os pesquisadores desta área praticamente desde os primórdios da Inteligência Artificial. Dois deles são abordados neste trabalho: o *problema da persistência* e o *problema da ramificação*.

O problema da persistência [McCarthy and Hayes, 1969] consiste em determinar, de uma maneira econômica, que certas propriedades não mudam após a execução de uma ação. Como exemplo, ligar a TV não altera o resultado do jogo. Este tipo de fato deve ser derivado na teoria sem que tenhamos de escrever uma fórmula explícita (conhecida como *axioma de persistência*) para cada fato que não muda após a execução de uma ação, entre outros motivos porque existe uma quantidade muito grande destas fórmulas.

O problema da ramificação [Finger, 1987] consiste em encontrar uma forma de deduzir todos os efeitos (diretos e indiretos) ocasionados por uma ação. Como exemplo,

---

*Atualmente doutorando no Institut de Recherche en Informatique de Toulouse com bolsa da CAPES.

ligar a televisão pode acordar o bebê, e riscar um fósforo numa cozinha cheia de gás pode causar um incêndio. Como uma ação pode gerar inúmeros efeitos, deseja-se representar e inferir os mesmos da maneira mais econômica possível.

Neste texto, a lógica de base utilizada é a Lógica de Ações e Planos $\mathcal{LAP}$, definida em [Castilho et al., 1999]. $\mathcal{LAP}$ é uma lógica multimodal [Popkorn, 1994] simples na qual fórmulas são construídas da seguinte maneira: Dadas α uma ação e A, A' fórmulas clássicas proposicionais, $\Box\langle\alpha\rangle\top$ é lida como "α é executável", $\Box(A' \rightarrow [\alpha]A)$ como "se A', então após α A". Como exemplo, a fórmula $\Box(\mathit{Carregada} \rightarrow [\mathit{atirar}]\neg\mathit{Vivo})$ enuncia que atirar matará a vítima se a arma estiver carregada, e a fórmula $\Box(\mathit{Morto} \leftrightarrow \neg\mathit{Vivo})$ estabelece que alguém que está morto não deve estar vivo. Usamos o operador $\Box$ do sistema $S4$ para representar leis (estáticas ou dinâmicas) e uma coleção de operadores $[\alpha]$ do sistema K, um para cada ação α, para representar o comportamento de ações.

Para tratar o problema da persistência, em [Castilho et al., 1999] $\mathcal{LAP}$ foi acrescida da relação de dependência $\leadsto$ entre *ações* e *literais*, resultando na lógica $\mathcal{LAP}_{\leadsto}$. Com $\mathcal{LAP}_{\leadsto}$, podemos raciocinar sobre ações sem escrever todos os axiomas de persistência e de uma maneira não sujeita aos contra-exemplos que invalidam a maioria das abordagens na literatura. Entretanto, na grande maioria das vezes em $\mathcal{LAP}_{\leadsto}$ temos de escrever *axiomas de persistência condicionais* como o representado pela fórmula abaixo:

$$\Box((\neg\mathit{Carregada} \wedge \mathit{Vivo}) \rightarrow [\mathit{atirar}]\mathit{Vivo}). \tag{1}$$

Fórmulas do tipo de (1) estabelecem que se uma dada condição é verdadeira, então alguns literais persistem após a execução de certa ação. Sem axiomas de persistência condicionais não é possível derivar as conclusões desejadas em $\mathcal{LAP}_{\leadsto}$. Isso tem constituído uma crítica por parte da comunidade, pois supõe-se que uma solução real para o problema da persistência não deve apresentar nenhum de tais axiomas. Pelo contrário, deseja-se que informações sobre persistência estejam implícitas na descrição de domínio.

Sendo assim, propomos aqui uma nova dependência com a qual não há necessidade de se enunciar nenhum tipo de informação sobre não-mudança. Realizamos isto acrescentando um parâmetro a cada tupla da relação de dependência com o objetivo de denotar o *contexto* (uma circunstância particular) no qual uma ação pode alterar o valor de verdade de um dado literal. Isso faz com que tenhamos uma dependência mais informativa, eliminando a necessidade de enunciar axiomas de persistência condicionais na descrição do domínio. Uma vez feito isso, adicionamos a nova relação à lógica de base $\mathcal{LAP}$, obtendo uma nova abordagem para os problemas da persistência e da ramificação.

A lógica resultante $\mathcal{LAPD}$ pode tratar as mesmas classes de problemas que $\mathcal{LAP}_{\leadsto}$, porém é mais simples na elaboração de descrições de domínios. A vantagem de se usar lógica modal torna-se evidente na definição de um procedimento de prova, uma vez que pode-se adaptar facilmente o sistema de tableau de $\mathcal{LAP}$ para $\mathcal{LAPD}$.

2. Dependência Contextual

Apresentamos aqui uma nova relação de dependência capaz de capturar o *contexto* no qual uma ação é executada. Definimos uma relação de dependência ternária envolvendo *ações*, *literais* e *fórmulas*[1]. Tais fórmulas caracterizam a circunstância particular na qual

[1]Fórmulas da Lógica Clássica Proposicional, sem operadores modais.

as ações podem causar uma mudança no valor de verdade dos literais considerados.

Dizer que um literal L *depende* de uma determinada ação α em um dado *contexto* C significa que se C é verdadeiro, então, após a execução de α, L *pode* ter o seu valor de verdade alterado. Assim, dizemos que α pode causar L no contexto C e este conceito será representado pela expressão α may cause L if C. Como exemplo, considere a ação *atirar* e os literais $\neg$*Vivo* e *Carregada*. Como *atirar* pode causar $\neg$*Vivo* numa circunstância em que se tenha *Carregada*, então a expressão

$$\textit{atirar} \ \textsf{may cause} \ \neg\textit{Vivo} \ \textsf{if} \ \textit{Carregada}$$

pertence à relação de dependência contextualizada.

Um ponto importante aqui é o fato de tal noção de dependência apenas *permitir* mudança, e não necessariamente a *forçar*. Isso permite representar cenários que envolvem não-determinismo de maneira mais intuitiva do que as abordagens mais conhecidas, como [Thielscher, 1997, Lin, 1995, McCain and Turner, 1995].

Definimos $\textit{AÇÕES} = \{\alpha, \beta, \ldots\}$ como sendo o conjunto de *ações*, como *atirar* e *carregar*. $\textit{ATM} = \{P, Q, \ldots\}$ é o conjunto de *átomos*. Exemplos de átomos são *Carregada* e *Vivo*. $\textit{LIT} = \textit{ATM} \cup \{\neg P : P \in \textit{ATM}\}$ é o conjunto de *literais*. O conjunto de todas as fórmulas da lógica clássica proposicional será denotado por *FORPROP*.

Definição 1 Uma *relação de dependência contextual* é uma relação ternária $\mathcal{D} \subseteq \textit{AÇÕES} \times \textit{LIT} \times \textit{FORPROP}$. ■

Triplas (α, L, C) serão escritas como expressões da forma α may cause L if C e representam o fato de que "a execução da ação α *pode* alterar o valor de verdade do literal L, desde que a fórmula C seja verdadeira".

3. Uma nova lógica de ações e planos

Podemos combinar $\mathcal{LAP}$ com a nova noção de dependência contextual $\mathcal{D}$, obtendo, assim, a lógica $\mathcal{LAPD}$. Nesse sentido, os $\mathcal{LAP}$-modelos devem satisfazer a condição de que sempre que todos os contextos nos quais uma ação pode causar um dado literal L forem falsos, o valor de verdade de L deverá ser preservado após a execução de tal ação.

Como exemplo, considere a ação *atirar* e o literal $\neg$*Vivo*. Neste caso, a única maneira de *atirar* causar $\neg$*Vivo* é quando *Carregada* é verdadeiro. Assim, numa circunstância em que se tenha $\neg$*Carregada*, a persistência de *Vivo* é garantida pela falsidade do contexto *Carregada*.

Para o mesmo exemplo, considerando a ação *esperar* e o literal *Carregada*, como *esperar* não pode causar $\neg$*Carregada*, não haverá em $\mathcal{D}$ nenhuma expressão da forma *esperar* may cause $\neg$*Carregada* if C, qualquer que seja o contexto C. Sendo assim, garante-se a permanência de *Carregada* após *esperar*.

Com essa condição de dependência, os $\mathcal{LAP}$-modelos em que mudanças não intuitivas ocorrem são eliminados da seguinte maneira: suponha que estamos numa situação particular (um mundo possível) w onde o literal L é falso. Primeiro, imagine que o único elemento de $\mathcal{D}$ envolvendo ambos α e L seja α may cause L if C. Então, se C for verdadeiro, a execução de α pode causar, ou não, uma mudança no valor de verdade de L.

Por outro lado, certamente α não alterará o valor de verdade de L se C for falso. Suponhamos agora que não existe $C \in \mathit{FORPROP}$ tal que α may cause L if $C \in \mathcal{D}$. Então, a execução de α jamais tornará L verdadeiro, e assim L continuará falso após se executar α.

Definição 2 Seja $\mathcal{D}$ uma relação de dependência ternária. Um $\mathcal{LAPD}$-modelo é um $\mathcal{LAP}$-modelo $\mu = \langle W, \{R_\alpha : \alpha \in \mathit{AÇÕES}\}, R_\Box, \tau\rangle$, tal que para $\alpha \in \mathit{AÇÕES}$, $L \in \mathit{LIT}$ e $w, w' \in W$, sempre que $wR_\alpha w'$, se não existe $C \in \mathit{FORPROP}$ tal que $w \models C$ e α may cause L if C, então $w \notin \tau(L)$ se e somente se $w' \notin \tau(L)$. ∎

Dada uma relação de dependência $\mathcal{D}$, uma fórmula A é verdadeira em um $\mathcal{LAPD}$-modelo $\mu = \langle W, \{R_\alpha : \alpha \in \mathit{AÇÕES}\}, R_\Box, \tau\rangle$ se $w \models A$ para todo $w \in W$. A é $\mathcal{LAPD}$-válida (denotado $\models_{\mathcal{LAPD}} A$) se A for verdadeira em todos os $\mathcal{LAPD}$-modelos.

Na versão integral do trabalho, apresentamos dois exemplos que são problemáticos para as demais abordagens presentes na literatura e que são corretamente representados em $\mathcal{LAPD}$. Por questões de limitação de espaço, tais exemplos serão omitidos do presente texto, podendo porém ser consultados em [Varzinczak, 2002].

4. Inferindo axiomas de persistência condicionais

Definindo-se a dependência em função de contextos, obtemos uma solução para os axiomas de persistência condicionais. Isso será mostrado no decorrer da presente seção.

Definição 3 Seja $\alpha \in \mathit{AÇÕES}$, $L \in \mathit{LIT}$ e $\mathcal{D}$ uma relação de dependência. Definimos

$$\mathit{Pre}_{\mathcal{D}}(\alpha, L) = \bigvee_{(\alpha \text{ may cause } L \text{ if } C) \in \mathcal{D}} C$$

∎

Em outras palavras, $\mathit{Pre}_{\mathcal{D}}(\alpha, L)$ é a disjunção de todos os contextos nos quais α pode causar uma mudança no valor de verdade do literal L, dada uma relação de dependência $\mathcal{D}$. Com isso, temos o seguinte teorema fundamental:

Teorema 1 $\models_{\mathcal{LAPD}} \Box((\neg \mathit{Pre}_{\mathcal{D}}(\alpha, L) \wedge \neg L) \rightarrow [\alpha]\neg L)$.

Prova: Suponha que $\Box((\neg \mathit{Pre}_{\mathcal{D}}(\alpha, L) \wedge \neg L) \rightarrow [\alpha]\neg L)$ seja falso, i.e. existe um mundo possível w tal que $w \models \neg \mathit{Pre}_{\mathcal{D}}(\alpha, L)$ e $w \models \neg L$, e não é o caso que $w \models [\alpha]\neg L$, ou seja, $w \models \langle\alpha\rangle L$. Suponha que α é executável, ao menos quando $\neg \mathit{Pre}_{\mathcal{D}}(\alpha, L)$ e $\neg L$ são verdadeiros em w. Então existe w' tal que $wR_\alpha w'$ e $w' \models L$. Porém, como $w \models \neg \mathit{Pre}_{\mathcal{D}}(\alpha, L)$, temos que para toda expressão α may cause L if C em $\mathcal{D}$, $w \not\models C$, e como $w \models \neg L$, pela definição de $\mathcal{D}$, devemos ter $w' \models \neg L$, o que é um absurdo. ∎

Com esse resultado, temos que numa descrição de domínio usando uma relação de dependência $\mathcal{D}$ não há a necessidade de enunciar um conjunto de axiomas de persistência condicionais, uma vez que todas as conclusões que são obtidas com o auxílio destes últimos podem também ser inferidas por meio de $\mathcal{D}$.

Como um exemplo, considere a ação *atirar* e os literais *Vivo* e $\neg$*Carregada*, e suponha $\mathcal{D} = \{\mathit{atirar}$ may cause $\neg \mathit{Vivo}$ if $\mathit{Carregada}\}$. Então o axioma de persistência condicional (1) é $\mathcal{LAPD}$-válido. Em outros termos, a persistência de *Vivo* quando $\neg$*Carregada* é verdadeiro segue da informação de dependência em $\mathcal{D}$, tornando completamente desnecessário, assim, o enunciado do axioma de persistência condicional (1).

Com a dependência aqui introduzida, define-se uma axiomática e um sistema de tableau para $\mathcal{LAPD}$, como feito em [Castilho et al., 2002]. A axiomática é adequada e completa em relação à semântica e o sistema de tableau um procedimento de decisão.

5. Conclusão

Neste trabalho, apresentamos uma nova dependência causal que combinada com a lógica de ações e planos $\mathcal{LAP}$ resulta em um poderoso formalismo para raciocínio sobre ações.

Em essência, nosso método é uma modificação do de [Castilho et al., 1999], o qual define uma relação binária entre ações e literais como forma de expressar informação causal. Em nossa abordagem, porém, consideramos uma relação ternária, com a qual obtemos descrições de domínio mais intuitivas. Nesse sentido, a dependência contextual propicia uma representação mais econômica do domínio em consideração, pois a presença de contextos estabelece uma noção causal mais informativa, eliminando a necessidade de se enunciar axiomas de persistência condicionais no conjunto de leis de ações.

Na versão integral do trabalho, definimos uma axiomática e um método de inferência para $\mathcal{LAPD}$, estabelecendo provas de adequação e completude para ambos. Analisamos vários cenários típicos em raciocínio sobre ações e também propomos dois contra-exemplos às demais abordagens propostas na literatura, tais como as de [Thielscher, 1997, Lin, 1995, McCain and Turner, 1995].

Em [Castilho et al., 2002] mostramos que com $\mathcal{LAPD}$ conseguimos tratar corretamente cenários envolvendo ações com efeitos indiretos e não-determinísticos. Até então, apenas $\mathcal{LAP}_{\leadsto}$ podia fazer o mesmo.

Referências

Castilho, M. A., Gasquet, O., and Herzig, A. (1999). Formalizing action and change in modal logic I: the frame problem. *Journal of Logic and Computation*, 9(5):701–735.

Castilho, M. A., Herzig, A., and Varzinczak, I. J. (2002). It depends on the context! a decidable logic of actions and plans based on a ternary dependence relation. In Benferhat, S. and Giunchiglia, E., editors, *Proc. of NMR'2002*, pages 343–348, Toulouse.

Finger, J. J. (1987). *Exploiting Constraints in Design Synthesis*. PhD thesis, Department of Computer Science — Stanford University, Stanford, CA.

Lin, F. (1995). Embracing causality in specifying the indirect effects of actions. In Mellish, C., editor, *Proc. of IJCAI'95*, pages 1985–1991, Montreal.

McCain, N. and Turner, H. (1995). A causal theory of ramifications and qualifications. In Mellish, C., editor, *Proc. of IJCAI'95*, pages 1978–1984, Montreal.

McCarthy, J. and Hayes, P. (1969). Some philosophical problems from the standpoint of artificial intelligence. *Machine Intelligence*, 4:463–502.

Popkorn, S. (1994). *First Steps in Modal Logic*. Cambridge University Press.

Shanahan, M. (1997). *Solving the Frame Problem: A Mathematical Investigation of the Common Sense Law of Inertia*. The MIT Press, Cambridge, MA.

Thielscher, M. (1997). Ramification and causality. *Artificial Intelligence*, 89(1–2):317–364.

Varzinczak, I. J. (2002). Causalidade e dependência em raciocínio sobre ações. Master's thesis, Depto. de Informática — Universidade Federal do Paraná, Curitiba.