Causalidade e dependência em raciocínio sobre ações

Ivan J. Varzinczak e Marcos A. Castilho

Departamento de Informática
Universidade Federal do Paraná
`{ivan,marcos}@inf.ufpr.br`
`http://www.inf.ufpr.br/~{ivan,marcos}`

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 determinada ação pode alterar o valor de verdade de um dado literal. Esta relação pode ser vista como uma noção causal fraca, noção esta considerada fundamental para raciocinar sobre ações corretamente. Neste texto, 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. Finalmente, através de exemplos clássicos da área e de outros novos aqui propostos, mostramos as vantagens de nossa abordagem em relação a outras encontradas na literatura.
Palavras-chave: Representação do conhecimento, raciocínio sobre ações, lógica modal, causalidade, relação de dependência.

1 Introdução

Uma das coisas que distingue o ser humano de uma máquina hoje é a capacidade de raciocínio, em especial quando este raciocínio envolve a realização de inferências que levam em conta a execução de ações. O tipo de inferência a que nos referimos consiste, 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 [1], estamos dentro da área conhecida como *Raciocínio Sobre Ações* [2].

Alguns desafios perseguem os pesquisadores desta área praticamente desde os primórdios da Inteligência Artificial. Estes desafios são conhecidos pelos nomes de *problema da persistência*, *problema da ramificação* e *problema da qualificação*.

O problema da persistência [3] consiste em determinar, de uma maneira econômica, que certas propriedades não mudam após a execução de uma ação. Como exemplo, ligar a televisão não altera o resultado do jogo. Este tipo de fato deve ser derivado na teoria sem que tenhamos que 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 [4] consiste em encontrar uma forma de deduzir todos os efeitos (diretos e indiretos) ocasionados por uma ação. Como exemplo, 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.

Já o problema da qualificação [5] diz respeito à necessidade de se determinar todas as pré-condições necessárias para que uma dada ação possa ser executada com sucesso. Por exemplo, para ligar a televisão é preciso ter pilha no controle remoto, ou então, temos que estar a menos de um braço de distância do aparelho.

Neste texto estaremos interessados apenas nos dois primeiros problemas. A lógica de base que aqui será utilizada é a Lógica de Ações e Planos $\mathcal{LAP}$, definida em [6].

$\mathcal{LAP}$ é uma lógica multimodal [7] simples na qual fórmulas são construídas da seguinte maneira: 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.

Dadas α uma ação e A, A' fórmulas clássicas proposicionais, lê-se $\Box\langle\alpha\rangle\top$ como "α é executável". $\Box(A' \rightarrow [\alpha]A)$ como "se A', então após α A". $\Box[\alpha]A$ é uma abreviatura para $\Box(\top \rightarrow [\alpha]A)$. Como exemplo, no cenário do tiro em Yale (YSS) [8], a fórmula $\Box(\mathit{Carregada} \rightarrow [\mathit{atirar}]\neg \mathit{Vivo})$ enuncia que, em todo mundo possível, atirar matará a vítima se a arma estiver carregada, e a fórmula $\Box(\mathit{Caminhando} \rightarrow \mathit{Vivo})$ é uma lei estática dizendo que é sempre verdade que alguém que caminha deve estar vivo.

Em $\mathcal{LAP}$, toda ação α possui a lógica do sistema K, e o operador $\Box$ a do sistema $S4$. As ações e o operador $\Box$ se relacionam pelo axioma $I(\Box, [\alpha])$, que enuncia que $\Box A \rightarrow [\alpha]A$.

Para tratar o problema da persistência, em [6] $\mathcal{LAP}$ foi acrescida de uma conexão causal fraca denotada por uma relação de dependência $\leadsto$ entre *ações* e *literais*, resultando na lógica $\mathcal{LAP}_{\leadsto}$. Naquele trabalho, foi proposto também um método de inferência adequado e completo baseado nos sistemas de tableau semânticos [9], constituindo uma solução completa para representação e realização de inferências. Com $\mathcal{LAP}_{\leadsto}$, é possível raciocinar sobre ações sem escrever todos os axiomas de persistência e de uma maneira não sujeita aos contra-exemplos que têm invalidado a maioria das abordagens na literatura.

Entretanto, apesar de não ser preciso enunciar todos os axiomas de persistência para um dado domínio, em $\mathcal{LAP}_{\leadsto}$ temos de escrever *axiomas de persistência condicionais* [6]. Como exemplo, a fórmula abaixo é necessária para tratar corretamente o YSS em $\mathcal{LAP}_{\leadsto}$:

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

Fórmulas do tipo de (1) estabelecem que se uma dada condição é verdadeira, então alguns literais persistem após a execução de uma dada ação. Sem considerar axiomas de persistência condicionais não é possível derivar as conclusões desejadas em $\mathcal{LAP}_{\leadsto}$.

Esse ponto tem constituído uma grande crítica por parte da comunidade, pois supõe-se que uma solução satisfatória para o problema da persistência não deve apresentar nenhum de tais axiomas. Pelo contrário, é desejável que informações sobre persistência estejam implícitas na descrição de domínio (apesar de geralmente se fazer isso embutindo-se tal informação em semânticas extremamente complexas, o que inviabiliza a implementação de provadores automáticos de teoremas).

Outras abordagens causais foram propostas na última década, em particular a relação de influência de Thielscher [10], o predicado *Caused* de Lin [11], as leis causais de McCain e Turner [12] e a extensão de PDL de Zhang e Foo [13]. Entretanto, há sutilezas que não são capturadas por esses formalismos sem que se enunciem informações sobre não-mudança na descrição do domínio.

Sendo assim, nós 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 $\mathcal{LAPD}$.

O presente trabalho é organizado da seguinte maneira: na seção 2, apresentamos nossa relação de dependência contextual. Na seção 3, incorporamos esta nova noção causal à lógica de base $\mathcal{LAP}$, obtendo um novo formalismo baseado em dependências, e apresentamos sua semântica. Na seção 4, mostramos porque axiomas de persistência condicionais são desnecessários em nossa abordagem. Na seção 5, aplicamos nosso formalismo a alguns cenários em raciocínio sobre ações. Finalmente, apresentamos algumas conclusões e possíveis trabalhos futuros.

2 Dependência Contextual

Apresentamos aqui uma nova relação de dependência capaz de capturar os *contextos* nos quais as ações são executadas. Definimos uma relação de dependência ternária envolvendo *ações*, *literais* e *fórmulas*[1]. Estas fórmulas caracterizarão a circunstância particular na qual 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*

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

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

$$atirar \ \mathsf{may\ cause} \ \neg\,Vivo \ \mathsf{if} \ Carregada$$

pertence à relação de dependência contextualizada.

Um ponto importante a ser destacado é o fato de a noção de dependência aqui introduzida apenas *permitir* mudança, e não necessariamente a *forçar*. Isso pode ser melhor visualizado em domínios não-determinísticos, como o cenário do peru russo [14], no qual, após atirar, a vítima pode tanto morrer como continuar viva.

Definimos $AÇ\tilde{O}ES = \{\alpha, \beta, \ldots\}$ como sendo o conjunto de *ações*, como *atirar* e *carregar*. $ATM = \{P, Q, \ldots\}$ é o conjunto de *átomos*. Exemplos de átomos são *Carregada* e *Vivo*. $LIT = ATM \cup \{\neg P : P \in ATM\}$ 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 $\mathcal{D} \subseteq AÇ\tilde{O}ES \times LIT \times FORPROP$. ■

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".

Observação 1 Contextos como disjunção aparentam ser raros. Sendo assim, conjecturamos que, na prática, a fórmula denotando o contexto C em geral será uma *conjunção* de literais. Seja como for, a expressão α may cause L if $C_1 \vee C_2$ pode ser substituída por α may cause L if C_1 e α may cause L if C_2. Portanto, podemos supor, sem perda de generalidade, que contextos são conjunções de literais.

3 Uma nova lógica de ações e planos

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

Como exemplo, considere a ação *atirar* e o literal $\neg\,Vivo$ no cenário do tiro em Yale. Neste caso, temos que a única maneira de *atirar* causar $\neg\,Vivo$ é quando *Carregada* for verdadeiro. Assim, numa circunstância em que se tenha $\neg Carregada$, a persistência de *Vivo* será garantida pela falsidade do contexto *Carregada*.

Para o mesmo cenário, 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* $\mathsf{may\ cause}$ $\neg Carregada$ 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 nos quais mudanças não intuitivas ocorrem são eliminados da seguinte maneira: suponhamos 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 $\mathsf{may\ cause}$ 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 $C \in PFOR$ tal que α $\mathsf{may\ cause}$ L if $C \in \mathcal{D}$. Então, a execução de α jamais tornará L verdadeiro, e assim L continuará sendo falso após se executar α.

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

Observação 2 No caso em que para algum $\alpha \in A\c{C}\tilde{O}ES$ e um dado $L \in LIT$ não há nenhuma expressão α $\mathsf{may\ cause}$ L if C em $\mathcal{D}$, qualquer que seja $C \in FORPROP$, essa definição também aplica, conforme esperado. A explicação é dada pelo fato de, neste caso, o antecedente da definição 2 ser verdadeiro.

Dada uma relação de dependência $\mathcal{D}$, uma fórmula A é verdadeira em um $\mathcal{LAPD}$-modelo $\mu = \langle W, \{R_\alpha : \alpha \in A\c{C}\tilde{O}ES\}, R_\Box, \tau\rangle$ 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.

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 $\alpha \in A\c{C}\tilde{O}ES$, $L \in LIT$ e $\mathcal{D}$ uma relação de dependência. Definimos

$$Pre_{\mathcal{D}}(\alpha, L) = \bigvee_{(\alpha \ \mathsf{may\ cause}\ L \ \mathsf{if}\ C) \in \mathcal{D}} C$$

■

Em outras palavras, $Pre_{\mathcal{D}}(\alpha, L)$ 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 $\models_{\mathcal{LAPD}} \Box((\neg Pre_{\mathcal{D}}(\alpha, L) \wedge \neg L) \rightarrow [\alpha]\neg L)$.

Prova: Suponha que $\Box((\neg Pre_{\mathcal{D}}(\alpha, L) \wedge \neg L) \rightarrow [\alpha]\neg L)$ seja falso, isto é, existe um mundo possível w tal que $w \models \neg Pre_{\mathcal{D}}(\alpha, L)$ 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 $\neg Pre_{\mathcal{D}}(\alpha, L)$ e $\neg L$ são verdadeiros em w. Então existe um mundo possível w' tal que $wR_\alpha w'$ e $w' \models L$. Porém, como $w \models \neg Pre_{\mathcal{D}}(\alpha, L)$, 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 $\mathcal{D} = \{atirar \text{ may cause } \neg Vivo \text{ if } Carregada\}$. 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 nova noção de dependência aqui introduzida, é possível definir uma axiomática e um sistema de tableau para $\mathcal{LAPD}$, conforme realizado em [15,16]. A axiomática é adequada e completa com relação à semântica e o sistema de tableau constitui um procedimento de decisão [16].

5 Cenários-exemplos em $\mathcal{LAPD}$

Nesta seção, apresentamos alguns exemplos de utilização de $\mathcal{LAPD}$ para modelagem e realização de inferências sobre ações. Perceba que em nenhum cenário há a necessidade de acrescentar axiomas de persistência condicionais, dado que o aspecto semântico dos mesmos é capturado implicitamente por meio da relação de dependência contextual $\mathcal{D}$.

Em todos os exemplos que seguem, *BC* representa o conjunto de observações e *LEIS* o de leis estáticas, de efeito e de executabilidade em $\mathcal{LAPD}$.

Exemplo 1 (O cenário da porta bloqueada [6]) Suponha uma porta que pode estar fechada ou bloqueada (por uma estante, por exemplo) e duas ações: *abrir*, que abre a porta se a mesma não estiver bloqueada, e *arrombar*, que sempre abre a porta incondicionalmente. Em $\mathcal{LAPD}$, este cenário é representado da seguinte maneira:

$$LEIS = \left\{ \begin{array}{l} \Box(Bloqueada \rightarrow Fechada), \\ \Box[abrir]\neg Fechada, \\ \Box[arrombar]\neg Fechada \end{array} \right\}$$

$$\mathcal{D} = \left\{ \begin{array}{c} abrir \text{ may cause } \neg Fechada \text{ if } \top, \\ arrombar \text{ may cause } \neg Fechada \text{ if } \top, \\ arrombar \text{ may cause } \neg Bloqueada \text{ if } \top \end{array} \right\}$$

$$BC = \{Fechada, Bloqueada\}$$

A partir dessa modelagem, pode-se concluir

$$\models_{\mathcal{LAPD}} (BC \wedge LEIS) \rightarrow [arrombar](\neg Fechada \wedge \neg Bloqueada),$$

o que significa que em $\mathcal{LAPD}$, assim como em $\mathcal{LAP}_{\leadsto}$, é possível derivar o efeito indireto da ação *arrombar*. Note, porém, que da mesma forma que em $\mathcal{LAP}_{\leadsto}$, temos de enunciar a dependência indireta entre *arrombar* e *Bloqueada*. Entretanto, conforme argumentado em [6], todas as abordagens que não fazem isso não conseguem resolver esse exemplo.

Outra conclusão que podemos obter com nossa abordagem é a qualificação implícita [17] da ação *abrir*, ou seja, tal ação não pode ser executada se a porta estiver bloqueada: ■

$$\models_{\mathcal{LAPD}} (BC \wedge LEIS) \rightarrow [abrir]\bot$$

Argumentamos que todas as demais abordagens presentes na literatura falham ao representar cenários envolvendo ações não-determinísticas com efeitos indiretos, como o ilustrado pelo exemplo a seguir:

Exemplo 2 (O cenário das Mailboxes [15]) Suponha que $Mbox_1$ significa “o e-mail está na mailbox 1” e que $Mbox_2$ quer dizer “o e-mail está na mailbox 2”, e considere as ações $salvar_1$ e $salvar_2$, que sempre salvam uma mensagem de e-mail em $Mbox_1$ e em $Mbox_2$, respectivamente. Suponha também que há uma ação não-determinística *salvar* que salva o e-mail em uma das duas mailboxes ou em ambas. Representamos o fato de que o e-mail está salvo em $Mbox_1$ ou em $Mbox_2$ ou em ambas pelo literal *Salvo*. A representação deste cenário em $\mathcal{LAPD}$ é a seguinte ($i = 1, 2$):

$$LEIS = \left\{ \begin{array}{l} \Box\langle salvar\rangle\top, \Box\langle salvar_i\rangle\top, \\ \Box(Salvo \leftrightarrow Mbox_1 \vee Mbox_2), \\ \Box[salvar]Salvo, \\ \Box[salvar_i]Mbox_i \end{array} \right\}$$

$$\mathcal{D} = \left\{ \begin{array}{c} salvar \ \textsf{may cause} \ Salvo \ \textsf{if} \ \top, \\ salvar \ \textsf{may cause} \ Mbox_i \ \textsf{if} \ \top, \\ salvar_i \ \textsf{may cause} \ Mbox_i \ \textsf{if} \ \top, \\ salvar_i \ \textsf{may cause} \ Salvo \ \textsf{if} \ \top \end{array} \right\}$$

$$BC = \{\neg Salvo, \neg Mbox_1, \neg Mbox_2\}$$

A partir da representação acima, pode-se concluir

$$\models_{\mathcal{LAPD}} (BC \wedge LEIS) \rightarrow [salvar](Mbox_1 \vee Mbox_2)$$

Esse último exemplo, na verdade, é problemático para todas as abordagens existentes (i.e. abordagens para tratar ações não-determinísticas com efeitos indiretos). Acreditamos que o problema seja o seguinte: se temos efeitos indiretos não-determinísticos, então

1. necessariamente temos de isentar tais efeitos do processo de minimização (no sentido de evitar interpretação exclusiva de disjunções inclusivas, cf. o clássico exemplo de lançar uma moeda no tabuleiro de xadrez[2] de Reiter);
2. como o efeito é indireto, essa isenção deve ser especificada indiretamente: mencionando o contexto no qual ela se aplica, sem mencionar, porém, a ação.

Sendo assim, é difícil garantir que nenhuma outra ação se aplica exatamente na mesma circunstância, sem o enunciado indireto explícito. Como um exemplo, na abordagem de Lin [18], para podermos obter as conclusões desejadas, somos obrigados a enunciar

$$Poss(salvar_1, s) \rightarrow Caused(Mbox_2, falso, do(salvar_1, s)),$$

o que não é intuitivo. ■

6 Conclusões e trabalhos futuros

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 [6], 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 podemos obter descrições de domínio mais intuitivas. Nesse sentido, vimos que a definição da 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.

Também esboçamos brevemente nosso método de tableau, o qual constitui um procedimento de decisão. Isso confere a nosso formalismo um maior grau de aplicabilidade prática e torna-o uma solução mais completa comparado a outras abordagens na literatura.

Fizemos ainda uma análise de cenários típicos que são boas instâncias dos problemas da persistência e da ramificação. Em nossa abordagem, podemos tratar tais problemas de maneira mais econômica que em $\mathcal{LAP}_{\leadsto}$, sem aumento de complexidade. Na verdade, abstraindo a questão de enunciar axiomas de persistência condicionais, $\mathcal{LAP}_{\leadsto}$ e $\mathcal{LAPD}$ resolvem ambas as mesmas classes de problemas.

Investigamos também o comportamento da dependência ternária em um cenário envolvendo ações com efeitos indiretos e nossa solução permite obter as conclusões desejadas. Com isso, acreditamos que nosso formalismo unifica uma solução melhor aos problemas da persistência e da ramificação com um grau maior de economia de representação [2].

[2] Do original em inglês *dropping a coin on a chessboard*.

No cenário da porta bloqueada, pudemos capturar qualificações implícitas. Entretanto, assim como em [6], tivemos de enunciar dependências indiretas em $\mathcal{D}$. Um argumento em resposta a eventuais críticas é o fato de que não existe abordagem capaz de resolver esse cenário sem enunciar explicitamente, de uma forma ou de outra, a relação entre a ação e seus efeitos indiretos — que é exatamente o que tais abordagens pretendem evitar.

Quanto a situações envolvendo não-determinismo, nosso método também se aplica, conforme mostrado no cenário das mailboxes. Nesse caso, basta enunciar em $\mathcal{D}$ as dependências corretas envolvendo uma dada ação e os literais que ela pode causar. Da mesma forma, até o presente momento, não há formalismo algum na literatura capaz de resolver esse exemplo de uma maneira melhor.

Planejamos dar seqüência a nosso trabalho estendendo nossa solução para levar em conta comunicação entre agentes. Isto pode ser feito através da abordagem em [19,20], sendo o objetivo de longo prazo a definição de uma lógica unificada para ações e crenças.

Referências

1. Mendelson, E.: Introduction to Mathematical Logic. D. Van Nostrand Company (1979)
2. Shanahan, M.: Solving the Frame Problem: A Mathematical Investigation of the Common Sense Law of Inertia. The MIT Press, Cambridge, MA (1997)
3. McCarthy, J., Hayes, P.: Some philosophical problems from the standpoint of artificial intelligence. Machine Intelligence **4** (1969) 463–502
4. Finger, J.J.: Exploiting Constraints in Design Synthesis. PhD thesis, Department of Computer Science — Stanford University, Stanford, CA (1987)
5. McCarthy, J.: Epistemological problems of artificial intelligence. In: Proc. of IJCAI'77. (1977) 1038–1044
6. Castilho, M.A., Gasquet, O., Herzig, A.: Formalizing action and change in modal logic I: the frame problem. Journal of Logic and Computation **9** (1999) 701–735
7. Popkorn, S.: First Steps in Modal Logic. Cambridge University Press (1994)
8. Hanks, S., McDermott, D.: Default reasoning, nonmonotonic logics and the frame problem. In: Proc. of AAAI'86, Philadelphia, NJ (1986) 328–333
9. Goré, R.: Tableaux methods for modal and temporal logics. In et al., M.D., ed.: Handbook of Tableaux Methods. Kluwer (1999) 297–396
10. Thielscher, M.: Computing ramifications by postprocessing. In Mellish, C., ed.: Proc. of IJCAI'95, Montreal (1995) 1994–2000
11. Lin, F.: Embracing causality in specifying the indirect effects of actions. In Mellish, C., ed.: Proc. of IJCAI'95, Montreal (1995) 1985–1991
12. McCain, N., Turner, H.: A causal theory of ramifications and qualifications. In Mellish, C., ed.: Proc. of IJCAI'95, Montreal (1995) 1978–1984
13. Zhang, D., Foo, N.Y.: EPDL: A logic for causal reasoning. In: Proc. of IJCAI'2001. (2001) 131–138
14. Sandewall, E.: Features and Fluents: the Representation of Knowledge about Dynamical Systems. Volume 1. Oxford University Press (1994)
15. Castilho, M.A., Herzig, A., Varzinczak, I.J.: It depends on the context! a decidable logic of actions and plans based on a ternary dependence relation. In Benferhat, S., Giunchiglia, E., eds.: Proc. of NMR'2002, Toulouse (2002) 343–348

16. Varzinczak, I.J.: Causalidade e dependência em raciocínio sobre ações. Master's thesis, Depto. de Informática — Universidade Federal do Paraná, Curitiba (2002)
17. Ginsberg, M.L., Smith, D.E.: Reasoning about actions II: The qualification problem. Artificial Intelligence **35** (1988) 311–342
18. Lin, F.: Embracing causality in specifying the indeterminate effects of actions. In: Proc. of AAAI'96. Volume 1. (1996) 670–676
19. Herzig, A., Lang, J., Longin, D., Polacsek, T.: A logic for planning under partial observability. In: Proc. of AAAI'2000, Austin, TX (2000)
20. Herzig, A., Lang, J., Polacsek, T.: A modal logic for epistemic tests. In: Proc. of ECAI'2000, Berlin (2000)