持続性を持つ時間論理の構成

5C-2

湯原信行、志村正道

東京工業大学

1 まえがき

時間推論を行なう際の問題点として次の三つが考えられる．一つは行為によって変化しないことがらをすべて表現する困難さ(frame problem)、もう一つは行為によって変化することがらをすべて表現する困難さ(ramification problem)、そしてもう一つは行為が遂行されるための前提条件をすべて記述することの困難さ(qualification problem)である[3]. 本論文では上の三つの問題のうち一つ目のフレーム問題に注目しそれを解決に近づけるための枠組みを提案する．さらにいわゆる射撃問題[1]がこの枠組みの中でどのように解決されるかを示す．

2 状態の持続性

ある行為の前後で状態がどのように変化するか(あるいは変化しないか)を完全に記述することは不可能に近い．その中でも変化しないことがらの数は変化することがらの数よりも圧倒的に多くその記述量を減少させることは重要な課題である．これまでの時間推論を扱う論理ではフレーム公理(frame axiom)と呼ばれる規則を組込むことによってこの問題に対処してきた[2]. これはそれらの論理が時点(time point)あるいは時区間(time interval)における状態を記述することを念頭において作られているため、行為による変化(あるいは不変化)の明示を必要とするからである．しかし行為の影響を受けて変化するのはごく一部のことがらであるということを考えると、状態は一般的に持続するとしてもなんら問題は生じない．ただし変化が明示されているときには行為の影響を考慮する必要がある．

上で述べたことを実現するために状態の持続性に関する概念を導入する.すなわち

> ある時点で成立していることが明らかになっていることがらはそれより後成立し続ける．ただし別の時点で終結が明らかになった場合はその限りではない．この場合は問題のことがらが成立していないという状態が保持される．

3 時間論理の構成

前節で述べた状態の持続性を表現するために新しい時間論理を提案する．この体系は以下のような特徴をもつ．まず、時間を表現するプリミティブとして時点(time point)を採用している．これはある時点の後に何らかの状態が保持されている様子を的確に表現するためである．次に、基本式は時間的シンボルと非時間的シンボルの組として **True(u,p)** という形で表される．このように時間に関する情報とそうでないものとを区別する手法はこれまでの時間論理の研究にも見ることができる．そして、ある時点 **u** における基本命題 **p** の真偽値すなわち **True(u,p)** の真偽値は **u** 以前の時点における **p** の真偽値によって決定される．この特徴によって状態の持続を明に表現する必要がなくなる．

持続性を持つ時間論理の統語論(syntax)と意味論(semantics)を以下に示す．

Syntax

o 諸記号を以下のように定義する．

- P: 基本命題の集合．
- TC: 時点定数の集合．
- TV: 時点変数の集合．
- U: $TC \cup TV$.
- $\preceq$: 二項関係を示す記号．

o 論理式を以下のように定義する．

- $u_1 \in U$ かつ $u_2 \in U$ ならば $u_1 = u_2$ および $u_1 \preceq u_2$ は論理式である．
- $u \in U$ かつ $p \in P$ ならば $True(u,p)$ は論理式である．
- φ_1、φ_2 が論理式ならば $\varphi_1 \wedge \varphi_2$ も論理式である．
- φ が論理式ならば $\neg\varphi$ も論理式である．
- φ が論理式で $v \in TV$ ならば $\forall v \varphi$ も論理式である．
- これらを用いて $\vee, \supset, \equiv, \exists$ が定義される．

o 述語論理の公理系を採用するが変数は時点に関するものに限定する．

o 推論規則として分離規則(modus ponens)を採用するが次の規則を新たに加える．

$$\exists t_1(((t_1 \preceq t) \wedge True(t_1,p)) \wedge \neg\exists t_2((t_1 \preceq t_2) \wedge (t_2 \preceq t) \wedge \neg True(t_2,p)))$$

が定理となるような **t** について **True(t,p)**

Temporal Logic with Persistence
Nobuyuki YUHARA, Masamichi SHIMURA
Tokyo Institute of Technology

も定理である.

Semantics

o 解釈 Iを以下のように定義する.

- TP: 時点の領域.
- M_t: 時点定数に対応する時点の集合、すなわち TP.
- M_p: 基本命題に対応する時点の集合を要素とする集合、すなわち 2^{TP}.
- $\leq$: TP上の二項関係.
- m_1: TCから M_tへの意味関数.
- m_2: pから M_pへの意味関数.
- $I = < M_t, M_p, \leq, m_1, m_2 >$.

o gを TVから TPへの変数割当関数とする.

o 解釈 Iが変数割当 gのもとで論理式 φ を満たすのは次の条件が成立するときである.ただし

$$VAL(u) = \begin{cases} m_1(u) & u \in TC \text{ のとき} \\ g(u) & u \in TV \text{ のとき} \end{cases}$$

- $I,g \models (u_1 = u_2)$ iff $VAL(u_1) = VAL(u_2)$.
- $I,g \models (u_1 \preceq u_2)$ iff $VAL(u_1) \leq VAL(u_2)$.
- $I,g \models True(u,p)$ iff
  $VAL(u) \in m_2(p)$
  または
  $VAL(u_1) < VAL(u)$ かつ $VAL(u_1) \in m_2(p)$ なる u_1 が存在し、この u_1について $VAL(u_1) < VAL(u_2) \leq VAL(u)$かつ $VAL(u_2) \notin m_2(p)$ なる u_2 が存在しない.
- $I,g \models (\varphi_1 \wedge \varphi_2)$ iff
  $I,g \models \varphi_1$ かつ $I,g \models \varphi_2$.
- $I,g \models \neg\varphi$ iff $I,g \not\models \varphi$.
- $I,g \models \forall v\varphi$ iff
  すべての $X \in TP$について $I,(X/x)g \models \varphi$, ただし $(X/x)g$は xに対する変数割当は異なるが他の変数については gと同じであるような変数割当関数.

4 射撃問題の解決

射撃問題は非単調論理の問題点を明らかにするために提出された.これまでに提案されている非単調論理では、不完全な情報を扱うために極小モデルの概念が用いられるが、極小モデルが複数個存在する場合に、それらの中から最も対象の領域に適したものを選択する方法はないとされている[1]. 持続性を持つ時間論理では上の問題が回避されることを以下に示す.

図 1に射撃問題の定義を持続性を持つ時間論理を用いて示す.このうち(4)は shootの結果 loadedが成立しなくなることを、また(5)は noiseがある限られた時間の間だけ成立することをそれぞれ示している.基本命題(ここでは loaded,shoot,noise)には持続性があるためにフレーム公理を加える必要はない.

```
True(t1,loaded)                              (1)
True(t3,shoot)                               (2)
True(t,loaded) ∧ True(t,shoot)
                 ⊃ True(t+1,noise)           (3)
True(t,shoot) ⊃ ¬ True(t+1,loaded)           (4)
True(t,noise) ⊃ ¬ True(t+1,noise)            (5)
```

図 1: 射撃問題の定義

t_1	t_2	t_3	t_4	t_5
loaded	loaded	loaded	¬loaded	¬loaded
		shoot	shoot	shoot
			noise	¬noise

図 2: 射撃問題の解

図 1の式に基づいて各時点での基本命題の真偽値を計算すると図 2のようになる. t_3まで loadedが保持され shootの結果 t_4で noiseが成立することがわかる.また t_4,t_5で¬loadedが保持されていることも明らかである.

これまでの非単調論理では、明に示されていない情報に対して適当な真偽値を割り当てることが許されていた.そのために図 1の射撃問題に対して時点 t_4で noise∨¬noiseという解しか得られなかった.それに対して持続性を持つ時間論理では、ある時点における基本命題の真偽値が過去の状態によってのみ決定され、不確定な情報にデフォルト値を与えるということをしないため、図 2の解だけが得られる. ¬True(t_4,noise)を仮定すると¬True(t_1,loaded)または¬True(t_3,shoot)が必要となり、(1)あるいは(3)との間に矛盾が生じることがわかる.

5 あとがき

本論文では変化が示されない限り真偽値を保持するという持続性の概念を基本命題に持たせることによって、行為によって変化しないことがらに対する記述量の減少が可能になることを示した.また、持続性を持つ時間論理を提案し、非単調論理の枠組みで複数個の極小モデルをうみだす原因となるフレーム公理が不必要であることを述べた上で射撃問題に対する解を与えた.

参考文献

[1] Hanks,S. and McDermott,D. Nonmonotonic Logic and Temporal Projection, *Artificial Intelligence 33*,pp.379-412.(1987)

[2] McCarthy,J.M. and Hayes,P.J. Some Philosophical Problems from the Standpoint of Artificial Intelligence, in *Machine Intelligence 4*,pp.463-502.(1969)

[3] Shoham,Y. and Goyal,N. Temporal Reasoning in Artificial Intelligence, in *Exploring Artificial Intelligence*,pp.419-438.(1988)