基于间断区间的时态知识表示*

张师超

(国家智能计算机研究开发中心,北京 100080)
(广西师范大学数学系,桂林 541004)

摘要 一般,用逻辑形式表示时态信息的方法是命题附加一个时间点或时间区间. 文[1]指出,时间区间表示单个事件带间断区间是困难的. 不过,文[1]定义两个间断区间的时态关系为一个矩阵,其计算量相当之大以至该方法不实用. 本文给出一个基于间断区间的时态知识表示模型,它将两个间断区间的时态关系分为20种,其计算量与Allen的区间演算属同一数量级.

关键词 时态推理,时态逻辑,时态知识表示,时态信息表示.

最近,时态推理及时态信息表示方面的研究已成为人工智能中一个活跃且诱人的领域. 这主要是因为时态概念在规划、自然语言理解、程序自动生成、决策等研究领域中起着一个极为重要的角色. 另一方面,时间概念是哲学、心理学、认知科学、物理学、计算机科学等必须解决的一个重要问题之一.

1983年,Allen提出区间演算的时间世界模型,它将事件的时态关系划分为13种,为进行区间的时态关系的推理奠定了基础. 尽管许多研究者看好Allen的区间演算,但该模型具有以下必须克服的3个主要弱点:时态关系的计算量大;求解时间关系一致的解的问题;表达带间断时区的事件不符合直觉性. 近年来,不少学者对Allen的区间演算模型做了一些扩充,以便改良该模型.

本文讨论Allen的区间演算的表达能力的扩展. 区间演算尽管表达能力较强,但对一些带间断时区的单个事件的表达不符合直觉性. 例如,"李平正与黄彤走象棋,一位朋友找李平,李平停下走棋来接待朋友,接待完毕后,继续走完该盘棋."若用区间演算描述"李平与黄彤走该盘棋"这个事件,需将它分成两个事件来表示. 这种将一个事件分成两个事件来描述是不符合人们的直觉的. Morris和AL—khatib针对这一问题给出了间断区间演算,它是Allen的区间演算的一个扩展,增强了Allen的区间演算的表达能力. 而两个间断区间的时态关系是用一个矩阵来刻划,因此,两个间断区间之间的可能时态关系约有$2^{13}MN$种,其中N和M分别是两个间断区间中非间断(或凸)区间的个数,这显然使得Allen的区间演算的计算量更为庞大,其实用性不强.

本文给出的基于间断区间的时态知识表示模型将Allen的13种时态关系扩展为20

* 本文1992—06—18收到,1992—09—13定稿
作者张师超,32岁,副教授,主要研究领域为时态数据库及人工智能.
本文通讯联系人:张师超,桂林 541004,广西师范大学数学系

种，其表达能力仍与 Morris 和 Al—khatib 的间断区间演算一致.

1 时态模型定义

设时间全集为 $U=[0,NOW]$，NOW 表示当前时间，并且 $\forall t_1,t_2\in U(t_1<t_2 \vee t_1=t_2 \vee t_1>t_2)$.

定义 1.1. 设 $I\subseteq U$，若 $a\leqslant b\leqslant c \wedge a\in I \wedge c\in I \rightarrow b\in I$，则称 I 为 U 上的凸区间.

凸区间在并、交、补运算下是不封闭的，所以，它不能充分模拟自然语言中的“或”、“与”、和“非”的时态关系.

定义 1.2. 设 P 是 U 上的全部凸区间组成的集合，ϕ 和 U 分别是 P 的最小和最大元素，对 P 中的任意 n 个元素 $P_1,P_2,\cdots,P_n\in P$，且 $n<+\infty$. $P_1,P_2,\cdots,P_n$ 的并称为 U 上的一个间断区间.

定义 1.3. 设 I 是 U 上的一个凸区间，则用 first(I) 和 last(I) 分别表示 I 中的最小和最大时刻.

定义 1.4. 设 μ 是 U 上的一个间断区间，$\mu=\{(i_m,j_m)|1\leqslant m\leqslant k \wedge (\forall n)(1\leqslant n<k\rightarrow j_n<i_{n+1})\wedge (i_m,j_m)$ 是凸区间$\}$，μ 的这种表达称为时态范式，并用 first(μ) 和 last(μ) 分别表示 μ 的最小和最大时刻.

设 μ 和 γ 是 U 上的间断区间，则 μ 和 γ 的并和交分别表示为 $\mu+\gamma$ 和 $\mu*\gamma$，且 μ 的补 $(U-\mu)$ 表示为 $-\mu$. 显然，它们的结果也是间断区间，而凸区间是间断区间的一个特例. 于是，我们有如下性质：

性质 1.1. 设 GI 是所有 U 上的间断区间组成的集合，且 Φ 和 U 分别是 GI 的最小和最大元素，则 GI 在 $+,*,-$ 运算下是一个布尔代数.

定义 1.5. 设 μ 为间断区间，$\mu=[\mathrm{first}(\mu),\mathrm{last}(\mu)]$ 称为 μ 的最小界限区间.

现在，我们来给出基于间断区间的时态知识表示模型：TRUE(μ,A).
其中 μ 为事件(或命题)A 发生的时间域，它是一个间断区间.

2 时态关系演算

为方便于带间断区间的事件间的时态推理，我们现在来定义两个间断区间之间的 20 种不同的关系.

设 μ 和 γ 分别是 A 和 B 事件的间断区间，且 $\mu=\{I_1,I_2,\cdots,I_n\}$，$\gamma=\{J_1,J_2,\cdots,J_m\}$. I_i 和 J_j 为凸区间，且 $\mathrm{last}(I_i)<\mathrm{first}(I_{i+1})$，$\mathrm{last}(J_j)<\mathrm{first}(J_{j+1})$，$i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,m$.

(1) μ BEFORE γ(或 $\mu<\gamma$)

$\mu<\gamma$ 当且仅当 $\mathrm{last}(\mu)<\mathrm{first}(\gamma)$

(2) μ AFTER γ(或 $\mu>\gamma$)

$\mu>\gamma$ 当且仅当 $\mathrm{last}(\gamma)<\mathrm{first}(\mu)$

(3) μ MEETS γ(或 μ m γ)

μ m γ 当且仅当 $\mathrm{last}(\mu)=\mathrm{first}(\gamma)$

(4) μ MET BY γ(或 μ mi γ)

μ mi γ 当且仅当 first$(\mu)=$last(γ)

(5) μ OVERLAPS γ(或 μ o γ)

μ o γ 当且仅当 first$(\mu)<$ first$(\gamma)<$last$(\mu)<$last$(\gamma)\wedge(\exists t)(t\in\mu\wedge t\in\gamma)$

(6) μ OVERLAPPED BY γ(或 μ oi γ)

μ oi γ 当且仅当 first$(\gamma)<$ first$(\mu)<$last$(\gamma)<$last$(\mu)\wedge(\exists t)(t\in\mu\wedge t\in\gamma)$

(7) μ FINISHES γ(或 μ f γ)

μ f γ 当且仅当 first$(\mu)>$ first$(\gamma)\wedge$last$(\mu)=$last(γ)

(8) μ FINISHED BY γ(或 μ fi γ)

μ fi γ 当且仅当 first$(\mu)<$ first$(\gamma)\wedge$last$(\mu)=$last(γ)

(9) μ DURING γ(或 μ d γ)

μ d γ 当且仅当 first$(\mu)>$ first$(\gamma)\wedge$last$(\mu)<$last$(\gamma)\wedge(\forall k)(I_k\in\mu\wedge(\exists h)(J_h\in\gamma\wedge J_h\supseteq I_k))$

(10) μ CONTAINS γ(或 μ di γ)

μ di γ 当且仅当 first$(\mu)<$ first$(\gamma)\wedge$last$(\mu)>$last$(\gamma)\wedge(\forall k)(J_k\in\gamma\wedge(\exists h)(I_h\in\mu\wedge I_h\supseteq J_k)$

(11) μ STARTS γ(或 μ s γ)

μ s γ 当且仅当 first$(\mu)=$ first$(\gamma)\wedge$last$(\mu)<$last(γ)

(12) μ STARTED BY γ(或 μsiγ)

μ si γ 当且仅当 first$(\mu)=$ first$(\gamma)\wedge$last$(\mu)>$last(γ)

(13) μ EQUALS γ(或 $\mu=\gamma$)

$\mu=\gamma$ 当且仅当 $m=n\ \wedge\ (1\leqslant k\leqslant n\wedge I_k=J_k)$

(14) μ DISJOINLY CONTAINS μ(或 μ dc γ)

μ dc γ 当且仅当$(\forall i)(1\leqslant i\leqslant m\wedge(\exists j)(1\leqslant j\leqslant n)\wedge$first$(J_i)>$last$(I_j)\wedge$last$(J_i)<$first$(I_{j+1}))$.

(15) μ DISJOINLY CONTAINED BY γ (或 μ dci γ)

μ dci γ 当且仅当$(\forall i)(1\leqslant i\leqslant n\wedge(\exists j)(1\leqslant j\leqslant m)\wedge$first$(I_i)>$last$(J_i)\wedge$last$(I_i)<$first$(J_{i+1}))$.

(16) μ DISJOINLY OVERLAPS γ (或 μ do γ)

μ do γ 当且仅当$(\forall i)((1\leqslant i\leqslant m\wedge(\exists j)(1\leqslant j\leqslant n)\wedge$first$(J_i)>$last$(I_j)\wedge$last$(J_i)<$first$(I_{j+1}))\vee((\forall j)(1\leqslant j\leqslant n)\wedge($last$(I_j)<$first$(J_i)\wedge$这种 J_i 至少有一个存在))

(17) μ DISJOINLY OVERLAPPED BY γ (或 μ doi γ)

μ doi γ 当且仅当$(\forall i)((1\leqslant i\leqslant n\wedge(\exists j)(1\leqslant j\leqslant m)\wedge$first$(I_i)>$last$(J_j)\wedge$last$(I_i)<$first$(J_{j+1}))\vee((\forall j)(1\leqslant j\leqslant m)\wedge($last$(J_j)<$first$(I_i)\wedge$这种 I_i 至少有一个存在)).

(18) μ EXTERNAL EQUALS γ(或 μ ee γ)

μ ee γ 当且仅当 $\overline{\mu}=\overline{\gamma}\wedge\mu\neq\gamma$

(19) μ EXTERNAL CONTAINS γ(或 μ ec γ)

μ ec γ 当且仅当 first $(\mu)<$first$(\gamma)\wedge$last$(\mu)>$last$(\gamma)\wedge(\exists t)(t\in\mu\wedge t\in\gamma)\wedge(\exists t)(t\in\gamma\wedge t\notin\mu)$

(20) μ EXTERNAL CONTAINED BY γ(或 μ eci γ)

μ eci γ 当且仅当 $first(\mu)>first(\gamma)\wedge last(\mu)<last(\gamma)\wedge(\exists t)(t\in\mu\wedge t\in\gamma)\wedge(\exists t)(t\in\mu\wedge t\notin\gamma)$

显然,上述定义的 20 种时态关系是完备的,这由如下定理 2.1 保证.

定理 2.1. 任何两个间断区间 μ 和 γ 的时态关系是上述 20 种关系之一.

证明:设 $\mu=\{I_1,I_2,\cdots,I_n\},\gamma=\{J_1,J_2,\cdots,j_m\}$. 我们考虑 $first(\mu)$、$last(\mu)$和 $first(\gamma)$、$last(\gamma)$间的所有可能的关系,并证明这些可能的关系均能用上面定义的 20 种时态关系刻划.

(Ⅰ) $first(\mu)=first(\gamma)\wedge last(\mu)=last(\gamma)$

如果$(\forall t)(t\in\mu\rightarrow t\in\gamma)\wedge(\forall t)(t\in\gamma\rightarrow t\in\mu)$则 $\mu=\gamma$,否则 μ ee γ;

(Ⅱ) $first(\mu)=first(\gamma)\wedge last(\mu)<last(\gamma)$

显然,μ s γ

(Ⅲ) $first(\mu)=first(\gamma)\wedge last(\mu)>last(\gamma)$

显然,μ si γ

(Ⅳ) $first(\mu)>first(\gamma)\wedge last(\mu)=last(\gamma)$

显然,μ f γ

(Ⅴ) $first(\mu)<first(\gamma)\wedge last(\mu)=last(\gamma)$

显然,μ fi γ

(Ⅵ) $first(\mu)<first(\gamma)\wedge last(\mu)<last(\gamma)$

如果 $last(\mu)<first(\gamma)$则 $\mu<\gamma$;如果 $last(\mu)=first(\gamma)$则 μ m γ;如果 $last(\mu)>first(\gamma)$则如果$(\exists t)(t\in\mu\wedge t\in\gamma)$则 μ o γ,否则 μ do γ;

(Ⅶ) $first(\mu)<first(\gamma)\wedge last(\mu)>last(\gamma)$

如果$(\forall t)(t\in\gamma\rightarrow t\in\mu)$ 则 μ di γ, 否则如果$(\forall i)(1\leqslant i\leqslant m\wedge(\exists j)(1\leqslant j\leqslant n)\wedge first(J_i)>last(I_i)\wedge last(J_i)<first(I_{i+1}))$. 则 μ dc γ,否则 μ ec γ.

(Ⅷ) $first(\mu)>first(\gamma)\wedge last(\mu)>last(\gamma)$

如果 $first(\mu)>last(\gamma)$ 则 $\mu>\gamma$;如果 $first(\mu)=last(\gamma)$则 μ mi γ;如果 $first(\mu)<last(\gamma)$则如果$(\exists t)(t\in\mu\wedge t\in\gamma)$则 μ oi γ,否则 μ doi γ;

(Ⅸ) $first(\mu)>first(\gamma)\wedge last(\mu)<last(\gamma)$

如果$(\forall t)(t\in\mu\rightarrow t\in\gamma)$ 则 μ d γ 否则如果$(\forall i)(1\leqslant i\leqslant n\wedge(\exists j)(1\leqslant j\leqslant m)\wedge first(I_i)>last(J_i)\wedge last(I_i)<first(J_{i+1}))$, 则 μ dci γ,否则 μ eci γ.

3 限制传播算法

Allen 指出,在给定各个事件之间(两两之间)的时态关系之后,利用三个区间的传递律来求解各事件均一致满足的时刻表. 例如,设 I_1,I_2 和 I_3 为三个凸区间,且 $I_1<I_2$,I_2 mi I_3,则根据传递律,I_1 和 I_3 的关系是 $I_1<I_3\vee I_1$ o $I_3\vee I_1$ m $I_3\vee I_1<I_3$. 这种限制传递方式可直接扩展到基于间断区间的时态知识表示中. 例如,设 μ_1,μ_2 和 μ_3 是三个间断区间,且 $\mu_1<\mu_2$,μ_2 mi μ_3,则 μ_1 和 μ_3 的关系是 $\mu_1<\mu_3\vee\mu_1$ o $\mu_3\vee\mu_1$ m $\mu_3\vee\mu_1$ s $\mu_3\vee\mu_1$ do $\mu_3\vee\mu_1$ dci μ_3.

尽管任何两个事件 A 和 B 间的时态关系是前面规定的 20 种之一,有时因信息量不足

而确定 A 和 B 间的时态关系为几种时态关系的“或”表达式. 如上面的 μ_1 和 μ_3 就是这种表达式. 我们有时只能说 A 和 B 间是 20 种时态关系的“或”表达式. 因此，A 和 B 间的这种可能时态关系表达式有 2^{20}种.

我们用 r 表示事件 A 和 B 间可能时态关系的集合. 若 B 与事件 C 的可能时态关系集合为 r1，则 A 与 C 的可能时态关系集合为 $r=r\otimes r1$. 其中“$\otimes$”是合成运算符. 如 μ_1 和 μ_2 间的可能时态关系集 $r=\{<\}$，μ_2 和 μ_3 间的可能时态关系集 $r=\{mi\}$，则 μ_1 和 μ_3 的可能时态关系 $r=r\otimes r1=\{<, o, m, s, do, dci\}$. 要构造限制传播算法，需要构造一个前面的 20 种时态关系中任何两个关系的合成的表 CT. 因篇幅问题本文略去 CT 表.

在现有文献中，一般用图来描述事件间的时态关系，其中图中的结点为事件或时区(本文间断区间)，边表示可能时态关系的集合. 当在图中增加一个新的结点后，一些事件间的可能时态关系集合需要根据传递律来进行修改. 这个工作是由如下限制传递算法完成.

算法 3.1：

```
R(A,B):={r};
PUT (A,B) ON QL;
WHILE QL 不空 DO
BEGIN
  GET (H,L) FROM QL
  NEW(H,L):={r&s:r∈R(H,L)∧s∈N(H,L)};
  IF NEW(H,L)≠N(H,L)
    THEN
      BEGIN
        N(H,L):=NEW(H,L);
        FOR 每个有非空 N(L,I)的结点 I DO
          BEGIN
            R(H,I):={r⊗s:r∈R(H,L)∧s∈N(H,I)};
            IF NEW(H,I)≠N(H,I)
            THEN PUT (H,I) QN QL;
          END;
        FOR 每个有非空 N(J,H)的结点 J DO
          BEGIN
            R(J,L):={r⊗s:r∈N(J,H)∧S∈N(H,L)};
            IF R(J,L)≠N(J,L)
            THEN PUT (J,H) ON QL;
          END;
      END;
END.
```

算法3.1描述一个新关系 r 被增加到图中后时态关系的修改. 其中(H,L)表示一个事件对，N(H,L)是连接 H 和 L 的边上的可能时态关系集合，R(H,L)是增加到连接 H 和 L 边上的新关系，QL 是被处理的队列.

4　结　论

本文提出的基于间断区间的时态知识表示方法是 Allen 的区间演算的一个扩展. 从算

法3.1可以看出,该方法的限制传递算法的复杂性与 Allen 的区间演算属于同一数量级,而且表达带间断区间的事件的能力与 Morris 和 Al—khatib 的间断区间演算一致.

致谢 本文部分工作在数学所访问期间完成,感谢陆汝钤先生的指导与支持!

参考文献

1 Morris R, Al—khatib L. Aninterval—based temporal relational calculus for events with gaps. Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence, 1991(3):87—107.

2 Allen J. Maintaining knowledge about temporal intervals. Commun. ACM, 1983,**26**:832—843.

INTERVAL—GAP—BASED REPRESENTATION OF TEMPORAL KNOWLEDGE

Zhang Shichao

(*National Research Center for Intelligent Computing Systems, Beijing* 100080)

(*Department of Mathematics, Guangxi Normal University, Guilin* 541004)

Abstract Generally, one way to represent temporal information in a logical formalism is by associating "proposition types" with time points or time intervals. It was pointed out that time intervals are difficult to represent the common sense notion of a single event with "gaps" in [1]. However, the temporal relations of two gap—intervals defined in [1] are expressed in a matrix. The computing amount of temporal relations is so large that the method in [1] is not useful. This paper presents a interval—gap—based representation of temporal knowledge. Its temporal relations are stipulated to 20, and its computing amount is in same level to Allen's.

Key words Temporal reasoning, temporal logic, temporal knowledge representation, temporal information representation.