

## 时态跨度的绑定问题探讨\*

左亚尧<sup>1</sup>, 舒忠梅<sup>2</sup>, 汤庸<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(广东工业大学 计算机学院, 广东 广州 510006)

<sup>2</sup>(中山大学 教育学院, 广东 广州 510275)

<sup>3</sup>(华南师范大学 计算机学院, 广东 广州 510631)

通讯作者: 舒忠梅, E-mail: issszm@mail.sysu.edu.cn

**摘要:** 时态跨度是时态应用中重要但又非常特殊的时态原语: 一则, 在不同的时态上下文中, 其语义内涵往往呈现出不确定性; 再者, 其灵活的刻画形式又表现出一些不规范性, 使得时态应用中难以有效地驾驭其序关系, 影响时态运算的精确性. 从时态跨度的序关系入手, 分析了时态跨度绑定操作的必要性, 提出了通过将时态原语和时态跨度映射到仿射空间中, 利用仿射变换构建时态跨度绑定的方法, 并实现了与时态粒点、非间断时态粒区、间断时态粒区间的绑定和运算.

**关键词:** 时态跨度; 绑定; 仿射空间

**中图法分类号:** TP181

中文引用格式: 左亚尧, 舒忠梅, 汤庸. 时态跨度的绑定问题探讨. 软件学报, 2014, 25(10): 2312-2324. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4563.htm>

英文引用格式: Zuo YY, Shu ZM, Tang Y. Research on the binding problem of temporal spans. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2014, 25(10): 2312-2324 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4563.htm>

## Research on the Binding Problem of Temporal Spans

ZUO Ya-Yao<sup>1</sup>, SHU Zhong-Mei<sup>2</sup>, TANG Yong<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(Faculty of Computer, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

<sup>2</sup>(School of Education, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

<sup>3</sup>(School of Computer Science, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Corresponding author: SHU Zhong-Mei, E-mail: issszm@mail.sysu.edu.cn

**Abstract:** Temporal span is an important and special temporal primitive in the temporal applications. On the one hand, the semantic of temporal span is often uncertain in different temporal context. On the other hand, the flexible representation of temporal span is tend to be non-normative, which results in the difficulty to handle the order relationship of temporal spans and affects the accuracy of the temporal calculation in the temporal applications. The binding conception is introduced to address these inherent issues of temporal spans. Firstly, the order relationship of temporal spans is discussed. The reasons why the uncertain relationship exists between two non-canonical temporal spans are analyzed, revealing the necessity of temporal span binding. Secondly, the affine space is explored for mapping temporal spans into the affine space. The temporal binding is constructed by the affine transformations. Therefore, the binding of temporal span with temporal point, continuous temporal interval and discontinuous temporal interval is elaborated respectively, and the operations of the temporal primitives are implemented.

**Key words:** temporal span; binding; affine space

时态跨度是时态约束<sup>[1,2]</sup>和时态知识处理<sup>[3,4]</sup>中的重要研究对象, 它既可以显式的时态原语<sup>[5]</sup>来描述, 如“1 学年”; 也可隐含于事件的语义内涵中, 如“事件  $A$  将会在事件  $B$  发生后的  $n$  个单位时间内发生”或“抗战期间”.

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61272067); 广东省自然科学基金(S2011040004281, S2013010014457)

收稿时间: 2012-08-06; 修改时间: 2013-10-30; 定稿时间: 2014-01-10

但无论显示或隐式形式描述的时态跨度,应用上都面临时态语义映射问题,因此引起了一些学者的关注.比如:文献[6]提出一种标注概率时态逻辑(annotated probabilistic temporal,简称 APT),以解决由于时态跨度的影响给命题断言所带来的概率问题;文献[7]提出了一种时间子区间最小跨度树(time-sub-interval minimum spanning tree,简称 TSMST),将每个最小跨度树与一个或多个时态区间关联,去解决时空网络中边属性随时间变化的问题;文献[8]讨论了法律条文中的时态问题,法规的效力和结论往往都与适用时的参照时态相关,如“发货后 15 天之内没有付款的客户将要支付 5%的利息”,提出一种将时态约束可满足问题整合到法律条文中的架构;文献[9]则主要针对时态数据库中时态数据的聚集运算进行研究,将时态跨度与数据之间的关系细分为恒定、易变、原子这 3 种情形来讨论,如一段时间与账户的余额之间的关系是恒定的,即,在这段时态区间内的任意子区间账户的余额是不变的,而某个星期和雇员的周工作时间(比如 40 小时)之间的关系是易变的,40 小时是雇员一周内每天工作时间的聚集,从而提出一种新的聚集操作,通过扩展多维聚集,将其应用到与时态跨度相关联的数据中.

综观上述文献,归根结底大多都与如下时态跨度所引出的两个关键问题相关:

- (1) 如何比较时态跨度间的大小(或者说序关系);
- (2) 如何进行精确的时态运算.

这也是实际的时态应用中广泛存在并亟待解决的问题.在时态应用中,有许多应用需要通过时态上下文与时态跨度间的序关系做出断言推理.比如,在医疗领域中,对于病人高烧时间的计量,就涉及多个间断时态区间以及时态跨度间的时态运算.

这关系到时态跨度与其他时态原语的绑定以及运算问题,文献[10,11]分别在 these 方面做了一些工作.文献[10]对关联事实及其时态辖域的绑定(banding/grounding/anchoring)作了研究,提出利用时态包含、对齐和继承等方法配对时间范围,解决事实隐含的时态(例如,比尔·克林顿是美国总统)与时态跨度间的关联(比尔·克林顿仅在 1993 年~2001 年期间是美国总统);文献[11]在时态跨度与时态原语间的运算方面对时态区间的比较顺序问题进行了形式化,并且提出了一种距离测量方法.

但是,上述研究并没有系统地讨论时态跨度在不同日历系统(如校历、工作日历等)、不同时间粒度约束下更为复杂的序关系及其运算.而随着计算机技术对人类生活的大尺度与纵深渗透,基于多日历系统、多粒度等形式的时态应用将越来越广泛,比如,在诊疗系统中,通过时态关系给出病人服用不同药物时间的提醒.

时态粒度是对时间全集进行离散化的一种时态划分方式,作为时态应用复杂性的源头之一,已有许多学者<sup>[12-15]</sup>对时态粒度进行了探讨.就时态跨度而言,根据时态跨度、时态内涵之间的关系,在应用系统中往往表现出如下几种复杂的情形:

- (1) 时态跨度相同但时态内涵不同,如 1 个月,具体应用中,其时态内涵可能为 28 天亦或 31 天;又如 1 学期,其时态内涵可能对应到公历系统中的 4 个月,也可能 5 个月,等等;
- (2) 时态内涵相同但是时态跨度不同,如 1 星期与 7 天;
- (3) 时态跨度与时态内涵均不同,比如“2 个月”和“60 天”.

不过,这些复杂关系都只是时态粒度及其约束的折射,其本质问题是时态跨度如何在不同的时态粒度空间进行转换运算,如何与不同的时态原语进行绑定.

因此,本文从时态跨度的序关系着手讨论,分析了时态跨度绑定运算与仿射空间中向量运算的相似性,提出将时态原语和时态跨度映射到仿射空间中,并基于仿射变换构建了时态跨度与时态上下文绑定的方法,解决了时态跨度与时态粒点、非间断时态粒区、间断时态粒区等时态原语间的绑定和运算问题.

## 1 确切时态跨度间的序关系讨论

**定义 1(时态跨度).** 时态跨度是一段独立于具体时态粒点或时态粒区<sup>[16]</sup>的、用于描述持续时间属性的时态原语,它给出了在单一或嵌套时态粒度划分下所获得的连续划分的数量 $\ell$ .当 $\ell$ 为一个唯一的确切值时,则称为确切时态跨度,记为 $\Delta t_s^{G_i}$ ,其中, $t_s = \bigcup_{g=\mu}^i G_g(X), 1 \leq \mu \leq i, G_g \in \mathcal{G}, X \in T, G_i$ 为其有效时态粒度(最细粒度)<sup>[16]</sup>.

如果 $\ell$ 可在某一范围内取值,则称为非确切时态跨度,记为 $\tilde{\ell}_s$ ,它可以由两个确切时态跨度来刻画,形如

$\vec{t}_s = [\Delta t_{s_1}^{G_i}, \Delta t_{s_2}^{G_j}]$ . 因此,非确切时态跨度在时态系统中的运算问题可以转化为确切时态跨度的问题.为免赘述,本文主要讨论确切时态跨度的问题.

由于构成确切时态跨度的时态元在语义上表征了时态粒度  $G_i$  划分下时态粒点的个数,因此,两个确切时态跨度之间不像时态粒点那样存在先后关系,而是具备包含时态粒点数量间的大小关系.

因此,任意两个确切时态跨度之间是有序的,并记为  $\Delta t_{s_1}^{G_i} \leq \Delta t_{s_2}^{G_j}$ , 如果  $\forall \Delta t_{s_1}^{G_i}, \Delta t_{s_2}^{G_j}$ , 有  $\Delta t_{s_1}^{G_i}$  的值小于或等于  $\Delta t_{s_2}^{G_j}$ , 且任意两个确切时态跨度间的大小关系“ $\leq$ ”满足以下性质:

- (1)  $\forall \Delta t_{s_1}^{G_i}, \Delta t_{s_1}^{G_i} \leq \Delta t_{s_1}^{G_i}$ , 关系“ $\leq$ ”是自反的;
- (2)  $\forall \Delta t_{s_1}^{G_i}, \Delta t_{s_2}^{G_j}$ , 若  $\Delta t_{s_1}^{G_i} \leq \Delta t_{s_2}^{G_j}$  且  $\Delta t_{s_2}^{G_j} \leq \Delta t_{s_1}^{G_i}$ , 则  $\Delta t_{s_2}^{G_j} = \Delta t_{s_1}^{G_i}$ , 关系“ $\leq$ ”是反对称的;
- (3)  $\forall \Delta t_{s_1}^{G_i}, \Delta t_{s_2}^{G_j}, \Delta t_{s_3}^{G_k}$ , 若  $\Delta t_{s_1}^{G_i} \leq \Delta t_{s_2}^{G_j}$  且  $\Delta t_{s_2}^{G_j} \leq \Delta t_{s_3}^{G_k}$ , 则  $\Delta t_{s_1}^{G_i} \leq \Delta t_{s_3}^{G_k}$ , 关系“ $\leq$ ”是传递的,

则“ $\leq$ ”是一个偏序.同时,对  $\forall \Delta t_{s_1}^{G_i}, \Delta t_{s_2}^{G_j}$ , 或者  $\Delta t_{s_1}^{G_i} \leq \Delta t_{s_2}^{G_j}$ , 或者  $\Delta t_{s_2}^{G_j} \leq \Delta t_{s_1}^{G_i}$ . 因此,“ $\leq$ ”又是一个线序关系.

不过,尽管从语义角度可知两个跨度之间存在大小关系,但是如何量化或如何判定,却是一个颇为复杂的问题.文献[17]提出可以将时态跨度映射为向量空间中的自由向量,但尚未解决时态跨度的序关系问题.

首先,如果从向量空间角度来看,则意味着两个向量之间的比较.在向量空间中,向量之间可以通过模和方向是否相同来判断两个向量是否相等,但是向量在任意时态粒度维度  $G_i$  下的投影值  $Prj_{G_i}$  与其时态粒度的值之间存在函数关系,相同的单位长度在不同的时态粒度下其值的权重并不相同.因此,如果按照求模的方式比较两个向量的大小,需要进行时态粒度转换.这不仅需要大量的计算,而且也面临时态粒度的弹性度<sup>[5]</sup>问题,从而使问题复杂化.至于其他向量比较方法,如计算余弦夹角等,也面临类似问题.

其次,由于确切时态跨度对应的向量为自由向量,加之确切时态跨度多为非规范时态元素,不满足时态粒度饱和性和平滑性约束.因此,时态粒点之间的先后关系判定的方式,即,通过比较向量  $\vec{t}_{s_1} - \vec{t}_{s_2}$  结果的有序元组  $\{(X_1 - Y_1), (X_2 - Y_2), \dots, (X_n - Y_n)\}$  的值与 0 时态元间的关系来判定  $\vec{t}_{s_1}$  与  $\vec{t}_{s_2}$  之间的大小<sup>[18]</sup>也不可行.例如,公历时态系统中,令  $\Delta t_{s_1}^{G_i} = 60G_D$  与  $\Delta t_{s_2}^{G_j} = 3G_M$  之间,完备化后对应于向量  $\vec{t}_{s_1} \{0, 0, 60, 0, 0, 0\}$  与  $\vec{t}_{s_2} \{0, 3, 0, 0, 0, 0\}$ , 则:

$$\vec{t}_{s_1} - \vec{t}_{s_2} = \{0, -3, 60, 0, 0, 0\},$$

显然不能通过第 1 个非 0 时态元 -3 而断言  $\Delta t_{s_1}^{G_i} < \Delta t_{s_2}^{G_j}$ , 或者  $\vec{t}_{s_2} - \vec{t}_{s_1} = \{0, 3, -60, 0, 0, 0\}$  而认为  $\Delta t_{s_2}^{G_j} > \Delta t_{s_1}^{G_i}$ .

再者,两个时态跨度之间的序关系也存在不确定性,不仅影响时态跨度之间的加减运算,也使得时态跨度间运算的结果呈现出不确定性.原因是:其非饱和性导致  $Prj_{G_D}(\vec{t}_{s_1} - \vec{t}_{s_2}) > \max\{|G_D|\}$ , 溢出了可比较范围.因此,只有对其规范化后才可以正确地比较两者的关系.而确切时态跨度的规范化必须依赖于实际的时态上下文,如上述问题中,如果  $60G_D$  是由平年 2 月、3 月、4 月构成,即  $28G_D + 31G_D + 1G_D$ , 有  $\Delta t_{s_1}^{G_i} = \Delta t_{s_2}^{G_j}$ ; 而如果由 3 月、4 月构成,即  $31G_D + 29G_D$ , 有  $\Delta t_{s_1}^{G_i} < \Delta t_{s_2}^{G_j}$ . 没有与时态上下文关联的两个非规范的确切时态跨度之间的关系是不定的,因此,时态跨度间明确的定性判断需要与时态上下文关联且规范化后方可完成,这一过程被称为时态绑定(具体定义参见第 2.2 节).

## 2 时态跨度与时态粒点间的运算与绑定

既然时态粒点可映射为  $V$  中与原点  $O(0, 0, \dots, 0)$  间的一个有向向量,确切时态跨度可映射为  $V$  中的自由向量<sup>[17]</sup>, 而时态粒区与非确切时态跨度又分别可由时态粒点和确切时态跨度的集合来描述,因此,所有时态原语均可以转换为向量空间  $V$  中的向量.所谓向量空间是指对向量的加减、数乘封闭的空间,显然,时态系统是封闭的.借助于向量的运算法则,可以灵活地处理时态粒点和时态跨度各自间的运算.

如前所述,时态跨度需要与上下文中的时态粒点或时态粒区关联,从空间关系来看,即需要实现点与向量之间的运算;而向量空间中讨论的对象皆视为向量,向量空间  $V$  中任意一点  $P$  被处理为向量(即,从原点  $O$  到点  $P$  之间的向量  $\vec{OP}$ )参与运算,但不能直接处理点与向量间的运算,如图 1 所示.为了加强向量空间对点的处理能力,

需要将点引入向量空间  $V$ ,这需要引入仿射空间的处理思想,即在仿射空间中完成所有时态元素的运算.

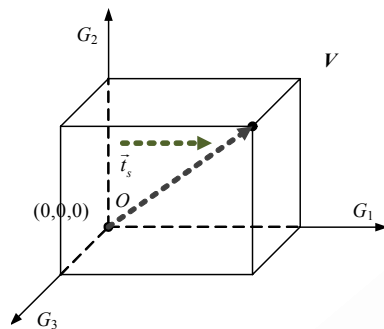


Fig.1 Representation of temporal points and temporal spans in the vector space  
图 1 时态粒点和时态跨度的向量化表示

2.1 仿射空间

定义 2(仿射空间). 仿射空间(affine space)<sup>[19,20]</sup>是将点引入到向量空间  $V$ 后形成的空间.

在仿射空间中,点可以作为独立元素,与向量一起构成其基本运算对象.作为向量和点的区别之一,向量的线性组合不依赖于基本向量,而点的线性组合依赖于具体坐标系.仿射空间在向量的基础上建立了点的减法运算,将点与向量对应起来.仿射空间中的两个有序点与向量之间都存在一一对应关系,同时,任一向量包含若干点,这奠定了点与向量运算的基础.

进一步考察时态粒点(已完备化)集合  $T_p$ 、确切时态跨度(已完备化且平滑化)的集合  $T_s$ (其中,  $T_p, T_s \subset T \subset \mathbb{N}^n$ )与基于粒度系统  $\mathcal{G}$ 建立的  $n$  维坐标空间  $\mathbb{N}^n$  三者间的关系:如果将  $\mathbb{N}^n$  复制为两份,所有的时态粒点集与第 1 个副本对应,且忽略其中的向量空间结构;第 2 个副本对应于时态跨度集,或者说是所有自由向量的集合.进而将两个副本重合,则对  $\forall a=(a_1, a_2, \dots, a_n), b=(b_1, b_2, \dots, b_n) \in T_p$ , 必定  $\exists \vec{s} = \{s_1, s_2, \dots, s_n\} \in T_s$ , 使得向量  $\Delta \vec{s}$  的起点与  $a$  重合,其终点与  $b$  重合,即,向量空间  $\mathbb{N}^n$  作用在点集  $\mathbb{N}^n$  上,可得:

$$a + \vec{s} = (a_1 + s_1, a_2 + s_2, \dots, a_n + s_n) = b \tag{1}$$

公式(1)表明: $a$  可以通过向量  $\vec{s}$  而转换为  $b$ ,即,操作  $+: \mathbb{N}^n \times \mathbb{N}^n \rightarrow \mathbb{N}^n$ .它使得对于任意两点  $a, b$ ,存在着唯一自由的向量  $\overline{ab}$ ,满足公式(2):

$$b = a + \overline{ab} \tag{2}$$

于是,一个基于时态粒点和时态跨度的  $n$  维仿射空间  $A^n$  可以描述为  $\langle T_p, \vec{T}_s, + \rangle$ ,其中,  $T_p$  为时态粒点的集合(没有结构),  $\vec{T}_s$  为作用在  $T_p$  上的时态跨度的集合,操作  $+: \mathbb{N}^n \times \mathbb{N}^n \rightarrow \mathbb{N}^n$  或  $+: T_p \times \vec{T}_s \rightarrow T_p$ ,满足以下性质.

性质 A1. 对于  $\forall t_{p_1}^{G_n} \in T_p$ , 有  $t_{p_1}^{G_n} + \vec{0} = t_{p_1}^{G_n}$ .

性质 A2. 对于  $\forall t_{p_1}^{G_n} \in T_p$  及  $\forall \Delta t_{s_1}^{G_n}, \Delta t_{s_2}^{G_n} \in \vec{T}_s$ , 有  $(t_{p_1}^{G_n} + \Delta t_{s_1}^{G_n}) + \Delta t_{s_2}^{G_n} = t_{p_1}^{G_n} + (\Delta t_{s_1}^{G_n} + \Delta t_{s_2}^{G_n})$ .

性质 A3. 对于  $\forall t_{p_1}^{G_n}, t_{p_2}^{G_n} \in T_p$ , 存在唯一的  $\Delta t_{s_1}^{G_n} \in \vec{T}_s$ , 使  $t_{p_1}^{G_n} + \Delta t_{s_1}^{G_n} = t_{p_2}^{G_n}$ .

证明:

(1) 由  $\forall t_{p_1}^{G_n} \in T_p$ , 则由  $t_{p_1}^{G_n}$  自身到自身之间构成的向量为  $\overline{t_{p_1}^{G_n} t_{p_1}^{G_n}}$ , 于是有  $\overline{t_{p_1}^{G_n} t_{p_1}^{G_n}} = \vec{0}$ , 即,  $t_{p_1}^{G_n} + \vec{0} = t_{p_1}^{G_n}$ ;

(2) 不妨令  $t_{p_1}^{G_n}, \Delta t_{s_1}^{G_n}, \Delta t_{s_2}^{G_n}$  分别对应于  $\mathbb{N}^n$  空间中的坐标  $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n), \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n\}$  和  $\{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n\}$ , 则由  $+: T_p \times \vec{T}_s \rightarrow T_p$  操作可推导出公式(3)和公式(4):

$$\begin{aligned} (t_{p_1}^{G_n} + \Delta t_{s_1}^{G_n}) + \Delta t_{s_2}^{G_n} &= ((\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) + \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n\}) + \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n\} \\ &= (\alpha_1 + \beta_1, \alpha_2 + \beta_2, \dots, \alpha_n + \beta_n) + \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n\} \\ &= (\alpha_1 + \beta_1 + \gamma_1, \alpha_2 + \beta_2 + \gamma_2, \dots, \alpha_n + \beta_n + \gamma_n) \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 t_{p_1}^{G_n} + (\Delta t_{s_1}^{G_n} + \Delta t_{s_2}^{G_n}) &= (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) + (\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n\} + \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n\}) \\
 &= (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) + \{\beta_1 + \gamma_1, \beta_2 + \gamma_2, \dots, \beta_n + \gamma_n\} \\
 &= (\alpha_1 + \beta_1 + \gamma_1, \alpha_2 + \beta_2 + \gamma_2, \dots, \alpha_n + \beta_n + \gamma_n)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

因此,  $(t_{p_1}^{G_n} + \Delta t_{s_1}^{G_n}) + \Delta t_{s_2}^{G_n} = t_{p_1}^{G_n} + (\Delta t_{s_1}^{G_n} + \Delta t_{s_2}^{G_n})$ .

(3) 由性质 A2 可知:对于  $\forall t_{p_1}^{G_n}, t_{p_2}^{G_n} \in T_p, \exists \Delta t_{s_1}^{G_n} \in \bar{T}_s$ , 使  $t_{p_1}^{G_n} + \Delta t_{s_1}^{G_n} = t_{p_2}^{G_n}$  成立. 下面证明  $\Delta t_{s_1}^{G_n}$  的唯一性.

反证法:假定  $\forall t_{p_1}^{G_n}, t_{p_2}^{G_n} \in T_p, \exists \Delta t_{s_1}^{G_n}, \Delta t_{s_2}^{G_n} \in \bar{T}_s$ , 且  $\Delta t_{s_1}^{G_n} \neq \Delta t_{s_2}^{G_n}$ , 也使  $t_{p_1}^{G_n} + \Delta t_{s_1}^{G_n} = t_{p_2}^{G_n}$  成立, 则有公式(5):

$$t_{p_1}^{G_n} + \Delta t_{s_1}^{G_n} = t_{p_1}^{G_n} + \Delta t_{s_2}^{G_n} \Rightarrow \Delta t_{s_1}^{G_n} = \Delta t_{s_2}^{G_n} \tag{5}$$

与假设矛盾, 唯一性得证. □

对于性质 A3, 满足  $t_{p_1}^{G_n} + \Delta t_{s_1}^{G_n} = t_{p_2}^{G_n}$  条件的唯一向量  $\Delta t_{s_1}^{G_n} \in \bar{T}_s$  可表示为  $\overline{t_{p_1}^{G_n} t_{p_2}^{G_n}}$  或  $t_{p_2}^{G_n} - t_{p_1}^{G_n}$ , 因此有:

$$t_{p_2}^{G_n} = t_{p_1}^{G_n} + \overline{t_{p_1}^{G_n} t_{p_2}^{G_n}} \text{ 或 } t_{p_2}^{G_n} = t_{p_1}^{G_n} + (t_{p_2}^{G_n} - t_{p_1}^{G_n}).$$

直观上, 性质 A1 和性质 A2 表明  $\bar{T}_s$  作用在  $T_p$  上, 得到一个新的点, 可以将时态粒点  $t_{p_2}^{G_n}$  视为  $t_{p_1}^{G_n}$  移动  $\bar{T}_s$  的元素(时态跨度)个时间因子后的位置; 性质 A3 进一步表明,  $\bar{T}_s$  作用在  $T_p$  上的向量具有唯一性.

**定义 3(仿射变换).** 这种将自由向量  $\Delta t_s^{G_n} \in \bar{T}_s$  施加到点  $t_{p_1}^{G_n} \in T_p$  上, 即为仿射变换(affine transformation)<sup>[20]</sup>.

对于每一个  $\Delta t_s^{G_n} \in \bar{T}_s$ , 其作用是将每个时态粒点  $t_{p_1}^{G_n} \in T_p$  “移动”到时态粒点  $t_{p_1}^{G_n} + \Delta t_s^{G_n} \in T_p$ ; 而且, 仿射变换可以进行复合运算. 对  $\forall t_{p_1}^{G_n} \in T_p$ , 考察:

- 从  $\bar{T}_s$  到  $T_p$  的映射  $\zeta: \Delta t_{s_1}^{G_n} \mapsto t_{p_1}^{G_n} + \Delta t_{s_1}^{G_n}, \Delta t_{s_1}^{G_n} \in \bar{T}_s$ ;
- 从  $T_p$  到  $\bar{T}_s$  的映射  $\zeta: t_{p_2}^{G_n} \mapsto \overline{t_{p_1}^{G_n} t_{p_2}^{G_n}}, t_{p_2}^{G_n} \in T_p$ ,

则有:

- 映射  $\delta$  与  $\zeta$  的复合映射  $\zeta \circ \delta: \Delta t_{s_1}^{G_n} \mapsto t_{p_1}^{G_n} + \Delta t_{s_1}^{G_n} \mapsto \overline{t_{p_1}^{G_n} (t_{p_1}^{G_n} + \Delta t_{s_1}^{G_n})}$ , 由性质 A3 得  $\Delta t_{s_1}^{G_n}$ ;
- 映射  $\zeta$  与  $\delta$  的复合映射  $\delta \circ \zeta: t_{p_2}^{G_n} \mapsto \overline{t_{p_1}^{G_n} t_{p_2}^{G_n}} \mapsto t_{p_1}^{G_n} + \overline{t_{p_1}^{G_n} t_{p_2}^{G_n}}$ , 由性质 A3 得  $t_{p_2}^{G_n}$ .

因此, 这两个复合映射分别为  $\bar{T}_s$  到  $\bar{T}_s$  的恒等映射和  $T_p$  到  $T_p$  的恒等映射, 且它们都是双射.

过空间任一点  $O$  引  $n$  个不共面的单位向量  $\vec{g}_i, i=1, 2, \dots, n$ , 任意两个向量间具有夹角:

$$\angle(\vec{g}_1, \vec{g}_2) = \theta_{12}, \angle(\vec{g}_2, \vec{g}_3) = \theta_{23}, \dots, \angle(\vec{g}_i, \vec{g}_j) = \theta_{ij}, i, j = 1, 2, \dots, n.$$

分别以  $\vec{g}_i$  的方向为正方向建立坐标轴, 则可以基于粒度系统  $\mathcal{G}$  建立仿射空间坐标系  $O-g_i, G_i$  之间不一定正交. 但为了减少向量线性变换(linear transformation)和点仿射变换的复杂度和计算量, 取  $\theta_{12} = \theta_{23} = \dots = \theta_{ij} = 90^\circ$ , 即, 令该仿射坐标系为直角坐标系, 可以直接使用向量空间的许多性质和计算方法. 而为了简化转换运算的复杂度, 本文仅考虑在正交空间做“平移”仿射变换, 如公式(6), 即, 点  $(x, y) \rightarrow (x', y')$ , 其中,  $x' = x + tx, y' = y + ty$ .

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & tx \\ 0 & 1 & ty \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \tag{6}$$

### 2.2 时态粒点与时态跨度的加减

在仿射空间中, 两点之间差的结果为一向量, 点与向量做加法将得到另一个点, 但是点与点之间不可以做加法. 这与时态粒点与时态跨度间的关系极为相似, 两个时态粒点之间差的结果为一向量, 时态粒点与时态跨度做加法将得到另一个时态粒点, 但两个时态粒点之间不可以做加法. 因此, 可将仿射空间引入到时态粒度系统中来, 以解决时态粒点与时态跨度间的复杂运算及绑定映射问题.

**定义 4(时态绑定).** 时态绑定也可简称绑定, 是指在仿射空间  $A_r^n$  中, 将确切时态跨度  $\Delta t_s^{G_i}$  所对应的自由向量  $\vec{s}$  与一个或多个时态粒点  $t_{p_1}^{G_i}, t_{p_2}^{G_i}, \dots$  所对应的空间点  $P_1, P_2, \dots$  重叠, 并使向量  $\vec{s}$  的模保持不变或者与任意两点

$P_1, P_2$  间的欧式空间距离相一致的过程。

直观上而言,时态绑定就是将自由向量与空间中某一确切点关联,使得向量的位置随点位置的改变而“移动”。根据时态原语的类型,时态跨度与其绑定问题可以转化为时态跨度与时态粒点、非间断时态粒区以及间断时态粒区这 3 种具体形式。

从定义 4 可知,时态粒点与时态跨度的绑定就是仿射空间  $A_T^n$  中点  $P$  与  $\Delta S$  间的加减运算。为叙述方便,不妨记为  $\Psi_{t_p^{G_i}}(\Delta t_s^{G_j})$ ,并用  $\Psi_p^-(\Delta t_s^{G_j})$  表示做减法绑定,  $\Psi_p^+(\Delta t_s^{G_j})$  表示做加法绑定。

由仿射空间的运算规则可知,时态跨度与时态粒点运算的结果为仿射空间  $A_T^n$  中一个不与  $P$  点重合的点  $Q$ ,令该点对应时态粒点  $t_q^{G_i}$ ,则有  $\Psi_{t_p^{G_i}}^-(\Delta t_s^{G_j}) = [t_q^{G_i}, t_p^{G_i}]$ ,  $\Psi_{t_p^{G_i}}^+(\Delta t_s^{G_j}) = [t_p^{G_i}, t_q^{G_i}]$ 。因此,绑定后的时态跨度对应于一个时态粒区  $I$ ,且跨度值与时态跨度  $I$  的自然模  $\|I\|$  相等。

考察任意一个时态粒点  $t_p^{G_i}$  以及任意一个确切时态跨度  $\Delta t_s^{G_j}$ ,其中,

- $t_p = \bigoplus_{g=1}^i G_g(X), G_g \in \mathcal{G}, \mathcal{G}'_p = \{G_g \mid G_g \in \mathcal{G}\}$ ;
- $t_s = \bigoplus_{g=\mu}^j G_g(X), 1 \leq \mu \leq j, G_g \in \mathcal{G}, X \in T, \mathcal{G}'_s = \{G_g \mid G_g \in \mathcal{G}\}$ ,

且令  $G_p^\alpha = \inf\{\mathcal{G}'_p\}, G_p^\beta = \sup\{\mathcal{G}'_p\}, G_s^\alpha = \inf\{\mathcal{G}'_s\}, G_s^\beta = \sup\{\mathcal{G}'_s\}$ 。

那么,时态粒点  $t_p^{G_i}$  与确切时态跨度  $\Delta t_s^{G_j}$  做加减运算的前提是  $G_p^\beta \leq G_s^\beta$  或者  $G_p^\beta = G_s^\beta$ ,即:时态粒点的最细粒度必须细于时态跨度的最细粒度,否则,尽管可以做数量上的运算,但结果可能是无明确时态语义的值。因此,基于这一前提,也可以进一步简记  $\Psi_{t_p^{G_i}}(\Delta t_s^{G_j})$  为  $\Psi_{t_p^{G_i}}(\Delta s)$ ,即,忽略时态跨度的粒度约束。

如果  $G_p^\beta \leq G_s^\beta$  或者  $G_p^\beta = G_s^\beta$ ,则分别逐一取在其粒度集下的所有值,并作完备化与平滑化处理,则它们可映射为仿射空间  $A_T^n$  中的点  $P$  和向量  $\vec{S}$ 。令点  $P$  的坐标为  $(p_1, p_2, \dots, p_n)$ ,而向量  $\vec{S}$  的坐标为  $\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ ,则由仿射空间点与向量的关系,时态粒点与确切时态跨度的加减结果如公式(7)所示:

$$P \pm \vec{S} = (p_1, p_2, \dots, p_n) \pm \{s_1, s_2, \dots, s_n\} = (p_1 \pm s_1, p_2 \pm s_2, \dots, p_n \pm s_n) = Q, Q \in T_p \quad (7)$$

不过,在时态系统中,还需要根据时态元素的规范约束以及时间因子的取值情形做出不同的处理,假使  $(p_i \pm s_i) \in [a, b], a, b \in \mathbb{Z}, 1 \leq i \leq n$ ,当  $0 \leq a, b \leq |G_i|$  时,  $Q$  为一规范有效时态粒点;当  $b > |G_i|$  或者  $a < 0$  时,  $Q$  为一非饱和平滑化有效时态粒点,需要作规范化处理。

如果  $G_p^\beta > G_s^\beta$ ,则必须先对时态粒点  $t_p^{G_i}$  作  $\triangleright_p$  运算<sup>[16]</sup>:  $\triangleright_p(t_p^{G_i}, G_s^\beta)$ 。由于  $\triangleright_p$  运算将产生蕴含时态粒点集合,对应为时态粒区与确切时态跨度的运算,不妨设  $\triangleright_p(t_p^{G_i}, G_s^\beta) = [I_p^-, I_p^+]$ ,则  $t_p^{G_i}$  与  $\Delta t_s^{G_j}$  的加减运算转换为  $[I_p^-, I_p^+]$  与  $\Delta t_s^{G_j}$  间的运算:  $P \pm \vec{S} \Rightarrow [I_p^-, I_p^+] \pm \Delta t_s^{G_j} \Rightarrow [I_p^- \pm \vec{S}, I_p^+ \pm \vec{S}]$ 。

同样,时态粒点与非确切时态跨度也可以施以加减运算,其结果将为时态粒区。

令  $t_p^{G_i}$  为任意一个时态粒点,且令非确切时态跨度  $\tilde{I}_s = [\Delta t_{s_1}^{G_i}, \Delta t_{s_2}^{G_j}]$ ,其中,

- $t_p = \bigoplus_{g=1}^i G_g(X), G_g \in \mathcal{G}$ ;
- $t_{s_1} = \bigoplus_{g=\mu}^i G_g(X), 1 \leq \mu \leq i, G_g \in \mathcal{G}, X \in T$ ;
- $t_{s_2} = \bigoplus_{g=\mu}^j G_g(X), 1 \leq \mu \leq j, G_g \in \mathcal{G}, X \in T$ 。

现分别逐一取在其粒度集下的所有值,并作完备化与平滑化处理,则  $t_p^{G_i}, \Delta t_{s_1}^{G_i}, \Delta t_{s_2}^{G_j}$  可分别映射为仿射空间  $A_T^n$  中的点  $P$  和向量  $\vec{S}_1$  及  $\vec{S}_2$ 。令点  $P$  的坐标为  $(p_1, p_2, \dots, p_n)$ ,而向量  $\vec{S}_1$  的坐标为  $\{s_{11}, s_{12}, \dots, s_{1n}\}$ ,向量  $\vec{S}_2$  的坐标为  $\{s_{21}, s_{22}, \dots, s_{2n}\}$ ,则:

$$\begin{aligned}
P + \tilde{I}_s &= [P, P] + [\tilde{S}_1, \tilde{S}_2] = [P + \tilde{S}_1, P + \tilde{S}_2] \\
&= [(p_1, p_2, \dots, p_n) + \{s_{11}, s_{12}, \dots, s_{1n}\}, (p_1, p_2, \dots, p_n) + \{s_{21}, s_{22}, \dots, s_{2n}\}] \\
&= [(p_1 + s_{11}, p_2 + s_{12}, \dots, p_n + s_{1n}), (p_1 + s_{21}, p_2 + s_{22}, \dots, p_n + s_{2n})] \\
&= [Q_1, Q_2], Q_1, Q_2 \in T_p
\end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
P - \tilde{I}_s &= [P, P] - [\tilde{S}_1, \tilde{S}_2] = [P - \tilde{S}_2, P - \tilde{S}_1] \\
&= [(p_1, p_2, \dots, p_n) - \{s_{21}, s_{22}, \dots, s_{2n}\}, (p_1, p_2, \dots, p_n) - \{s_{11}, s_{12}, \dots, s_{1n}\}] \\
&= [(p_1 - s_{21}, p_2 - s_{22}, \dots, p_n - s_{2n}), (p_1 - s_{11}, p_2 - s_{12}, \dots, p_n - s_{1n})] \\
&= [Q_3, Q_4], Q_3, Q_4 \in T_p
\end{aligned} \tag{9}$$

其结果为时态粒区,并且对于构成时态粒区的时态粒点 $\{Q_i | i=1,2,3,4\}$ ,也需要根据时态元素的规范约束以及时间因子的取值情形做出不同的处理.

进而,由仿射空间的性质A2以及时态跨度加减的交换律和结合律,则时态粒点还可以通过类似的方式与多个时态跨度之间进行加减运算.

### 3 时态跨度与非间断时态粒区的运算与绑定

不仅时态跨度与时态粒点之间存在算术运算及绑定关系,时态粒区作为时态粒点的集合,也可以与时态跨度之间做类似运算.但由于时态粒区属于集合的范畴,具有比时态粒点更丰富的时态语义和时态约束,使得时态跨度与其之间的时态绑定及算术运算不再统一,而是各自有独立的方法.

#### 3.1 时态跨度与时态粒区的加减运算

时态粒区实质上是可列个有序时态粒点的集合,即:对于任意时态粒区 $I, I = [t_{p_1}^{G_i}, t_{p_2}^{G_i}] = [I^-, I^+]$ ,其中,

$$t_{p_1} = \bigcup_{g=1}^i G_g(X_{p_1}), t_{p_2} = \bigcup_{g=1}^i G_g(X_{p_2}), G_g \in \mathcal{G}, \mathcal{G}' = \{G_g | G_g \in \mathcal{G}\},$$

有 $\forall t_p^{G_i} \in I$ , 则时态上满足先后关系: $I^- < t_p^{G_i} < I^+$ . 令任意确切时态跨度 $\Delta t_s^{G_j}$ , 其中,

$$t_s = \bigcup_{g=\mu}^j G_g(X), 1 \leq \mu \leq j, G_g \in \mathcal{G}, X \in T, \mathcal{G}' = \{G_g | G_g \in \mathcal{G}\},$$

且令 $G_p^\alpha = \inf\{\mathcal{G}'_p\}, G_p^\beta = \sup\{\mathcal{G}'_p\}, G_s^\alpha = \inf\{\mathcal{G}'_s\}, G_s^\beta = \sup\{\mathcal{G}'_s\}$ .

那么时态粒区 $I$ 与确切时态跨度 $\Delta t_s^{G_j}$ 的加减运算可转换为时态跨度与时态粒区的端点间的加减运算.同样,其运算的前提是 $G_p^\beta \leq G_s^\beta$ 或者 $G_p^\beta = G_s^\beta$ . 运算结果为一异于 $I$ 的时态粒区 $I_\alpha$ :

- 当 $G_p^\beta \leq G_s^\beta$ 或者 $G_p^\beta = G_s^\beta$ 时,时态粒区 $I$ 与确切时态跨度 $\Delta t_s^{G_j}$ 的加减运算结果如公式(10)所示:

$$I \pm \Delta t_s^{G_j} = [t_{p_1}^{G_i} \pm \Delta t_s^{G_j}, t_{p_2}^{G_i} \pm \Delta t_s^{G_j}] = I_\alpha \tag{10}$$

- 当 $G_s^\beta \leq G_p^\beta$ 时,则必须先对时态粒区 $I$ 做 $\triangleright_I$ 运算,得到一个蕴含时态粒区:

$$\triangleright_I(I, G_s^\beta) = [\min\{t_{p_m}^{G_i} | 0 \leq m \leq G_{j-1}\}, \max\{t_{p_n}^{G_i} | 0 \leq n \leq G_{j-1}\}],$$

则 $I$ 与 $\Delta t_s^{G_j}$ 的加减运算结果如公式(11)所示:

$$I \pm \Delta t_s^{G_j} = [(\min\{t_{p_m}^{G_i} | 0 \leq m \leq G_{j-1}\} \pm \Delta t_s^{G_j}), (\max\{t_{p_n}^{G_i} | 0 \leq n \leq G_{j-1}\} \pm \Delta t_s^{G_j})] = I_\alpha \tag{11}$$

#### 3.2 时态跨度与时态粒区的绑定

时态跨度不仅可以与时态粒点绑定,也可以与时态粒区进行动态绑定.既然时态粒区 $I=[I^-, I^+]$ 是时态粒点的集合表示,而 $\forall t_p^{G_i} \in I$ 又可通过仿射空间 $\mathcal{A}_p^r$ 中点与向量间的加减运算实现时态跨度 $\Delta s^{G_j}$ 的绑定操作,结果为一个不等于 $t_p^{G_i}$ 的时态粒点 $t_q^{G_i}$ .如果满足 $I^- \leq_{G_i} t_q^{G_i} \leq_{G_i} I^+$ ,称为时态跨度 $\Delta s^{G_j}$ 关于时态粒点 $t_p^{G_i}$ 的时态粒区 $I$ 绑定,记为 $\Psi_{t_p^{G_i}}^I(\Delta s^{G_j})$ ;并记 $\Psi_{t_p^{G_i}}^{I^+}(\Delta s^{G_j})$ 为时态跨度 $\Delta s^{G_j}$ 与时态粒区 $I$ 关于时态粒点 $t_p^{G_i}$ 的加法绑定,而 $\Psi_{t_p^{G_i}}^{I^-}(\Delta s^{G_j})$ 则表示与时态粒区 $I$ 的减法绑定.

同样,也有  $\psi_{G_x}(\Psi_{t_p^{G_i}}^{I^+}(\Delta t_s^{G_j}))$  或  $\psi_{G_x}(\Psi_{t_p^{G_i}}^{I^-}(\Delta t_s^{G_j}))$  表示时态跨度与  $t_p^{G_i}$  绑定后,在  $G_x$  粒度下的划分数量.特别地,当  $G_x$  为  $I$  的最细粒度时,其值等于时态粒区  $\Psi_{t_p^{G_i}}^{I^+}(\Delta t_s^{G_j})$  或  $\Psi_{t_p^{G_i}}^{I^-}(\Delta t_s^{G_j})$  的自然模 $\|\cdot\|$ .

**定理 1.** 对于  $\forall G_x \in \mathcal{G}$ , 均有  $\psi_{G_x}(\Psi_{t_p^{G_i}}^I(\Delta t_s^{G_j})) \leq \|I\|_{G_x}$  成立.

证明:反证法.

假使  $\psi_{G_x}(\Psi_{t_p^{G_i}}^I(\Delta t_s^{G_j})) > \|I\|_{G_x}$ .

不妨令  $\Psi_{t_p^{G_i}}^I(\Delta t_s^{G_j}) = [t_p^{G_i}, t_q^{G_i}]$ , 则有不等式  $\psi_{G_x}(\Psi_{t_p^{G_i}}^I(\Delta t_s^{G_j})) > \|I\|_{G_x}$  成立.

由于  $t_p^{G_i} \in I$ , 因此必有  $t_q^{G_i} \notin I$ , 且满足  $t_q^{G_i} \leq_{G_i} I^-$  或  $I^+ \leq_{G_i} t_q^{G_i}$ . 与时态粒区绑定的定义矛盾, 因此假设不成立, 原命题得证.  $\square$

由定理 1 可知: 当关于不同的时态粒点  $t_p^{G_i}$  实施时态粒区  $I$  的绑定时, 可形成不同的时态粒区绑定  $\Psi_{t_p^{G_i}}^I(\Delta t_s^{G_j})$ , 并与时态粒区  $I$  之间构成如图 2 所示的 4 种时态关系.



Fig.2 Binding of temporal span and temporal interval and their temporal relationships

图 2 时态跨度与时态粒区的绑定及其时态关系

从图 2 中时态跨度与时态粒区的绑定及其时态关系可知: 时态粒区的长度或称时态粒区的值是一个弹性长度, 以适应时态粒区到跨度的映射. 即: 时态粒区在时态粒度约束下的减法运算结果可以为一个区间, 这往往发生在以比时态粒区更细的时态粒度进行减法运算时.

#### 4 时态跨度与间断时态粒区的绑定

在实际的时态应用系统中, 有许多应用需要通过间断时态粒区与时态跨度的绑定关系进行断言推理. 比如医疗领域中对于病人高烧时间的计量, 通常情形下, 病人并非持续不断地处于高烧状态, 需要在某个时态粒区范围内, 由多个间断时态粒区与作为判定阈值的时态跨度间进行时态绑定. 同时, 由于多个间断时态粒区之间存在时态粒点或时态粒区间隙, 因而难以对多个间断时态粒区与时态跨度之间进行算术运算, 但是利用时态绑定方法将能有效地解决该问题.

##### 4.1 时态跨度的类型转换

对于任意的时态跨度  $\Delta t_s^{G_j}$ , 从构成时态跨度的时态元与时态粒度的组合而言, 时态跨度可以分为两类:

- 一类是简单型时态跨度, 形如:  $t_s = G_x(X), X \in T$ , 即, 由单一粒度和单一的时态元构成, 它描述了在  $G_x$  下的划分数量;
- 另一类是嵌套型时态跨度, 形如  $t_s = \cup_{g=\mu}^j G_g(X), 1 \leq \mu \leq j, G_g \in \mathcal{G}, X \in T$ , 即, 由多级时态粒度的嵌套划分和对应时态粒度下的划分数量构成.

利用时态粒度的度关系, 任意确切时态跨度  $\Delta t_s^{G_j}$  可以作时态粒度  $G_x$  的转换. 当构成时态跨度  $\Delta t_s^{G_j}$  的时态粒度集合  $\mathcal{G}_s$  均为刚性粒度时, 可以实现不同时态粒度下的精确转换, 转换结果  $\Delta t_s^{G_x}$  为时态粒度  $G_x$  下的确切时态跨度. 当构成时态跨度的时态粒度集合  $\mathcal{G}_s$  中包含弹性粒度时, 则其转换结果往往表征为另一时态粒度下的确切时态跨度集合, 也即, 确切时态跨度可以转换为非确切时态跨度, 属于粗糙转换.

考虑到转换的一般性, 将所有的时态粒度均表示为弹性跨度形式, 即: 任意时态粒度  $G_i$ , 其度  $|G_i|$  的具体值属



于区间 $[\mathcal{L}(|G_i|), \mathcal{U}(|G_i|)]$ ,其中, $\mathcal{L}(|G_i|)$ 代表度值集合中的最小值, $\mathcal{U}(|G_i|)$ 表示度值集合中的最大值.对所有时态跨度作时态粒度的粗糙转换,记为 $\rightsquigarrow (\Delta t_s^{G_x})$ ,并视刚性粒度为 $\mathcal{L}(|G_i|)=\mathcal{U}(|G_i|)$ 下的特例.确切时态跨度的时态粒度转换方式与时态粒点的粒度转换过程较为相似,不过,这两种时间元素的语义截然不同.

与时态粒点的缩小与放大操作类似,依据时态粒度的转换方向,确切时态跨度也有如下两种转换形式.

(1) 由细粒度向粗粒度转换,可以将简单型转换为嵌套型时态跨度,以示区别,记为 $\rightsquigarrow_N (\Delta t_s^{G_x})$ ,比如:

$$\rightsquigarrow_N(40G_D)=[1G_M9G_D,1G_M12G_D];$$

(2) 由粗粒度向细粒度转换,可以将嵌套型时态跨度转换为简单型时态跨度,记为 $\rightsquigarrow_S (\Delta t_s^{G_x})$ ,比如:

$$\rightsquigarrow_S(3G_M20G_D)=[104G_D,113G_D].$$

考察任一确切时态跨度 $\Delta t_s^{G_j}$ ,其中, $t_s = \bigoplus_{g=\mu}^j G_g(X), 1 \leq \mu \leq j, G_g \in \mathcal{G}, X \in T, \mathcal{G}' = \{G_g | G_g \in \mathcal{G}\}$ ,对其进行时态粒度转换后可形成一个非确切时态跨度 $[\Delta t_{s_\alpha}^{G_x}, \Delta t_{s_\beta}^{G_x}]$ .注意,由于转换仅仅改变时态跨度的类型,而不是任意粒度下的转换,因此转换后,其最小时态粒度依然为 $G_j$ .

(1) 嵌套型时态跨度转换为简单型时态跨度,即,从时态粗粒度向时态细粒度方向的转换.

$$\begin{aligned} t_{s_\alpha} &= G_x(X_\alpha), X_\alpha = \min \left\{ \sum_{g=\mu}^x \xi_{g \rightarrow x}(t_s^{G_x}) \right\} = \sum_{g=\mu}^x \mathcal{L}(|G_g|^{x-g}) \times G_g(X), \\ t_{s_\beta} &= G_x(X_\beta), X_\beta = \max \left\{ \sum_{g=\mu}^x \xi_{g \rightarrow x}(t_s^{G_x}) \right\} = \sum_{g=\mu}^x \mathcal{U}(|G_g|^{x-g}) \times G_g(X) \end{aligned} \tag{12}$$

(2) 简单型时态跨度向嵌套型时态跨度转换,即,从时态细粒度向时态粗粒度方向的转换.

$$\begin{aligned} t_{s_\alpha} &= G_x(X_\alpha), X_\alpha = \min \left\{ \sum_{g=\mu}^x \xi_{g \rightarrow x}(t_s^{G_x}) \right\} = \sum_{g=\mu}^x \mathcal{L}(|G_g|^{x-g}) \times G_g(X), \\ t_{s_\beta} &= G_x(X_\beta), X_\beta = \max \left\{ \sum_{g=\mu}^x \xi_{g \rightarrow x}(t_s^{G_x}) \right\} = \sum_{g=\mu}^x \mathcal{U}(|G_g|^{x-g}) \times G_g(X) \end{aligned} \tag{13}$$

#### 4.2 简单型时态跨度与间断时态粒区的绑定

对于时态粒点和非间断时态粒区而言,借助于仿射空间转换,时态跨度的构成形式并不会对绑定的方式及结果产生影响.但与间断时态粒区的绑定则不然,由于单一的非间断时态粒区之间的有效时态粒度可能互异,尽管在每个单一的时态粒区内的绑定可以实现时态跨度的时态粒度转换,不过在所有间断时态粒区的集合上却不能实现时态跨度的转换.因此,对于间断时态粒区的绑定,又要从时态跨度的构成形式上分两种情形来探讨.

1) 简单型时态跨度

考察时态跨度 $\Delta t_s^{G_x}, t_s = G_x(X)$ ,时态粒区 $I = [I^-, I^+]$ 以及任意 $n$ 个间断时态粒区 $I_i = [I_i^-, I_i^+]$ ,满足:

- (1)  $I_1 \cap_{G_x} I_2 \cap_{G_x} \dots \cap_{G_x} I_n = \emptyset$ ;
- (2)  $B_{G_x}(I_i, I_{i+1}), 1 \leq i, i+1 \leq n$ ;
- (3)  $D_{G_x}(I_i, I), 1 \leq i \leq n$ ;
- (4)  $\|I_1\|_{G_x} + \|I_2\|_{G_x} + \dots + \|I_n\|_{G_x} < \|I\|_{G_x}$ ;
- (5)  $\|I_i\|_{G_x} < \Delta t_s^{G_x}, 1 \leq i \leq n$ ;
- (6)  $\|I_1\|_{G_x} + \|I_2\|_{G_x} + \dots + \|I_n\|_{G_x} = \Delta t_s^{G_x}$ ;

则时态跨度 $\Delta t_s^{G_x}$ 可与间断时态粒区 $I_i$ 间绑定,称为时态跨度与间断时态粒区 $I_i$ 间的复合时态绑定,如图3所示,记为 $\Psi_{I_i}^I(\Delta t_s^{G_x})$ ,其中,符号“+”仅表明绑定的方向,也可以为“-”.而上述条件(6)也可表达为等式:

$$\Delta t_s^{G_x} = \psi(\Psi_{I_i}^I(\Delta t_s^{G_x})) = \sum_{i=1}^n \|I_i\|_{G_x}, 1 \leq i \leq n \tag{14}$$

2) 嵌套型时态跨度

对于嵌套型时态跨度,其包含了不同时态粒度下的时态元,作为绑定要件,需要处理时态粒区的模与时态跨度的数量关系.而不同的间断时态粒区之间,其有效时态粒度可能不同,且受弹性时态粒区的影响,混合时间粒度下,多个间断时态粒区之间的自然模不能与时态跨度间转换和运算.因此,嵌套型时态粒区首先要借助时态粒

度间的度关系转换为简单型时态跨度.由任意时态粒度  $G_{i-1}, G_i, G_{i+1}$  之间的度的数学关系:  $|G_{i-1}| = \kappa G_i, |G_i| = \omega G_{i+1}$ , 可将  $\Delta t_s^{G_x}, t_s = \bigoplus_{g=\mu}^x G_g(X), 1 \leq \mu \leq x, G_g \in \mathcal{G}, X \in T$  转换为非确切简单型时态跨度  $[\Delta t_{s_1}^{G_x}, \Delta t_{s_2}^{G_x}]$ , 其中,  $t_{s_1} = G_x(X_1), t_{s_2} = G_x(X_2)$ , 并且  $X_1$  与  $X_2$  的数量关系满足:  $X_1 \leq X_2$ .

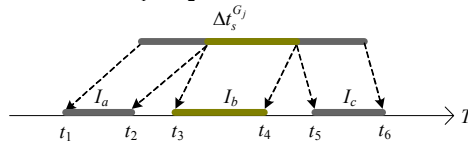


Fig.3 Complex temporal binding of temporal span and discrete temporal interval  
图 3 时态跨度与间断时态粒区的复合时态绑定

因此,嵌套型时态跨度转换为由两个简单型时态跨度描述的非确切时态跨度后,可以利用简单型时态跨度与间断时态粒区的绑定规则分别对  $\Delta t_{s_1}^{G_x}, \Delta t_{s_2}^{G_x}$  进行绑定,并且令其满足上述条件(1)~条件(5)以及

$$\Delta t_{s_1}^{G_x} \leq \psi(\Psi_{I_i}^l(\Delta t_s^{G_x})) \leq \Delta t_{s_2}^{G_x}.$$

### 5 应用示例

时态跨度广泛存在于时态应用系统中,尤其是在时态知识推理、时态约束、时态断言中较为丰富.比如,医疗诊断系统就属于其典型的应用情形.表 1 中,医生为病人给出药物治疗方案,其中包含了若干时态信息规则(事件)的片段.

Table 1 Temporal information rules in the medical diagnosis system  
表 1 医疗诊断系统中的时态信息规则

编号	规则
R1	从 2013 年 9 月 2 日起,日间口服药物 A,B,C,治疗疗程为 30 天
R2	药物 A 每天服用 3 次,服药间距 4 小时以上
R3	药物 B 每天服用 3 次,服药间距 4 小时以上
R4	药物 C 每天服用 2 次,服药间距 8 小时以上
R5	药物 B 与药物 A,C 不可同服,其服药时间间距必须大于 2 小时
R6	先服用药物 A,C,一周后药物 C 暂停,开始服用药物 B
R7	服用药物 B 两周之后,恢复服用药物 C,直至疗程结束
R8	假定每天 8:00 之后开始服用药物

诊疗系统应根据表 1 中的信息给出每天服用药物时间的提醒,比如何时服用药物 B、何时服用药物 C 等.这将涉及到时态跨度与时态粒点、时态粒区等时态原语之间的绑定运算.

由表 1 可知:其日历系统为公历,取粒度系统  $\mathcal{G} = \{G_Y, G_M, G_W, G_D, G_H\}$ .由于公历的粒度系统是一个存在分支的有向图<sup>[18]</sup>,实际应用中,采用其导出子图进行讨论,具体到本例则为  $\mathcal{G}_1 = \{G_Y, G_M, G_D, G_H\}, \mathcal{G}_2 = \{G_Y, G_M, G_W, G_D, G_H\}$ ,并基于  $\mathcal{G}_1$  构建仿射空间.

Step 1. 计算各药物的服用期限.

(1) 对于药物 A

由规则 R1,R6 和 R8,可施以时态跨度与时态粒点之间的绑定运算,其中,时态粒点  $P = 2013G_Y9G_M2G_D8G_H, \Delta t_{s_1}^{G_D} = 30G_D$ ,并满足  $G_P^\beta \leq G_{s_1}^\beta$ ,则  $\Psi_P^+(\Delta t_{s_1}^{G_D}) = P + \overline{S_1} = (2013, 9, 2, 8) + \{0, 0, 30, 0\} = (2013, 9, 32, 8)$ ,再由规范化处理<sup>[5]</sup>,其结果为  $2013G_Y10G_M2G_D8G_H$ .因此,服用药物 A 的时态粒区为  $I_A = [2013G_Y9G_M2G_D8G_H, 2013G_Y10G_M2G_D8G_H)$ ,与治疗疗程 I 一致,且有:  $\|I_A\| = 30G_D$ .

(2) 对于药物 B

由规则 R6 可知:药物 B 在治疗疗程中的一段连续区段中服用,属于时态跨度  $\Delta t_{s_2}^{G_W} = 1G_W$  与非间断时态粒区

$I$ 的绑定运算.为了与基于 $G_1$ 的仿射空间统一,可先在 $G_W$ 和 $G_D$ 之间进行粒度转换,由于时态跨度 $\Delta t_{S_2}^{G_W}$ 的时态粒度集合均为刚性时态粒度,可以利用粒度系统 $G_2$ 中 $G_W$ 与 $G_D$ 之间的粒度关系进行转换,转换后, $\Delta t_{S_2}^{G_D}$ 的结果为 $7G_D$ .类似地,在规则 R7 中, $\Delta t_{S_3}^{G_W} = 2G_W$ 也可转换为 $\Delta t_{S_3}^{G_D} = 14G_D$ .

根据规则 R6 以及时态跨度与非间断时态粒区的绑定方式,先作时态跨度关于时态粒点 $I^-$ (即,点 $P$ )的时态粒区 $I$ (加法)绑定: $\Psi_P^{I^+}(\Delta t_{S_2}^{G_D}) = [2013G_Y9G_M2G_D8G_H, 2013G_Y9G_M9G_D8G_H]$ ,即可求出疗程中不服用药物 $B$ 的时态粒区;再由 $\|I\| - \psi_{G_D}(\Psi_P^{I^+}(\Delta t_{S_2}^{G_D})) = 30G_D - 7G_D = 23G_D$ 可知,服用药物 $B$ 的时态跨度 $\Delta t_{S_2}^{G_D}$ 为23天,则服用药物 $B$ 的时态粒区可由时态跨度 $\Delta t_{S_2}^{G_D}$ 关于时态粒点 $I^+$ 的时态粒区 $I$ (减法)绑定 $\Psi_{I^+}^{I^-}(\Delta t_{S_2}^{G_D})$ ,求得: $I_B = [2013G_Y9G_M9G_D8G_H, 2013G_Y10G_M2G_D8G_H]$ ,且有 $\psi_{G_D}(\Psi_{I^+}^{I^-}(\Delta t_{S_2}^{G_D})) = \|I_B\| = 23G_D \leq \|I\|_{G_D}$ ,满足定理1,绑定成立.

### (3) 对于药物 C

由规则 R6,R7 可知:药物 $C$ 也并非在整个疗程期间均服用,其具体的服用时间跨越两段时态粒区,其计算涉及到时态跨度与两个间断时态粒区的绑定.

- 第1阶段, $\Psi_P^+(\Delta t_{S_2}^{G_D}) = P + \overline{S_2} = (2013,9,2,8) + \{0,0,7,0\} = (2013,9,9,8)$ , 则:

$$I_{C_1} = [2013G_Y9G_M2G_D8G_H, 2013G_Y9G_M9G_D8G_H];$$

- 第2阶段, $\Psi_{I_{C_1}}^+(\Delta t_{S_3}^{G_D}) = 2013G_Y9G_M9G_D8G_H + \overline{S_3} = (2013,9,23,8)$ , 可得:

$$I_{C_2} = [2013G_Y9G_M23G_D8G_H, 2013G_Y10G_M2G_D8G_H].$$

即,服用药物 $C$ 的间断时态粒区为

$$\{[2013G_Y9G_M2G_D, 2013G_Y9G_M9G_D], [2013G_Y9G_M23G_D, 2013G_Y10G_M2G_D]\}.$$

进而,由公式(15)有: $\|I_C\| = \|I_{C_1}\| + \|I_{C_2}\| = 16G_D$ .

### Step 2. 计算每种药物的每日提醒.

每日提醒是一个牵涉到重复状态算子约束(状态算子另文讨论)的问题,这里为简化阐述,在不影响绑定运算的前提下,仅讨论任意一天中药物的服用情形,即将时态粒点 $P$ 简化为 $(0G_Y, 0G_M, 0G_D, 8G_H)$ .

#### (1) 对于药物 A

由规则 R2 有, $\Delta t_{S_4}^{G_H} = 4G_H$ ,则药物 $A$ 的第2次、第3次服药提醒时间也可以通过时态跨度与时态粒点之间的绑定来计算:

$$P_1 = \Psi_P^+(\Delta t_{S_4}^{G_H}) = P + \overline{S_4} = (0,0,0,8) + \{0,0,0,4\} = (0,0,0,12),$$

$$P_2 = \Psi_{P_1}^+(\Delta t_{S_4}^{G_H}) = P_1 + \overline{S_4} = (0,0,0,12) + \{0,0,0,4\} = (0,0,0,16),$$

那么,药物 $A$ 的服用提醒时间为:2013年9月2日~2013年10月2日期间,每天8时、12时、16时以后.

#### (2) 对于药物 B

由规则 R3,R5,即:计算药物 $B$ 相对于药物 $A$ 的服用时间间距,实际上是时态跨度 $\Delta t_{S_5}^{G_H} = 2G_H$ 与时态粒区绑定之后的加减运算,其中,时态粒区由服用药物 $A$ 的提醒时间构成: $I_{11} = [8G_H, 12G_H], I_{12} = [12G_H, 16G_H]$ ,则分别可进行加减运算(为简化,仅考虑加法运算),有: $I_{11} + \overline{S_5} = [10G_H, 14G_H], I_{12} + \overline{S_5} = [14G_H, 18G_H]$ .

那么,药物 $B$ 的服用提醒时间为:2013年9月9日~2013年10月2日期间,每天10时、14时、18时以后.

#### (3) 对于药物 C

与计算药物 $A$ 的提醒类似,由规则 R4 有, $P_3 = \Psi_P^+(\Delta t_{S_6}^{G_H}) = P_3 + \overline{S_6} = (0,0,0,8) + \{0,0,0,8\} = (0,0,0,16)$ ,即,第2次服药提醒时间为 $16G_D$ 之后.

那么,药物 $C$ 的服用提醒时间为:2013年9月2日~2013年9月9日期间和2013年9月23日~2013年10月2日期间,每天8时、16时以后.

## 6 结束语

时态跨度是一种非常特殊的时态原语,从形式上看,其值似乎是明确的;但从语义上看,要讨论其序关系或者执行时态跨度间的运算,却又是不可判定或无意义的.现有的部分研究主要针对于公历系统,并没有展开来讨论时态跨度在不同粒度约束下的绑定与运算问题,而这一点却是时态断言应用中的关键问题.因此,本文分析了导致时态跨度这种非规范特性的原因,提出了根据时态上下文进行绑定运算的思想,并根据时态跨度与其他时态原语之间运算的性质,将其映射为仿射空间中向量与点之间的运算,构建了一种时态跨度绑定运算的方法,并给出了相应的推导或证明.

本文工作是文献[17,18]的后续研究工作,文献[17]将时态粒度系统同构到 $n$ 维向量空间,将时态跨度映射为向量空间中的自由向量;而本文则延续上述讨论,进一步扩展向量空间为仿射空间,解决了时态跨度与时态粒点、时态粒区等时态原语间的绑定问题.文献[18]基于时态粒度的层次映射转换方法,将时态粒点映射为可列集,构建了时态差运算方法;而本文工作则可以看作是其一种具体的应用,用于计算非间断时态粒区的长度.至于绑定后的时态跨度的粒度转换以及时态状态算子约束下的时态跨度问题,将另文讨论.

### References:

- [1] Bodirsky M, Kara J. The complexity of temporal constraint satisfaction problems. *Journal of the ACM*, 2010,57(2):1–41. [doi: 10.1145/1667053.1667058]
- [2] Chen J, Yang Y. Temporal dependency-based checkpoint selection for dynamic verification of temporal constraints in scientific workflow systems. *ACM Trans. on Software Engineering and Methodology*, 2011,20(3):1–23. [doi: 10.1145/2000791.2000793]
- [3] Wang Y, Zhong S, Xu D, Li Q, Zhan YK. A research on applying the temporal logic to the knowledge representation method describing a virtual experiment operation process. In: *Proc. of the 2010 Int'l Conf. on Computer Application and System Modeling*. Taiyuan: IEEE, 2010. 653–656. [doi: 10.1109/ICCASM.2010.5619237]
- [4] Faucher C, Teissède C, Lafaye JY, Bertrand F. Temporal knowledge acquisition and modeling. In: *Proc. of the 17th Int'l Conf. on Knowledge Engineering and Management by the Masses*. Lisbon, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. 371–380. [doi: 10.1007/978-3-642-16438-5\_27]
- [5] Zuo YY, Shu ZM, Tang Y. Exploration into granularity constraints and standardization of temporal primitives. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2013,34(5):1070–1075 (in Chinese with English abstract).
- [6] Shakarian P, Parker A, Simari G, Subrahmanian VVS. Annotated probabilistic temporal logic. *ACM Trans. on Computational Logic (TOCL)*, 2011,12(2):1–44. [doi: 10.1145/1877714.1877720]
- [7] Gunturi V, Shekhar S, Bhattacharya A. Minimum spanning tree on spatio-temporal networks. In: Bringas P, Hameurlain A, Quirchmayr G, eds. *Proc. of the Database and Expert Systems Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. 149–158. [doi: 10.1007/978-3-642-15251-1\_11]
- [8] Riveret R, Rotolo A, Contissa G, Sartor G, Vasconcelos W. Temporal accommodation of legal argumentation. In: *Proc. of the 13th Int'l Conf. on Artificial Intelligence and Law*. Pittsburgh: ACM Press, 2011. 71–80. [doi: 10.1145/2018358.2018368]
- [9] Bohlen M, Gamper J, Jensen C. Multi-Dimensional aggregation for temporal data. In: *Proc. of the 10th Int'l Conf. on Extending Database Technology (EDBT)*. Munich: Springer-Verlag, 2006. 257–275. [doi: 10.1007/11687238\_18]
- [10] Talukdar PP, Wijaya D, Mitchell T. Coupled temporal scoping of relational facts. In: *Proc. of the 5th ACM Int'l Conf. on Web Search and Data Mining*. Seattle: ACM Press, 2012. 73–82. [doi: 10.1145/2124295.2124307]
- [11] Kostakis O, Papapetrou P, Hollm J. Distance measure for querying sequences of temporal intervals. In: *Proc. of the 4th Int'l Conf. on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*. Heraklion: ACM Press, 2011. 1–8. [doi: 10.1145/2141622.2141669]
- [12] Pfennigschmidt S, Voisard A. Handling temporal granularity in mobile services. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*. Piscataway: IEEE, 2009. 295–300. [doi: 10.1109/WiMob.2009.57]
- [13] Wan J, Hao ZX. Study of multi-valued dependency in strong total order temporal scheme with multiple time granularities. *Journal of Computer Research and Development*, 2008,45(6):1064–1071 (in Chinese with English abstract).

- [14] Belussi A, Combi C, Pozzani G. Formal and conceptual modeling of spatio-temporal granularities. In: Proc. of the 2009 Int'l Database Engineering & Applications Symp. New York: ACM Press, 2009. 275–283. [doi: 10.1145/1620432.1620462]
- [15] Chen XQ, Qiu TR, Liu Q, Huang HK. The framework of temporal granular logic based on information system. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Granular Computing. Piscataway: IEEE, 2006. 604–606. [doi: 10.1109/GRC.2006.1635875]
- [16] Zuo YY, Tang Y, Shu ZM, Li L, Liu H. Research on the characterization and the calculus of temporal granularities. Journal of Computer Science, 2010,37(12):114–119 (in Chinese with English abstract).
- [17] Zuo YY, Tang WJ, Tang Y, Shu ZM. Vectorizing process and operation of the temporal spans. Journal of Computer Science, 2011, 38(11):171–175 (in Chinese with English abstract).
- [18] Zuo YY, Tang Y, Shu ZM. Method of the subtraction operation between temporal points with granularities based on granularity hierarchy mapping. Journal of Computer Research and Development, 2012,49(11):2320–2327 (in Chinese with English abstract).
- [19] Tian ZR. Tensor Analysis. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005 (in Chinese).
- [20] Gallier J. Geometric Methods and Applications for Computer Science and Engineering. 2nd ed., New York: Springer-Verlag, 2011.

#### 附中文参考文献:

- [5] 左亚尧,舒忠梅,汤庸.时态原语的粒度约束与规范化问题探讨.小型微型计算机系统,2013,34(5):1070–1075.
- [13] 万静,郝忠孝.具有多时间粒度的强全序时态模式中多值依赖问题研究.计算机研究与发展,2008,45(6):1064–1071.
- [16] 左亚尧,汤庸,舒忠梅,李磊,刘海.时态的粒度刻画及演算问题研究.计算机科学,2010,37(12):114–119.
- [17] 左亚尧,唐文俊,汤庸,舒忠梅.时态跨度的向量化处理与运算.计算机科学,2011,38(11):171–175.
- [18] 左亚尧,汤庸,舒忠梅.基于粒度层次映射转换的时态粒点差运算方法.计算机研究与发展,2012,49(11):2320–2327.
- [19] 田宗若.张量分析.西安:西北工业大学出版社,2005.



左亚尧(1974—),男,湖北荆州人,博士,副教授,CCF会员,主要研究领域为数据仓库与数据挖掘,时态信息处理,粒度计算.  
E-mail: yayaozuo@gmail.com



汤庸(1964—),男,博士,教授,博士生导师,CCF杰出会员,主要研究领域为数据仓库,协同计算,云服务软件.  
E-mail: ytang@m.scnu.edu.cn



舒忠梅(1974—),女,博士,讲师,主要研究领域为数据仓库,商业智能,院校智能.  
E-mail: issszm@mail.sysu.edu.cn