

文章编号: 1001-0920(2012)12-1859-05

实时系统时间并行模型确定性分析

王剑平, 张云生, 张果, 张晶

(昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 昆明 650051)

摘要: 研究实时并行系统的确定性, 采用面向执行体构件建模和广义测度固定点理论研究系统收敛条件. 把实时系统构建为用时间信号联系的面向执行的构件集合, 采用超致密时间(SDT)表示混合系统信号标签模型, 定义构件为时间模型上的偏序集函数, 构成有反馈作用的偏序集函数组合, 用广义超测度空间固定点理论分析时间并行模型因果构件的收敛性和系统响应的存在和唯一性.

关键词: 实时并行系统; 确定性; 超致密时间; 广义超测度; 因果性

中图分类号: TP393

文献标志码: A

Determinacy analysis of timed concurrent model for real-time systems

WANG Jian-ping, ZHANG Yun-sheng, ZHANG Guo, ZHANG Jing

(Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China. Correspondent: WANG Jian-ping, E-mail: kmustwjp@126.com)

Abstract: This paper presents a research of the determinacy of the timed concurrent system and the condition of convergence. Time signals of linked concurrent components are used to represent real-time system. Super dense time(SDT) is used to represent the modeling of mixed signals tag. The component are defined by the poset function of time model and are composed by the poset function using feedback. Based on the fixed point theorem and generalized ultrametrics, the convergence of causal components is analyzed and the uniqueness of the system response is proved.

Key words: real-time concurrent system; determinacy; super dense time; generalized ultrametrics; causality

1 引言

在航空电子、汽车电子、工业控制、医疗仪器等面向物理过程的实时嵌入式系统中, 计算程序被用作控制程序, 确定可靠的运行程序依赖于严密的数学和逻辑分析. 其中, 时间并行相互作用涉及到并行分布软件语义结构、系统建模、硬件描述语言设计、离散事件仿真及通信网络构建. 相互作用模型的形式化描述比算法模型更为复杂, 相互作用的模型建立在构件的“因果”关系上, 其中一个构件的输出依赖于前一个构件的输出和/或与外部物理过程的交互, 形成封闭或开放的架构. 目前软件构件通常是面向对象的, 通过控制转移(即方法调用)相互作用, 对象被激活并加入模型线程中. 这种构件作用是被动的, 构件的并行性与对象的实时特性并不相关, 对并行模型的实时确定性分析具有一定困难. 实时系统的关键是确认在确定的时刻发生确定的行为, 也就是说 t 时刻的确认信

号为 $s(t)$, 同时要确认由并行构件实现的功能 W 是否能够产生有效的输入输出因果关系.

本文将实时系统建模为由时间并行信号联系的面向执行的构件的集合, 形式化定义信号是时间确定的函数, 它们是连续变化事件或者是离散事件的值, 或者由两者混杂组成. 由此建立实时程序语言的规范符号语义, 更准确地表达了系统并行执行的确定性. 目前针对此研究主要是将确定时间系统模拟为固定点问题^[1], 即任意连接的时间并行网络可以模拟为具有反馈的单个系统, 系统的行为是对应系统模型的固定点, 用Cantor测度测量信号之间的距离, 用Banach固定点理论证明系统行为的存在和唯一^[2-4]. 但对于面向物理过程的这类混杂系统^[5], 由于在可观测的行为顺序上, 时间系统可能要求实现非单一的功能, 不服从标准顺序理论符号语义规范^[6], Cantor测度不能做到用任意完整的顺序模拟时间. 为

收稿日期: 2011-07-18; 修回日期: 2011-11-22.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60863004); 国家863计划项目(2007AA010409); 云南省自然科学基金项目(2009CD041).

作者简介: 王剑平(1975—), 男, 副教授, 从事物理信息系统、实时嵌入式系统等研究; 张云生(1948—), 男, 教授, 博士生导师, 从事实时系统、复杂系统等研究.

此, 本文在领域理论上扩展了超致密时间模型和包含时间模型在内的语义框架并用于混杂系统, 将传统测度空间方法扩展到广义超测度空间. 此外, 将信号看作在一前缀顺序下的偏序集元素, 将系统描述为此偏序集上函数的集合, 研究这些函数的单调、连续性和因果性, 以确定混杂系统行为的存在和唯一性.

2 实时并行系统

将实时并行系统表示为具有连续和/或离散动态行为的物理模型, 或者相互发送有时间标记信号的软件模型的组合.

2.1 相互作用构件

在并行系统中, 相互作用比算法更有效地表达了系统的行为^[7], 采用控制模型结构框图形式, 将时间模型加到构件上, 称为执行构件 (Actor); 再将实时并行系统构建为用时间信号联系的面向执行的构件集合, 构件的输入输出相互作用构成“纠缠”关系. 与对象构件相比, Actor 是并行的, 行为是自治的. Actor 在输入接口 P_A 接收信号, 在输出接口 Q_A 发送响应信号. 与面向对象的设计类似, 组合和抽取仍是面向执行设计的核心, 多个 Actor 可以组成复合 Actor, 分布的 Actor 可类似控制系统结构图, 形成组合网络结构图 (如图 1).

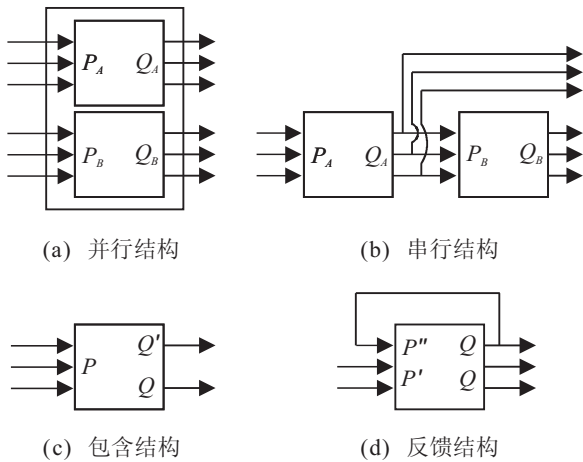


图 1 执行构件组合结构

2.2 标签信号

用标签信号模型表示并行构件间通信联系的时间信号.

定义 1 函数 $S(T, V) = (T \rightarrow V)$, $s \in S(T, V)$, $s = \{(t, v) | s(t) = v\}$ 表示标签信号模型, 其中 $t \in T$ 是信号标签, $v \in V$ 是信号值.

两个构件间的联系由一组事件描述, 事件是 $T \times V$ 中的序对 (t, v) ^[8-9]; 信号是一组事件, 表示两个构件之间沿着通信路线通信的集合, 记 $S(T, V)$ 为具有标签集 T 和值集 V 的所有信号集. 这里也定义了 T 是信号 S 上的余域, $T = \text{dom}(S)$ 是信号事件在其上出现

的所有标签的集合, 没有事件的信号简单地表示为空集 \emptyset ; 对于系统, 信号集是无穷的. 标签集 T 的结构是时间模型应用的基础, T 可以表示因果性质、时间或作用顺序. 信号的排序是基于偏序函数的扩展排序.

定义 2 对于任意 $s_1, s_2 \in S$, s_1 是 s_2 的前缀, 记为 $s_1 \subseteq s_2$, 当且仅当 $\text{dom}(s_1) \subseteq \text{dom}(s_2)$ 和 $s_1(t) = s_2(t), \forall t \in \text{dom}(s_1)$.

定义 2 表示的顺序说明信号 s_1 的集合是信号 s_2 集合的子集.

2.3 时间模型

在标签信号中, 考虑到实时系统的时间确定性, 若用 T 表示时间模型, 则 T 是全序的. 选择 $T \in R^+$, 表示信号是连续的, 其反映牛顿物理时间, 即时间模型有起点; 若 $T \in N$, 则信号是离散的. 对于混杂系统选择 $T = R^+ \times N$, 则称其为超致密时间 (SDT) 模型^[6]. 时间标签 $(r, n) \in R^+ \times N$, 其中 $r \in R^+$ 表示步长, $n \in N$ 表示步数. 对于所有 $(r, n), (r', n') \in R \times N$, $(r, n) \geq (r', n') \Leftrightarrow r \geq r'$ (或者 $r = r' \ \& \ n \geq n'$). SDT 类似地定义为 $T = I \times N$, I 是任意实数间隔. SDT 的子集 $N \times N$ 被用作硬件描述语言 Verilog 和 VHDL 中的时间模型. 通过排序, 信号模型 $S(T, V)$ 是定义在 T 的下降集 $\text{dom}(S)$ 上的偏序函数.

定义 3 具有前缀排序的信号集 (S, \leq) 是一偏序集^[6], S 的最小元素是没有事件的空信号集 \emptyset , 最大元素是所有信号, 称全体信号.

2.4 系统作用表达

构件及其组合的作用可以看作执行从输入信号到输出信号的传递函数.

定义 4 构件函数 $W : A \rightarrow S$, $W(s_i) = s_o$, 记作构件对信号的作用, 其中 s_i 和 s_o 分别是构件模型的输入、输出标签信号序列.

下面讨论如图 2 所示双稳态 D 数字触发器的作用行为是否确定和唯一.

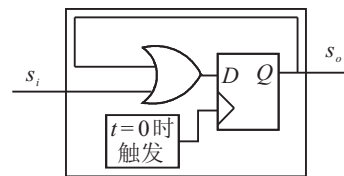


图 2 双稳态 D 数字触发器

对于没有外部输入的闭合组合结构, 系统的前向函数是 $W_f(s_i) = s_o$, 反馈函数是 $W_b(s_o) = s_i$, 系统的行为是前向和反馈连接的组合函数 $(W_b \circ W_f)(s_i) = s_i$. 组合函数 $(W_b \circ W_f)$ 的作用产生了与输入同样的信号序列, 但时间标签不一致. 如果考虑如图 1(d) 有外部输入的系统, 将输入接口分为 $P = P' \cup P''$, 其中

P' 是外部输入接口, P'' 是与输出连接的反馈接口, 则系统前向是 $W_f(s_i' \times s_i'') = s_o$, 反馈是 $W_b(s_o) = s_i''$, 整个系统的行为是 $W_b \circ W_f(s_i' \times s_i'') = s_i''$, 最终得到 $W(s_i') = s_i''$. 同样, 作用产生的信号序列蕴含着不同的时间标签. 时间标签关系可由测度空间表达, 系统行为的唯一确定性由信号序列的时间测度决定.

3 时间并行模型的固定点

系统时间确定性可以看作信号序列测度的固定点问题^[2-4], 特别由并行构件形成的组合网络结构可以模拟为具有反馈的单个系统, 确定系统的时间行为即变为求解对应构件函数的固定点.

3.1 广义超测度信号

定义 3 约定的偏序信号 (S, \leq) 上的时间标签关系可由测度 $d: S(T, V) \times S(T, V) \rightarrow D(T), d \in D(T)$ 表达. 如果 $D(T) = T$, 则信号是完备的. 对 D 规定时序代数 $(D, \leq, \oplus, \varepsilon)$ 运算, 其中二元关系 \leq 是自反、反对称和传递的, 即

$$\forall d \in D, d \leq d,$$

$$\forall d_1, d_2 \in D, d_1 \leq d_2, d_2 \leq d_1 \Rightarrow d_1 = d_2,$$

$$\forall d_1, d_2, d_3 \in D, d_1 \leq d_2, d_2 \leq d_3 \Rightarrow d_1 \leq d_3.$$

二元算子 \oplus 表示取小运算, 即

$$\forall d_1, d_2 \in D, d_1 \leq d_2, d_1 \oplus d_2 \leq d_1.$$

测度 $d(s_1, s_2)$ 衡量 s_1 如何紧密地接近 s_2 . 如果信号序列 $\{s_k\}$ 当且仅当对于所有 $\varepsilon > 0$ 存在 $n \in N$, 使得对于所有 $k \geq n$, 有 $d(s_k, s) < \varepsilon$, 则序列 $\{s_k\}$ 收敛到 s , 记为 $s_k \rightarrow s$; 当且仅当对于所有 $\varepsilon > 0$ 存在 $n \in N$, 使得对于所有 $k, l \geq n, d(s_k, s_l) < \varepsilon$, 则序列 $\{s_k\}$ 是 Cauchy 收敛的; 当且仅当每个 Cauchy 序列收敛到 s , 则测度空间是完备的^[11].

给定 $T = R^+$, Cantor 测度^[10]

$$d(s_1, s_2) = 2^{-\sup\{t \in T\}}. \quad (1)$$

式中对于 s_1, s_2 , 若 $\forall \tau \leq t$, 则 $s_1(\tau) = s_2(\tau)$. 显然 $2^{-\sup\{\phi\}} = 1, 2^{-\sup\{R^+\}} = 0$, 即两个不同的信号在开始时距离为 1, 两个相同的信号在任何时间距离为 0. 容易证明对于信号 $S(R^+, V)$, Cantor 测度是完备的. 由于 Cantor 测度的余域是一组所有非负实数 R^+ , 它没有从 $R^+ \times N$ 到 R^+ 的蕴含顺序, 故其测度空间语义方法对分析时间并行模型具有局限性, 对具有因果性的系统是不完备的.

定义 5 T 是一偏序集 (T, \leq) , 偏序集 D 是超密时间模型 T 的下降集, 如果对于所有 $(r, n) \in D$ 和 $(r', n') \in T, (r', n') \leq (r, n)$, 则意味着 $(r', n') \in D$.

选择具有任意最小元素 \perp 的偏序集 D 为信号模型余域, 并以逆包含算子 \supseteq 对 D 排序, T 是最小元

素 \perp , 空集 \emptyset 是最大元素, 则 D 是广义超测度, 具有如下 4 种形式:

$$D[r, n] = \{(r', n') \in T \mid (r', n') \leq (r, n)\},$$

$$D(r, n) = \{(r', n') \in T \mid (r', n') \leq (r, n)\},$$

$$D(r, \infty) = \{(r', n') \in T \mid (r', n') \leq (r, n)\},$$

$$D[r, \infty) = T.$$

如果 $(r, n) \geq (r', n')$, 则 $D(r, n) \supseteq D'(r', n')$. 如果代替 Cantor 测度, 定义时间信号上的广义超测度

$$d(s_1, s_2) = \sup\{(r, n) \in D\}. \quad (2)$$

式 (2) 与 (1) 一样, 对于 s_1, s_2 , 若 $\forall t \leq (r, n)$, 则 $s_1(t) = s_2(t)$ ^[11]. 对于任意两个下降集 D, D' , 定义 $d = D, d' = D'$, 当且仅当 $D \supseteq D', d \leq d'$.

定义 6 (S, d, \supseteq, \perp) 是时间模型信号的广义超测度空间, 对于所有 $s_1, s_2, s_3 \in S$, 有

$$d(s_1, s_2) = 0, \text{ 当且仅当 } s_1 = s_2; \quad (3)$$

$$d(s_1, s_2) = d(s_2, s_1); \quad (4)$$

$$d(s_1, s_3) \leq d(s_1, s_2) \oplus d(s_2, s_3). \quad (5)$$

这样可以任意完备的顺序集模拟时间.

3.2 构件的因果性和收敛性

确定的时间并行执行构件用于物理过程或计算过程, 它对信号的作用构成因果关系, 由输入激励产生输出响应结果, 响应时间晚于对应的激励时间. 如果 $s_1(t) = s_2(t), t \in D(r, n)$, 则称信号 s_1, s_2 是相等的; 如果两个输入在某个时间是相等的, 则对应的输出到某个相同时间也是相等的, 称构件函数是因果的. 因果构件在时间 $R^+ \times N$ 到 R^+ 上的因果性条件表达为: 假设存在 $\Delta \in R^+$ 和 $n_k \in N$, 使得对于所有 $s_1, s_2 \in S$, 有:

$$\textcircled{1} n < n_k \text{ 和 } s_1(t) = s_2(t), t \in D[r, n], \text{ 意味着}$$

$$W(s_1)(t) = W(s_2)(t), t \in D[r, n + 1];$$

$$\textcircled{2} n > n_k \text{ 和 } s_1(t) = s_2(t), t \in D[r, n], \text{ 意味着}$$

$$W(s_1)(t) = W(s_2)(t), t \in D[r + \Delta, 0];$$

$$\textcircled{3} W(s_1)(t) = W(s_2)(t), t \in D(0, 0).$$

这样表达的构件函数在时延 Δ 上是因果的.

3.3 固定点分析

因果执行构件函数 W 对输入输出序列信号的作用行为的存在和唯一性由函数的单调、连续性、因果性和测度空间确定. 对于广义超测度空间 (S, d, \supseteq, \perp) , 当且仅当输入信号 $s_i \rightarrow s$, 意味着输出信号 $W(s_i) \rightarrow W(s)$, 构件函数 W 是连续的; 当且仅当对所有 $s_1, s_2 \in S, d(W(s_1), W(s_2)) \leq d(s_1, s_2)$ 是收敛的; 当且仅当 $s_1 \neq s_2, d(W(s_1), W(s_2)) < d(s_1, s_2)$ 是严格收敛的.

定理 1 设 (S, d, \supseteq, \perp) 是一完备测度空间, 如果函数 $W(s)$ 是最终因果的, 则 W 是严格收敛的.

证明 对 D 的 4 种形式证明 W 是严格收敛的.

1) 若 $d(s_1, s_2) = D[r, n]$, 首先 $s_1 \neq s_2$, 当 $n < n_k$, 由因果条件 ①, 得 $d(W(s_1), W(s_2)) = D[r, n + 1]$, 而 $D[r, n + 1] \supset D[r, n]$; 当 $n > n_k$, 由因果性条件 ②, 得 $d(W(s_1), W(s_2)) = D[r + \Delta, 0]$, 而 $D[r + \Delta, 0] \supset D[r, n]$; 综合上述两种情况, 由式 (2) 得 $d(W(s_1), W(s_2)) < d(s_1, s_2)$.

2) 若 $d(s_1, s_2) = D(r, n)$, 当 $r \neq 0$, 设

$$\tau = \begin{cases} r/2, & r < \Delta/2; \\ r - \Delta/2, & r \geq \Delta/2. \end{cases}$$

当 $n > n_k$, $D[\tau, n] \supseteq D(r, n)$, 由条件 ②, 得 $d(W(s_1), W(s_2)) = D[\tau + \Delta, 0]$, 而 $D[\tau + \Delta, 0] \supset D[\tau, n] \supseteq D(r, n)$, 所以 $d(W(s_1), W(s_2)) < d(s_1, s_2)$. 当 $r = 0$, 或者 $n = 0$ 且 $s_1(0, 0) \neq s_2(0, 0)$, $d(s_1, s_2) = \emptyset$, 由条件 ③, 得 $d(W(s_1)(0, 0), W(s_2)(0, 0)) = D[0, 0]$, 而 $D[0, 0] \supset \emptyset$, 所以 $d(W(s_1), W(s_2)) < d(s_1, s_2)$. 或者 $n \neq 0, d(s_1, s_2) = D[0, n - 1]$, 由 1) 已证明

$$d(W(s_1), W(s_2)) < d(s_1, s_2).$$

3) 若 $d(s_1, s_2) = D(r, \infty)$, 因为一定有一个 n , 使 $s_1(r, n) = s_2(r, n)$, 由条件 ②, 得 $d(W(s_1), W(s_2)) = D[r + \Delta, 0]$, 而 $D[r + \Delta, 0] \supset D(r, \infty)$, 所以

$$d(W(s_1), W(s_2)) < d(s_1, s_2).$$

4) 最后若 $d(s_1, s_2) = T$, 对于 $s_1 = s_2$, D 的上界是 T , 所以 $d(W(s_1), W(s_2)) = T$. 对每一 $s_1, s_2 \in S$ 取任意超密时间间隔逆序列: $\dots D_{i+1} \supseteq D_i \supseteq \dots \supseteq D_1 \supseteq D_0 = \emptyset$, 其中 $D_k = D[k\Delta, n]$, $D_{k+1} = D[k\Delta, n + 1]$ 或者 $D_{k+1} = D[(k + 1)\Delta, 0]$, $k \in N | t \in T | t < k\Delta$. 设

$$W^k(s) = \begin{cases} s, & i = 0; \\ W(W^{k-1}(s)), & i > 0. \end{cases}$$

若 $d(W^k(s_1), W^k(s_2)) = D_k$, 由因果性条件已证明 $d(W^{k+1}(s_1), W^{k+1}(s_2)) \supset D_{k+1} \supseteq D_k$, 则 $d(W^{k+1}(s_1), W^{k+1}(s_2)) < d(W^k(s_1), W^k(s_2))$, 而 $\bigcup_{i=0}^{\infty} D_i = T$, 即序列在全序 T 上收敛. \square

在上述定理和反馈语义的基础上, 可以由因果构件函数的收敛性求解固定点问题, 即时间并行模型的确定性问题.

定理 2 (构造固定点理论) 设 (S, d, \supseteq, \perp) 是一完备测度空间, 如果函数 $W(s)$ 是严格收敛的, 则 W 在 S 中有唯一固定点.

证明 由反馈系统的传递函数可以定义序列

$s = (W^0(s), W^1(s), \dots, W^i(s), \dots)$, 由广义超测度性质 ③, 得三角不等式

$$\begin{aligned} d(W^k(s), W^{k+2}(s)) &\leq \\ d(W^k(s), W^{k+1}(s)) \oplus d(W^{k+1}(s), W^{k+2}(s)). \end{aligned}$$

设 $l = k + 1, k + 2, \dots$, 有

$$\begin{aligned} d(W^k(s), W^l(s)) &\leq \\ d(W^k(s), W^{l-1}(s)) \oplus d(W^{l-1}(s), W^l(s)) &\leq \\ d(W^k(s), W^{l-2}(s)) \oplus d(W^{l-2}(s), W^{l-1}(s)) \oplus \\ d(W^{l-1}(s), W^l(s)) &\leq \\ \bigoplus_{i=k}^{l-1} d(W^i(s), W^{i+1}(s)). \end{aligned} \tag{6}$$

因为 $W(s)$ 是严格收敛的, 由定理 1 有

$$d(W^i(s), W^{i+1}(s)) < d(W^{i-1}(s), W^i(s)), \tag{7}$$

所以对于取小 \oplus 运算, 式(6)的结果是

$$d(W^k(s), W^l(s)) \leq d(W^{l-1}(s), W^l(s)). \tag{8}$$

同样, $d(W^k(s), W^{l+1}(s)) \leq d(W^l(s), W^{l+1}(s))$, 而 $d(W^l(s), W^{l+1}(s)) < d(W^{l-1}(s), W^l(s))$, 由此证明序列 $(s = W^0(s), W^1(s), \dots, W^i(s), \dots)$ 是 Cauchy 序列. 记 a 是 S 的收敛点, 由式 (7) 得 $d(W^{k+1}(s), W(a)) < d(W^k(s), a)$, $W(a) = a$, S 是完备的. 如果还有一个收敛点 b , $W(b) = b$, 则 $d(b, a) = d(W(b), W(a)) < d(b, a)$. 结果矛盾, 说明 a 是 W 的唯一固定点. \square

上述定理表示对于反馈系统, 广义超测度理论给出了在任意完备的时间模型 SDT 模型上因果构件固定点问题的求解, 即时间并行系统的信号确定性问题.

4 实例分析

如图 2 所示的双稳态 D 触发器, 假定初始输出值是 0, 反馈通道要求知道在馈入初始输入值之前通过或门的输出值, 在零时刻触发时会出现很短时间的两个输出“闪动”. 在由 VHDL 描述的硬件仿真中, 零时刻使用微步长记录瞬时变换. 上述表达为 $s \in S((r, n), V)$, $V = 0, 1$, 和

$$W(s)(r, n) = \begin{cases} 0, & (r, n) = (0, 0); \\ s(0, 0), & (r, n) \neq (0, 0). \end{cases}$$

显然此系统是最终因果的, 有唯一固定点 $s(0, 0)$. 然而考虑函数

$$W(s)(t) = \begin{cases} \lim_{\tau \rightarrow t^+} s(\tau), & \text{极限存在;} \\ 0, & \text{极限不存在} \end{cases}$$

对信号 $s_1, s_2 \in S(R^+, V)$, $s_1(t) = 0, \forall t \in R^+$,

$$s_2(t) = \begin{cases} 0, & t \in [0, 1]; \\ 1, & t > 1 \end{cases}$$

的作用, 虽然函数 W 是收敛的, 但 $W(s_1)(t) = s_1(t)$,

$$W(s_2)(t) = \begin{cases} 0, & t \in [0, 1]; \\ 1, & t > 1. \end{cases}$$

输入信号 s_1, s_2 在 $t \in [0, 1]$ 内相等, 而输出信号 $W(s_1)(t), W(s_2)(t)$ 仅在 $t \in [0, 1]$ 内相等, 因此构件不是因果的, 函数没有唯一固定点. 时钟信号 (图 3(a)) 和 zeno 信号 (图 3(b)) 表示事件出现在固定的时间间隔上 (图 3). 特别是 zeno 信号, 表示无限多的事件可能在有限的时间之内发生, 尽管没有物理可实现性, 但容易用于仿真和建模环境中, 其中时间标签为可变步长. 如果考虑一近似 zeno 的有限信号序列 $\{s_k\}, s_k = 1 - 1/2^n, 1|n \in \{0, \dots, k\}$, 则 s_k 是包含第 k 个事件的 zeno 前缀信号. 直观上序列 $\{s_k\}$ 收敛到 zeno, 但由 Cantor 测度公式 (1), 对所有 $k > n$ 容易计算 $d(s_k, \text{zeno}) > 1/2$, 对任意 $k > l$ 或 $k < l$, 也容易计算 $d(s_k, s_l) > 1/2$. 所以, 在 Cantor 测度中这个序列不是完备的^[12], 它不能用 Banach 固定点理论推出这类系统的行为. 类似地, 对于所有信号 $s_1, s_2 \in S([0, 1], V)$, 如果 $s_1 \neq s_2$, 则可由 Cantor 测度计算 $d(s_1, s_2) > 1/2$.

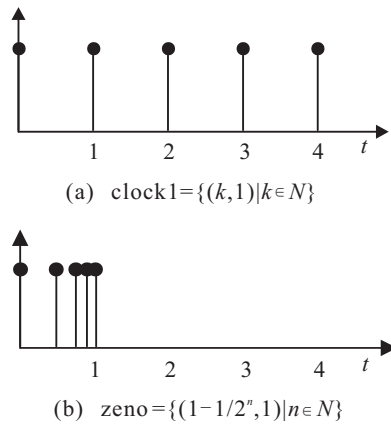


图 3 时间序列信号

上述例子说明在 Cantor 测度下, 不可能使蕴含顺序从 $R^+ \times N$ 到 R^+ . 而超致密时间模型对于信号序列 $\{s_k\}$ 可选择 $t = (r, n)$, 而 $t \in [0, 1]$. 由广义超测度公式 (2) 可计算出 $d(s_k, \text{zeno}) < 1$ 及 $d(s_k, s_l) < 1$, 它收敛到 zeno.

考虑一纯延时构件函数 $W_\Delta(s(t)) = s(t - \tau), (t - \tau) \in \text{dom}(s)$, 对任意 $\tau > 0$, 显然若 $s_1(t - \tau) = s_2(t - \tau)$, $W(s_1(t)) = W(s_2(t))$, 则由 Cantor 测度分析该函数是收敛的. 但它有多个固定点, 例如当 $\tau = 1, \phi$ 和 clock1 同时是固定点. 按广义超测度分析, 对于任意两个信号 s_1, s_2 , 没有说明两者定义, 且 $s_1(t) = s_2(t)$, 则 $d(s_1, s_2) = \infty$, 所以它不严格收敛, 不能对函数 W_δ 由广义超测度建立存在唯一固定点. 事实上, 延时函数是控制系统分析中的非最小相位环节, 信号幅频特性一定时其相频特性是不确定的^[13].

5 结 论

将实时并行系统构建为用时间信号联系的面向执行的构件的集合, 将因果构件表示为收敛函数, 通过构件函数的测度关系讨论系统作用的固定点, 这是实时并行控制中的确定性问题. 传统 Cantor 测度建立的语义框架解决了构件的收敛, 但在实际混杂系统使用的时间模型 (例如超密时间模型) 中存在一些局限, 它有可能给出非因果而收敛的不相关的结果. 由此, 引入广义超测度空间形成的语义框架, 可以在从超密时间 $R^+ \times N$ 蕴含到 R^+ 的时间顺序上, 捕获构件收敛函数中原因和结果精确的表现关系. 结果证明, 如果构件函数是最终因果的, 则它是严格收敛的, 而严格收敛函数有唯一固定点. 由广义测度理论对实例分析的结果与因果关系非形式的等价对应, 与控制系统理论分析的结果一致, 由此可以确定实时并行系统行为的存在和唯一问题.

参考文献(References)

- [1] W de Bakker, E P de Vink. Denotational models for programming languages: Applications of Banach's fixed point theorem[J]. Topology and its Applications, 1998, 85(1): 35-52.
- [2] Edward A Lee. Modeling concurrent real-time processes using discrete events[J]. Annals of Software Engineering, 1999, 7(1): 25-45.
- [3] Roscoe B, Reed G. Metric spaces as models for real-time concurrency[C]. Proc of the 3rd Workshop on the Mathematical Foundations of Programming Language Semantics. Heidelberg, 1988: 331-343.
- [4] Granas A, Dugundji J. Fixed point theory[M]. New York: Springer-Verlag, 2003: 25-30.
- [5] Yates, Robert. Networks of real-time processes[C]. Proc of the 4th Int Conf on Concurrency Theory. London, 1993: 384-397.
- [6] Manna Z, Pnueli A. Verifying hybrid systems[J]. Hybrid Systems, 1993, 736(1): 4-35.
- [7] Wegner P. Interactive foundations of computing[J]. Theoretical Computer Science, 1998, 192(2): 315-351.
- [8] Edward A Lee, Sangiovanni-Vincentelli. A framework for comparing models of computation[J]. IEEE Trans on CAD, 1998, 17(12): 1220-1228.
- [9] Arbab F. Abstract behavior types: A foundation model for components and their composition[J]. Science of Computer Programming, 2005, 55(3): 3-52.
- [10] Munkres J R. Topology: A first course[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2000: 6-29.

(下转第1869页)