

事件反馈与状态反馈的混合模监控

王 飞¹, 胡奇英²

(1. 西安交通大学 电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 上海大学 国际工商与管理学院, 上海 201800)

摘要: 在监控理论中, 处理状态膨胀的标准方法之一是基于语言或谓词的模监控. 但文献中没有涉及同时基于语言与谓词的混合模监控. 本文研究混合模监控综合及其性质. 通过提出状态反馈与某一事件反馈的等价关系, 给出了两者相连接的定义, 进而得到了混合模监控器等价于子监控器与子控制器的连接. 并讨论了混合模监控器具有非阻塞性与无死锁性所满足的条件, 即基于语言的闭环系统行为的封闭性与谓词的 Σ_u -不变性, 而其是无死锁的充要条件是子监控器与子控制器必须均是无死锁的并满足 d -不变关系.

关键词: 语言; 谓词; 混合模监控; 非阻塞; 无死锁

中图分类号: TP271 **文献标识码:** A

Mixed modular supervisory control of event feedback and state feedback

WANG Fei¹, HU Qi-ying²

(1. School of Electronics & Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China;

2. College of International Business & Management, Shanghai University, Shanghai 201800, China)

Abstract: One of the standard ways to handle the state explosion in large systems is to practise the modular supervision of languages or predicates, or of discrete event systems. However, there is nothing to be developed about the mixed modular supervision of both the languages and predicates. The synthesis and properties of mixed modular supervisory control are discussed. By showing the equivalence between a state feedback and some event feedback, the conjunction for the state feedback and the event feedback is defined. Then, the mixed modular supervisor is equivalent to the intersection of the sub-supervisors and the sub-controllers. It is shown that the mixed modular supervisor is nonblocking and deadlock-free under the condition of the Σ_u -invariance of the predicates and the closeness of the languages. Furthermore, a mixed modular supervisor is deadlock-free if and only if the sub-supervisors and subcontrollers are all deadlock-free and the corresponding pair meets a d -invariant relation.

Key words: language; predicate; mixed modular supervisory control; nonblocking; deadlock-free

1 引言(Introduction)

离散事件系统(Discrete event system, DES)的监控理论自 Ramadge 和 Wonham^[1,2]提出以来, 一直受到诸多学者的广泛关注. 其中模监控(Modular supervisory)是降低大系统计算复杂度的一种有效的方法. 其理论研究主要在事件反馈与状态反馈两个方面. 文献[3]中首先提出了基于事件的模监控, 并给出了子监控器的非阻塞在模监控中得到保持的非冲突条件; 文献[4]利用事件的优先函数来解决非阻塞中出现的冲突问题, 进而获得非阻塞的模监控器, 而文献[5]是文献[4]的一个推广, 通过引入了通讯控

制器将文献[4]中的结论扩展到了部分可观察的情况; 文献[6]则通过引入相互非阻塞(Mutually non-blocking)的概念解决了对于语言并的模监控的非阻塞问题; 文献[7]讨论了语言死锁的问题, 通过引入语言的 d -不变概念, 给出了子监控器连接的无死锁的保持条件. 文献[8]中则研究了基于状态反馈的模监控, 文献[9]进一步讨论了基于状态的模监控的性质保持问题; 通过引入自动机的 d -不变的概念, 讨论了状态反馈子控制器连接的无死锁的保持问题.

迄今, 大多数的研究者都将研究重点集中在事

件反馈或者状态反馈的模监控上,而有关事件反馈与状态反馈的混合模监控问题却没有涉及,在制造系统中对其约束条件(子任务)的描述更一般的情况是部分为语言轨迹,部分为状态轨迹(见文献[10]中的例5.3,其约束条件1,2用原谓词 P_1, P_2 表示,而条件3,4可用类似于3.6节中的自动机 S_1 来表示),本文就在这种情形下,提出在状态反馈可以认为是事件反馈的一个特例的前提下将事件反馈的监控器和状态反馈的控制器进行连接得到一个事件反馈的监控器的混合监控理论,并进一步讨论了其非阻塞与无死锁的性质.

2 预备知识(Preliminaries)

本文所考虑的DES是一个自动机 $G = (Q, \Sigma, \delta, q_0, Q_m)$. 其中: Q 为离散状态集, Σ 为事件集, q_0 为初始状态, Q_m 为标识状态集, $\delta: \Sigma \times Q \rightarrow Q$ 为状态转移函数. Σ^* 表示事件串集,按通常将状态转移函数推广为从 $\Sigma^* \times Q$ 到 Q 的映射.语言 $L(G) = \{s \in \Sigma^* \mid \delta(s, q_0) \neq \emptyset\}$ 表示 G 的行为,其中 $\delta(s, q_0) \neq \emptyset$ 表示 $\delta(s, q_0)$ 有定义.经过串 s 后 G 的激活事件集(Active event)定义为 $\Sigma(s) = \{\sigma \in \Sigma \mid \delta(s\sigma, q_0) \neq \emptyset\}$.语言 K 的前缀闭包 $\bar{K}$ 是 K 的所有前缀集,如果 $\bar{K} = K$,则称 K 是闭的.将 Σ 分为两个互不相交的子集 Σ_u, Σ_c ,称 Σ 的一个子集 $\Gamma = \{\gamma \in 2^\Sigma \mid \Sigma_u \subseteq \gamma\}$ 为控制模式(Control patten)集,其中 2^Σ 是 Σ 的幂集,而称映射 $f: L(G) \rightarrow \Gamma$ 为DES G 上的监控器.记 f 控制下的系统为 f/G ,它产生的行为 $L(f/G)$ 可由如下递归而得: $\varepsilon \in L(f/G); s\sigma \in L(f/G) \Leftrightarrow s \in L(f/G), \sigma \in f(s), s\sigma \in L(G)$.如果语言 K 满足 $\bar{K}\Sigma_u \cap L(G) \subseteq \bar{K}$,则称 K 是可控的.

称状态子集为谓词.对于谓词 P ,引入谓词变换 $wlp_\sigma(P): wlp_\sigma(P)(q) = 1$ 当且仅当 $\delta(\sigma, q) \in P$ 或无定义.称满足 $P \leq wlp_\sigma(P), \sigma \in \Sigma_u$ 的谓词 P 为 Σ_u -不变谓词(其中“ $\leq$ ”为偏序关系“小于或等于”,即 $P_1 \leq P_2 \Leftrightarrow P_1 \wedge P_2 = P_1$.下同).如果记 $Re(G, P)$ 为表示在 G 中从初始状态 q_0 出发经过 P 中的一些状态所到达的那些状态所组成的集合,则称满足 $P \leq Re(G, P) \wedge wlp_\sigma(P)(\sigma \in \Sigma_u)$ 的 P 为可控谓词.由文献[10]可知,可控谓词一定也是 Σ_u -不变谓词.如果 P 不可控,则记 $CP(P) = \{P' \mid P' \in P(Q), P' \leq P, P' \text{ 可控}\}$ 为 P 的可控子谓词集,再由其对任意的析取的封闭性^[10],知其最大元存在,记为 $P^\uparrow = \sup CP(P)$.而称映射 $g: Q \rightarrow \Gamma$ 为DES G 的控制器.对于事件反馈与状态反馈可用以下引理用来描述监控器与控制器的存在性.

引理1^[10] 1) 对给定语言 K ,存在完备的监控器 f 使得 $L(f/G) = K$ 的充分必要条件为 K 是可控的闭语言.

2) 设 P 为 Q 上的谓词, $P(q_0) = 1$,则存在控制器 g 使得 $R(g/G) = P$ 的充分必要条件为 P 是可控谓词.

对于谓词 P ,称 $Le(P) = \{s \in L(G) \mid \forall t \in s, \delta(t, q_0) \in P\}$ 为 P 的合法语言,显然对于任意的谓词 P ,有 $Le(P)$ 闭,且如果谓词 P 是 Σ_u -不变的,则其合法语言 $Le(P)$ 是可控闭的^[10].对于语言 K ,称 $R(K) = \{q \in Q \mid \exists s \in K, \delta(s, q_0) = q\}$ 为 K 的可达谓词,同时若语言 K 是可控闭的,则 $R(K)$ 必是可控谓词.综合以上结论,当谓词 P 是 Σ_u -不变时,则 $R(Le(P)) = P^\uparrow$.而最大可控子谓词与子语言之间,又有 $Le(P^\uparrow) = [Le(P)]^\uparrow$ 成立.

以上的内容是熟知的,也可参见文献[10].

3 状态反馈与在一定条件下的事件反馈的等价关系(Equivalence relation between state feedback and event feedback under some condition)

设 K 为一可控的闭语言,则必存在一个事件反馈 $f \in F_m$,使得 $L(f/G) = K$,其中 F_m 为事件反馈 f 集合,反之亦然.对于 f ,其满足

$$\Sigma_u \cup \{\sigma \in \Sigma_c \mid s\sigma \in K\} \subset f(s) \subset \Sigma_u \cup$$

$$\{\sigma \in \Sigma_c \mid s\sigma \in K \cup (\Sigma^* - L(G))\}.$$

而在 F_m 中总可找到一个控制方案,记为 f^* ,使得 $f^*(s) = \Sigma_u \cup \{\sigma \in \Sigma_c \mid s\sigma \in K \cup (\Sigma^* - L(G))\} = \Sigma_u \cup \{\sigma \in \Sigma_c \mid s\sigma \in \Sigma^* - (L(G) - K)\}, s \in K$. (1)

设 P 为一 Σ_u -不变谓词,则其合法语言 $Le(P)$ 是可控闭的,由上述 f^* 的构造方法,可定义 g^* 使得

$$g^*(s) =$$

$$\Sigma_u \cup \{\sigma \in \Sigma_c \mid s\sigma \in \Sigma^* - (L(G) - Le(P))\}, s \in Le(P).$$

当 $s \in Le(P)$ 时, $s\sigma \in Le(P)$ 与 $\delta(s\sigma, q_0) \in P$ 等价,则有

$$\{\sigma \in \Sigma_c \mid s\sigma \in Le(P) \cup (\Sigma^* - L(G))\} =$$

$$\{\sigma \in \Sigma_c \mid \delta(s\sigma, q_0) \in P \text{ 或无定义}\} =$$

$$\{\sigma \in \Sigma_c \mid wlp_\sigma(P)(q) = 1\}.$$

由此可知 g^* 满足条件

$$\delta(s, q_0) = \delta(t, q_0) \Rightarrow g^*(s) = g^*(t), s, t \in L(g/G), \quad (2)$$

且 g^* 为一状态反馈, 且有

$$g^*(q) = \Sigma_0 \cup \{\sigma \in \Sigma_c \mid wlp_\sigma(P)(q) = 1\}, q \in P. \quad (3)$$

于是可知, 上述状态反馈与满足条件(2)的一个事件反馈是等价的, 故给利用事件反馈的模监控来定义混合模监控提供了理论依据.

定理 1 任给一语言 $K \subset L(G)$, 则存在一状态反馈 g , 使得 $K = L(g/G)$ 的充分必要条件为对某一 Σ_0 -不变谓词 P 有 $K = Le(P)$.

证 必要性. 若存在一状态反馈 g , 使 $K = L(g/G)$, 则 K 是可控闭的. 令 $P = R(g/G) = R(K)$, 则 $P = R(K)$ 是可控的, 即 P 是 Σ_0 -不变的, 且有 $Le(P) = Le(R(g/G)) = L(g/G) = K$ 成立.

充分性. 由 P 是 Σ_0 -不变谓词, 知 $K = Le(P)$ 是可控闭的, 故必存在事件反馈 g , 使得 $K = L(g/G)$. 而对于谓词 P , 又知若 $\forall s, t \in Le(P)$, $\delta_g(s) = \delta_g(t)$, $\sigma \in \Sigma_c$, $s\sigma \in Le(P)$, $t\sigma \in L(G)$, 则有 $\{\sigma \in \Sigma_c \mid s\sigma \in (L(G) - K)\} = \{\sigma \in \Sigma_c \mid t\sigma \in (L(G) - K)\}$, 即 $g(s) = g(t)$, 所以 g 是一状态反馈.

定理 2 设 P 是 Σ_0 -不变谓词, 则存在状态反馈 g 使得 $L(g/G) = Le(P)$, 且可得 $R(g/G) = R(Le(P)) = P^\uparrow$.

证 当 P 是 Σ_0 -不变的, 则由定理 1 知, 存在一状态反馈 g 使得 $L(g/G) = Le(P)$, 所以 $R(Le(P)) = P^\uparrow$, 再由 g 的上述定义, 可知 $R(g/G) = P^\uparrow$, 结论成立.

4 事件反馈与状态反馈的混合模监控

(Mixed modular supervisory control for event feedback and state feedback)

任取谓词 $P \subset Q$, 其最大可控子谓词为 $P^\uparrow$, 则总存在控制器 $g \in \mathcal{S}_s(P)$, 使得 $R(g/G) = P^\uparrow$, 其中 $\mathcal{S}_s(P) = \{g \in \Gamma^Q \mid R(g/G) = P^\uparrow \subseteq P\}$. 再由 $\mathcal{S}_s(P)$ 对析取的封闭性可知 $\mathcal{S}_s(P)$ 中有唯一的最大元, 记为 $g^*(P)$, 且有 $R(g^*/G) = P^\uparrow$. 当 P 是 Σ_0 -不变时, 则有 $R(g^*/G) = P^\uparrow = R(Le(P))$, 其中 $Le(P)$ 是可控的闭语言, 故又有 $Le(P) = [Le(P)]^\uparrow = Le(P^\uparrow)$. 对此状态反馈 g^* 又有 $L(g^*/G) = Le(P^\uparrow) = Le(P) = [Le(P)]^\uparrow$. 所以对于任意的谓词 P , 可设计控制器 g^* , 使得 $L(g^*/G) = Le(P) = [Le(P)]^\uparrow$.

定义 1^[10] 对于语言 K_1, K_2 , 如果

$$\overline{K_1} \cap \overline{K_2} = \overline{K_1} \cap \overline{K_2},$$

则称 K_1 和 K_2 非冲突.

给定语言 K 与谓词 P , 则 $Le(P)$ 是闭的, 如果 K 也是闭的, 则 $\overline{Le(P)} \cap \overline{K} = \overline{Le(P)} \cap \overline{K} \subset \overline{Le(P)} \cap \overline{K}$ 成立, 而 $\overline{Le(P)} \cap \overline{K} \subset \overline{Le(P)} \cap \overline{K}$ 显然成立, 故 $Le(P)$ 与 K 非冲突.

引理 2^[10] 如语言 K_1, K_2 非冲突, 则

$$(K_1 \cap K_2)^\uparrow = K_1^\uparrow \cap K_2^\uparrow.$$

于是下列定理显然成立.

定理 3 设 $K \subset \Sigma^*$, $P \subset Q$, 若 K 是闭的, 则

$$(K \cap Le(P))^\uparrow = K^\uparrow \cap Le(P)^\uparrow.$$

定义 2 给定 DES G 的两个监控器 f, g , 且 g 满足式(2), 从而 g 必为状态反馈的控制器, 则其连接 $h = f \wedge g$ 定义为

$$h(s) = (f \wedge g)(s) = f(s) \wedge g(q).$$

其中 $q = \delta(s, q_0)$.

显然, 在上述的条件下, 有下列等式成立

$$1) L(h/G) = L(f/G) \cap L(g/G);$$

$$2) L_m(h/G) = L_m(f/G) \cap L_m(g/G).$$

由此可得以下定理.

定理 4 给定语言 K 与 Σ_0 -不变谓词 P , 设 f, g 为 K, P 的监控综合与控制综合(以下涉及的控制器的 g 均为上节定义的最大控制器 g^*), 记 $h = f \wedge g$ 为 f 与 g 的连接, 则有

$$L(h/G) = L(f/G) \wedge Le(P) =$$

$$L(f/G) \wedge Le(P^\uparrow) = L(f/G) \wedge Le(R(g/G)).$$

证 当 P 是 Σ_0 -不变谓词时, 由前述可知下式成立:

$$L(g/G) = Le(P^\uparrow) = Le(P), R(g/G) = P^\uparrow.$$

所以 $L(g/G) = Le(P) = Le(P^\uparrow) = Le(R(g/G))$.

在引言中提及的文献[10]中的例 5.3, 可用上述设计方法来控制原系统. 如原系统的 4 个约束条件可改为分别用谓词与语言来描述, 条件 1, 2 仍用文中的谓词 P_1, P_2 描述, 而条件 3, 4 改为用语言 K_1, K_2 来表示, 具体模型可由类似于 3.6 节中的自动机 S_1 的生成语言获得, 再对各约束条件设计模监控器, 如 P_1, P_2 可用上述式(3)设计控制器 g_1, g_2 , 而 K_1, K_2 用式(1)设计监控器 f_1, f_2 , 由其构造方式, 知 g_1, g_2, f_1, f_2 均为可行控制方案中最优的, 故按定义 2 的方式连接 g_1, g_2, f_1, f_2 , 则可得原系统的整体监控器.

5 混合模监控的性质研究 (Study on properties of mixed modular supervisory control)

模监控理论中对子监控器的性质在模监控器中的保持性也进行了研究,主要为非阻塞和无死锁两个方面.本节研究事件反馈与状态反馈的混合模监控的子监控器的性质保持问题.

5.1 非阻塞混合模监控 (Mixed modular supervisory control with nonblocking)

由文献[3,10]可知,对于事件反馈的模监控而言,子监控器的非阻塞性在模监控器中得到保持的一个充分必要条件是使其子系统的闭环行为非冲突.而非冲突条件可由闭语言获得,又由前可知,谓词的合法语言必是闭的,故本文所讨论的混合模监控在获取闭语言(或非冲突语言)更容易些.

定义 3 设 g 为 DES 的控制器,则其也为满足式(2)的一事件反馈的监控器,如果有 $\overline{L_m(g/G)} = L(g/G)$,则称控制器 g 是非阻塞的.

显然,谓词 Q_m 的合法语言 $Le(Q_m)$ 与 G 的标识语言 $L_m(G) = \{s \in L(G) \mid \delta(s, q_0) \in Q_m\}^{[10]}$ 必有 $Le(Q_m) \subseteq L_m(G)$ 成立.

定理 5 给定谓词 P , 设控制器 g 为 P 的控制综合,当 P 是 Σ_u -不变时,如 $P \leq Q_m$,则控制器 g 必是非阻塞的.

证 当 P 是 Σ_u -不变的,由 $P \leq Q_m$,可得 $P \wedge Q_m = P$, 所以

$$\begin{aligned} \overline{L_m(g/G)} &= \overline{L(g/G) \cap L_m(G)} \supseteq \\ \overline{Le(P) \cap Le(Q_m)} &= \overline{Le(P \wedge Q_m)} = \\ \overline{Le(P)} &= Le(P) = L(g/G). \end{aligned}$$

同时, $\overline{L_m(g/G)} \subseteq L(g/G)$ 显然成立,故 $\overline{L_m(g/G)} = L(g/G)$, 即控制器 g 是非阻塞的.

定理 6 给定语言 K 与 Σ_u -不变谓词 P , 设 f, g 为 K, P 的监控综合与控制综合,如果 f, g 是非阻塞的,且 $L_m(f/G)$ 是闭的,则 $h = f \wedge g$ 也是非阻塞的.

证 由于 P 是 Σ_u -不变的,可知 $L(g/G) = Le(P)$. 而

$$\begin{aligned} \overline{L_m(h/G)} &= \\ \overline{L_m(f \wedge g/G)} &= \overline{L_m(f/G) \cap L_m(g/G)} = \\ \overline{L(f/G) \cap L_m(G) \cap L(g/G) \cap L_m(G)} &= \\ \overline{L_m(f/G) \cap L(g/G)} &= \overline{L_m(f/G) \cap Le(P)}, \end{aligned}$$

且显然有

$$\overline{L_m(f/G) \cap Le(P)} \subseteq \overline{L_m(f/G)} \cap \overline{Le(P)}.$$

同时,对于其反向包含又有

$$\begin{aligned} \overline{L_m(f/G)} \cap \overline{Le(P)} &= \\ L_m(f/G) \cap Le(P) &\subseteq \overline{L_m(f/G) \cap Le(P)}, \end{aligned}$$

所以

$$\overline{L_m(f/G) \cap Le(P)} = \overline{L_m(f/G)} \cap \overline{Le(P)},$$

故有

$$\begin{aligned} \overline{L_m(h/G)} &= \overline{L_m(f/G)} \cap \overline{Le(P)} = \\ L(f/G) \cap Le(P) &= \\ L(f/G) \cap L(g/G) &= L(h/G). \end{aligned}$$

因此 $\overline{L_m(h/G)} = L(h/G)$, 即 $h = f \wedge g$ 是非阻塞的. 证毕.

由于当 $Q_m = Q$ 时,恒有 $P \leq Q_m$, 即控制器 g 恒是非阻塞的,故有以下推论.

推论 1 对于 DES $G = (Q, \Sigma, \delta, q_0, Q)$, 给定 Σ_u -不变谓词 P 与语言 K , 设 f, g 为 K, P 的监控综合与控制综合,如果 f 是非阻塞的,且有 $L_m(f/G)$ 是闭的,那么 $h = f \wedge g$ 也是非阻塞的.

以下推论针对两个状态反馈的连接.

推论 2 对于 DES $G = (Q, \Sigma, \delta, q_0, Q_m)$, 给定两个 Σ_u -不变谓词 P_1, P_2 , 设 g_1, g_2 为 P_1, P_2 的控制综合,如 $P_1, P_2 \leq Q_m$, 则 g_1, g_2 的连接 $g = g_1 \wedge g_2$ 必是非阻塞的.

5.2 无死锁混合模监控 (Mixed modular supervisory control with deadlock-free)

对于闭语言 $K \subset L(G)$, 如果 $\forall s \in K: 1) \exists \sigma \in \Sigma_c$, 使得 $s\sigma \in K$; 2) 或者 $\exists \beta \in \Sigma_u$, 使得 $s\beta \in L(G)$. 则称语言 K 是无死锁的^[7]. 而对于语言 $K_i \subset L(G) (i = 1, 2)$, 如果 $\forall s \in K_1 \cap K_2$, 有 $\Sigma_{K_1}(s) \cap \Sigma_{K_2}(s) \neq \phi$, 称 (K_1, K_2) 是 d -不变的^[7]. 文献[7]就是在此基础上给出了事件反馈的模监控器无死锁的充要条件是两子监控器是 d -不变的. 而对于状态反馈 g , 如果: 1) $\forall q \in R(g/G), \exists \sigma \in \Sigma_c$, 使得 $\delta_g(\sigma, q)!$ (δ_g 为 g/G 的状态转移函数); 2) 或者 $\forall q \in R(g/G), \exists \sigma \in \Sigma_u$, 使得 $\delta(\sigma, q)!$. 则称 g/G 是无死锁的^[9]. 同时, 文献[9]通过引入自动机的 d -不变关系, 给出了模控制器无死锁的充分必要条件是两子控制器下的闭环子系统是 d -不变的. 以下, 本文结合文献[7,9]给出了混合模监控无死锁所需满足的条件.

定理 7 设谓词 P 是 Σ_u -不变的, 则 $Le(P)$ 是无死锁的充分必要条件为 g/G 是无死锁的, 其中控制器 g 为 P 的控制综合.

证 充分性. 因为 g/G 是无死锁的, 且谓词

P 是 Σ_u -不变的, 故 $\forall q \in R(g/G) = P^\uparrow = R(Le(P))$, 则必有以下两式之一成立:

1) $\exists \sigma \in \Sigma_c$, 使得 $\delta_g(\sigma, q)!$, 且有 $\delta_g(\sigma, q) \in R(g/G) = P^\uparrow \subset P$.

2) $\exists \sigma \in \Sigma_u$, 使得 $\delta(\sigma, q)!$, 且有 $\delta(\sigma, q) \in R(g/G) = P^\uparrow \subset P$.

而由 $R(g/G)$ 与 $Le(P)$ 中元素的对应关系, 可知 $\forall q \in R(g/G)$ 使得式 (1), (2) 成立可转化为 $\forall s \in Le(P)$ 有 $q = \delta(s, q_0) \in R(Le(P))$ 使得式 (1), (2) 成立.

又由式 (1) 知, 当 $\sigma \in \Sigma_c$ 时, 有 $\delta_g(\sigma, q)!$, 且有 $g(q)(\sigma) = 1$, 即 $\delta(\sigma, q_0)!$, 且还有 $\delta(\sigma, q_0) \in P$, 所以 $\sigma \in Le(P)$, 故此时 $Le(P)$ 是无死锁的.

由式 (2) 知, 当 $\sigma \in \Sigma_u$ 时, 有 $\delta(\sigma, q)!$, 即 $\delta(\sigma, q) = \delta(\sigma, q_0)$, 知 $\delta(\sigma, q_0)!$, 且 $\delta(\sigma, q_0) \in P$, 所以 $\sigma \in Le(P)$, 故此时 $Le(P)$ 是无死锁的. 充分性得证.

必要性. 对于谓词 P , 必存在状态反馈 g 使得 $R(g/G) = P^\uparrow$, 且有 $L(g/G) = Le(P^\uparrow)$.

由谓词 P 是 Σ_u -不变的, 可知 $Le(P)$ 是可控闭的, 且有 $R(g/G) = P^\uparrow = R(Le(P))$, 所以 $L(g/G) = Le(P^\uparrow) = [Le(P)]^\uparrow = Le(P)$ 是可控闭的.

由 $Le(P)$ 是无死锁的可知, $\forall s \in Le(P)$, $\exists \sigma \in \Sigma$, 使得 $\sigma \in Le(P)$, 即 $\delta(\sigma, q_0)!$, 且 $\delta(\sigma, q_0) \in P$, 记 $q = \delta(s, q_0)!$, 则有 $q \in R(Le(P)) = R(g/G)$, 而由 s 的任意性, 及 $R(Le(P))$ 的定义知上述结果可转变为 $\forall q \in R(Le(P)) = R(g/G)$, $\exists \sigma \in \Sigma$, 使得 $\delta(\sigma, q)!$, 且 $\delta(\sigma, q) \in P$.

当 $\sigma \in \Sigma_c$ 时, 有 $\delta(\sigma, q)!$ 及 $q \in P$ 是 Σ_u -不变的, 知 $wlp_g(P)(q) = 1$, 即 $\sigma \in g(q)$, 故有 $\delta_g(\sigma, q)!$, 可知 g/G 是无死锁的.

当 $\sigma \in \Sigma_u$ 时, 有 $\delta(\sigma, q)!$, 可知 g/G 是无死锁的. 从而必要性得证.

下述定理给出了无死锁混合模语言存在的充分必要条件.

定理 8 给定 DES G 、语言 K 与谓词 P , 设 P 是 Σ_u -不变的, 则 $Le(P)^\uparrow \cap K^\uparrow = (Le(P) \cap K)^\uparrow$ 的充分必要条件为 $(Le(P)^\uparrow, K^\uparrow)$ 是 d -不变的, 其中 $K^\uparrow$ 为 K 的最大可控闭的无死锁子语言^[7].

此定理可由如下引理及 P 的 Σ_u -不变性得到.

引理 3 ^[7] 设给定语言 $L_1, L_2 \subset L(G)$, 则

$(L_1 \cap L_2)^\uparrow = L_1^\uparrow \cap L_2^\uparrow$ 的充分必要条件为 $(L_1^\uparrow, L_2^\uparrow)$ 是 d -不变的.

定义 4 设子监控器 f 和子控制器 g , 如 $\forall s \in L(f/G) \cap L(g/G)$, 有 $f(s) \cap g(q) \neq \emptyset$, 则称 (f, g) 是 d -不变的, 其中 $q = \delta(s, q_0)$.

由上述定义以及定理 8, 可得以下定理.

定理 9 给定 Σ_u -不变谓词 P 及语言 K , 如 K, P 的监控综合与控制综合的子监控器 f 和子控制器 g 均是完备的、无死锁的, 则 $h = f \wedge g$ 是完备的、无死锁的当且仅当 (f, g) 是 d -不变的.

6 结论(Conclusion)

模监控的一个特征就是可以独立地修改系统的某一子任务, 如前所提到的文献[10]中的例 5.3, 将子任务 K_1, K_2, P_1, P_2 改为 K_1, K_2, P'_1, P_2 , 只需将 P_1 所对应的控制器 g_1 改为 P'_1 所对应的控制器 g'_1 , 然后进行连接即可, 而不需改动整体.

本文主要考虑了当系统的子任务分别用语言及谓词来表示时的混合模监控的情况, 利用状态反馈在一定的条件下可以转化为事件反馈的理论, 将事件反馈与状态反馈进行连接, 使其合成为一个事件反馈, 用来控制整个系统. 在此基础上, 进一步讨论了混合模监控的另一特征: 混合模监控对子监控器和子控制器的非阻塞性与无死锁性的保持.

参考文献(References):

- [1] RAMADGE P J, WONHAM W M. Supervisory control of a class of discrete event processes [J]. *SIAM J of Control and Optimization*, 1987, 25(1): 206-230.
- [2] WONHAM W M, RAMADGE P J. On the supremal controllable sublanguage of a given languages [J]. *SIAM J of Control and Optimization*, 1987, 25(3): 637-659.
- [3] WONHAM W M, RAMADGE P J. Modular supervisory control of discrete event systems [J]. *Mathematics of Control, Signals and Systems*, 1988, 1(1): 13-34.
- [4] CHEN Y L, LAFORTUNE S, LIN F. Design of nonblocking modular supervisory using event priority functions [J]. *IEEE Trans of Automatic Control*, 2000, 45(3): 432-452.
- [5] 陈启宏, 费树岷, 王笑峡. 离散事件系统非阻塞模块监控器设计 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2002, 32(2): 206-210.
(CHEN Qihong, FEI Shumin, WANG Xiaoxia. Design of nonblocking modular supervisors of discrete event systems [J]. *J of Southeast University (natural science edition)*, 2002, 32(2): 206-210.)
- [6] FABIAN M, KUMAR R. Mutually nonblocking supervisory control of discrete event systems [J]. *Automatica*, 2000, 36(12): 1863-1869.
- [7] LI Y H. On deadlock-free modular supervisory control of discrete-event systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1997, 42(12):

1705 - 1708.

- [8] RAMADGE P J, WONHAM W M. Modular feedback logic for discrete event system [J]. *SIAM J of Control and Optimization*, 1987, 25(5): 1202 - 1218.

- [9] 李勇华. 离散事件系统的无死锁模块化状态反馈控制[J]. 控制理论与应用, 1993, 10(5): 582 - 588.

(LI Yonghua. Deadlock-free modular state feedback control of discrete event systems [J]. *Control Theory & Applications*, 1993, 10(5): 582 - 588.)

- [10] 徐国华, 胡奇英. 离散事件动态系统的监控理论[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1994.

(XU Guohua, HU Qiying. *Theory on Supervisory Control of Discrete Event Dynamical Systems* [M]. Zhengzhou: Henan Press of Science & Technology, 1994.)

作者简介:

王 飞 (1977 —), 男, 西安交通大学控制科学与工程专业博士研究生, 主要研究方向为离散事件系统的监控理论, E-mail: feiw545@163.com;

胡奇英 (1965 —), 男, 上海大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为离散事件系统的监控理论、供应链管理等, E-mail: huqiying@sina.com.

中国自动化学会第20届青年学术年会(YAC'2005)

征 文 通 知

中国自动化学会青年学术年会是由中国自动化学会青年工作委员会组织召开的全国性学术会议, 每年举办一次, 其宗旨是为自动化领域的青年专家学者、研究生以及工程技术人员提供一个学术交流的机会, 推动我国自动化理论、技术与应用的发展. 自1985年首届年会召开以来, 已走过了近20年的历程. 第20届中国自动化学会青年学术年会(YAC'2005)将于2005年8月21日~24日在北京召开. 本次会议由中国自动化学会、中国自动化学会青年工作委员会主办, 中国科学院自动化研究所, 中科院复杂系统与智能科学重点实验室承办. 借此机会, 我们热忱欢迎各位同仁莅临本届年会. 会议设有优秀理论论文奖和优秀应用论文奖.

一、征文范围

- | | |
|--|-----------------|
| S1 系统与控制理论、大系统、非线性系统、稳定性与镇定 | S13 数据融合与软测量 |
| S2 自适应、预测、变结构控制、优化控制、鲁棒控制与 H_∞ 控制 | S14 传感器与检测技术 |
| S3 模糊系统与控制、神经网络与控制、人工智能与专家系统、学习控制 | S15 仿真与控制系统CAD |
| S4 系统建模、辨识与估计 | S16 CIMS与制造系统 |
| S5 故障诊断与容错控制 | S17 智能演化计算 |
| S6 复杂性 with 复杂系统 | S18 分布式控制系统 |
| S7 智能机器人与机器人控制 | S19 系统工程理论与方法 |
| S8 混杂系统与DEDS、调度与决策 | S20 智能交通系统 |
| S9 机器视觉、图像处理、模式识别 | S21 自动化指挥系统 |
| S10 智能仪表、过程控制系统 | S22 社会经济系统与控制 |
| S11 电力系统及其自动化 | S23 计算机软硬件技术及应用 |
| S12 电机驱动与运动控制 | S24 其他 |

二、征文要求

1、会议录用论文将收入正式出版的系列丛书《自动化理论及应用》(卷12), 论文应具有一定的学术或实用价值, 未在国内外学术期刊或会议发表过; 2、投稿可直接寄至YAC'2005组委会, 也可通过E-mail. 直接邮寄论文需一式二份. 格式参照《自动化学报》; 3、投稿时请注明文章所属的研究方向(见征文范围), 请说明联系作者的详细通讯地址、电话及电子邮件信箱; 4、请奖论文在投稿时注明, 其第一作者年龄不应超过40周岁.

三、重要日期

提交论文的截止日期: 2005年4月15日; 录用通知日期: 2005年5月15日

四、投稿地址

北京市海淀区中关村东路95号, 中科院自动化所 复杂系统与智能科学实验室

YAC'2005 组委会收 邮政编码: 100080

联系人: 郁文生 关 强

电话/传真: 010-82619580 E-mail: yac05@ia.ac.cn