

信息流变结构控制

林怡青¹, 毛宗源²

(1. 广东工业大学 机电工程学院, 广东 广州 510090; 2. 华南理工大学 自动控制工程系, 广东 广州 510640)

摘要: 研究通过信息流变结构控制方法实现对系统的信息结构进行实时切换的问题. 提出信息流变结构控制系统所要满足的条件, 提出、论证和实现了一种满足信息流变结构控制基本条件的控制系统框架, 并对试验结果进行了分析. 通过信息流方向的切换可以定义不同的信息处理关系, 重组信息处理网络, 获得不同的系统功能.

关键词: 信息流控制; 信息结构; 变结构控制; 多 agent 系统

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Variable structure control of information flows

LIN Yi-qing¹, MAO Zong-yuan²

(1. Department of Mechanical & Electronic Engineering, Guangdong Polytechnic University, Guangdong Guangzhou 510090, China;

2. Department of Automatic Control Engineering, South China University of Technology, Guangdong Guangzhou 510640, China)

Abstract: Real time switching of the system structure by method of variable structure control of information flows is studied. Conditions for variable structure control systems of information flows are proposed. A system frame work which satisfies the conditions is proposed, proved and implemented. Data of the experiment is analyzed. By changing the directions of the flows, different information process relationships can be defined, the information process networks reconstructed, and different system performances are thus displayed.

Key words: information-flow control; information structure; variable structure control; multi-agent system

1 引言(Introduction)

人们熟知的变结构控制是指物理变量的控制过程中, 通过控制律的切换获得所需要的性能品质. 变结构控制无论从思想方法上还是在实际应用上都对物理系统的控制产生了深远的影响. 对于非结构化环境下的复杂受控系统, 控制要求通常是多层次多目标的, 不仅涉及多种物理变量的控制, 而且需要处理大量不同形式的数据和信息. 信息处理构成此类系统的上层结构, 由信息处理的结果决定如何对物理变量进行控制. 复杂系统的性能很大程度上依赖于信息处理过程, 对系统信息结构的控制进行研究, 其必要性是显然的.

人们日常接触的系统都是信息流结构固定的系统, 例如在机器人领域中, 比较典型的有层次结构^[1]和包容结构^[2]. 在层次结构(hierarchical)中, 信息流是纵向流动的, 上层进行推理和规划, 下层对执行机构进行控制, 对应下棋、作画等一类需要深思熟虑的场合; 而包容结构(subsumption)中信息是横向流动的, 系统的行为由一系列感知-动作对(perception-ac-

tion)组成, 特别适合打球、驾驶等一类快速反应场合. 那么, 能够适应多种作业环境的高级机器人, 其信息结构就必须是可变的, 不同的结构是要能够实时切换的.

信息结构固定的系统仅适用于其结构所能包容的范围, 通过改变系统的信息结构可以大大提高其适应非结构化需求的能力. 对信息结构进行控制是尚未得到充分研究的问题. 类似的讨论可以追溯两类专题: 一是故障恢复, 在硬件发生故障时, 系统降级使用或启动备用设备, 伴随信息流方向的改变; 二是问题求解系统^[3], 由于要解决的问题不同, 启用不同的求解模块, 伴随信息流方向的改变. 在这些系统中, 信息流的变化是由于参与系统运行的模块发生变化而引起的, 模块之间的调用关系和信息处理关系没有改变. 本文提出的信息流变结构控制是指以获得不同的系统功能为目标, 通过改变模块之间的信息处理关系, 对系统信息结构施行的实时切换. 这种切换可以改变也可以不改变参与运行的模块群体.

2 信息流变结构控制系统的基本条件(Basic conditions for variable structure control of information flow systems)

在结构固定的系统中,各模块的目的、任务是固定的,它们之间通过调用关系由确定的信息结构连接在一起,实现系统的整体功能.在这样的系统框架下,信息结构作为系统定义的组成部分是不允许改变的,改变的是调用过程的参数值.而信息流变结构控制系统的功能主要是由信息处理网络的结构来定义的.显然,从固定的信息流到可变的信息流涉及的不仅仅是信息流本身的变化,还牵涉到模块结构和系统整体结构的变化、模块功能的综合等问题.首先要回答的问题是,什么样的系统可以实现信息流变结构控制?

条件 1 信息流变结构控制系统的功能由信息流结构定义.

条件 1 同时保证了系统中的每一种信息结构都具有确定的语义.在信息流变结构控制系统中,模块的输入、输出信息流动方向必须能够实时切换,这就要求各模块具有接收选择功能.

条件 2 信息流变结构控制系统由一系列自主单元构成,这些单元具有某种内部功能,可以与外界通讯并能对输入信息进行选择.

由条件 2 定义的自主单元与通常说的智能体(agent)的定义相符.条件 2 对应的是每一个 agent 的输入信息选择,但是从系统整体考虑,同时蕴含了各 agent 输出信息流的方向变化.由一系列 agent 组成的系统能够按照特定的指令改变系统的信息结构还必须要有硬件方面的支持.

条件 3 信息流变结构控制系统的硬连接对其系统功能是连通的.

条件 3 保证了每一种信息结构中的每一条信息通道都是畅通的.

以上是本文提出的关于信息流变结构控制系统组成的三个基本条件.满足这三个条件的系统可以在其上设计各种控制算法,实现信息流变结构控制系统的控制.

3 信息流变结构系统的控制(Control of variable structure of information flow systems)

在非结构化环境中,信息的产生、传递和处理是不可预知的一系列离散事件.信息流控制系统属于一类离散事件动态系统,可采用离散事件动态系统的监控理论^[4]作为理论工具.在该理论中,离散事件动态系统用自动机模型 $G = (Q, \Sigma, \delta, q_0, Q_m)$ 描

述.其中 Σ 为事件集, $\Sigma = \Sigma_c \cup \Sigma_u$, Σ_c 是能控事件集, Σ_u 是不能控事件集, Q 为状态集, $\delta: Q \times \Sigma \rightarrow Q$ 为状态转移函数, q_0 为初始状态, Q_m 为标识状态集.确定系统控制特性的主要因素是 δ 在 Q 和 Σ 上的转移关系,由 δ 产生的语言描述系统的自由运行特征,记为 $L(G)$.

自主单元的功能各不相同,最主要的共性是在满足基本条件 2 的前提下,运行必须无阻塞、能控,监控器必须完备.本文仅提出、论证并通过实验验证一种单元结构及监控器.定义有限自动机

$$G = (Q, \Sigma, \delta, q_0, Q_m).$$

其中 $Q = \{A, B, C\}$, $Q_m = \{A\}$, $q_0 = A$, $\Sigma = \Sigma_c \cup \Sigma_u$, $\Sigma_c = \{a, c, d, e\}$, $\Sigma_u = \{b, f\}$. 状态转移函数为

$$\begin{aligned} \delta(A, a) &\rightarrow B, \delta(A, d) \rightarrow C, \delta(B, c) \rightarrow B, \\ \delta(B, b) &\rightarrow A, \delta(C, e) \rightarrow C, \delta(C, f) \rightarrow A. \end{aligned}$$

以该自动机为单元模型有如下命题(有关无阻塞、能控、监控器存在性、完备等定义请参见文献[4]):

命题 1 G 无阻塞(证明略).

命题 2 G 对于控制指标 $K = (ac^+ b)^*(de^+ f)^*$ 能控,上标 + 表示相应的事件至多发生一次.

证 引入 Σ^* (Σ 上所有有限串组成的集合)上的等价关系

$$R = \{(s, s') \mid q(s) = q(s'), s \in \Sigma^*\}.$$

其中 $q(w)$ 是经历了事件串 w 后到达的状态,则 $(K$ 的闭包) $\bar{K}$ 划分为等价类

$$(ac^+ b)^*(de^+ f)^*, (ac^+ b)^*(de^+ f)^* ac^+$$

和

$$(ac^+ b)^*(de^+ f)^* de^+.$$

对于等价类 $(ac^+ b)^*(de^+ f)^*$, 有

$$(ac^+ b)^*(de^+ f)^* b \cap L(G) = \emptyset \text{ (空集)}$$

和

$$(ac^+ b)^*(de^+ f)^* f \cap L(G) = \emptyset.$$

对于等价类 $(ac^+ b)^*(de^+ f)^* ac^+$, 有

$$(ac^+ b)^*(de^+ f)^* ac^+ b \cap L(G) \subseteq \bar{K}$$

和

$$(ac^+ b)^*(de^+ f)^* ac^+ f \cap L(G) = \emptyset.$$

对于等价类 $(ac^+ b)^*(de^+ f)^* de^+$, 有

$$(ac^+ b)^*(de^+ f)^* de^+ f \cap L(G) \subseteq \bar{K}$$

和

$$(ac^+ b)^*(de^+ f)^* de^+ b \cap L(G) = \emptyset.$$

因此, G 和 K 满足 $\bar{K}\Sigma_u \cap L(G) \subseteq \bar{K}$, 根据能控性定义, K 对于 G 能控.

命题 3 存在使 $L(f/G) = K$ 的监控器 f .

按照命题 2 类似的证明方法, 易于证明 $\bar{K} \cap$

$L_m(G) = K$. 因而存在相应的监控器.

本文提出监控器 $\Psi = (S, \varphi)$, S 是有限自动机 $S = (X, \Sigma, \xi, x_0, X_m)$, 其中状态集

$$\begin{aligned} X &= \{A, B, C, D, E\}, x_0 = A, X_m = \{A\}, \\ \xi(A, a) &\rightarrow B, \xi(A, d) \rightarrow C, \xi(B, c) \rightarrow D, \\ \xi(B, b) &\rightarrow A, \xi(D, b) \rightarrow A, \xi(C, e) \rightarrow E, \\ \xi(C, f) &\rightarrow A, \xi(E, f) \rightarrow A; \end{aligned}$$

φ 对 Σ_c 上的事件进行控制, $\varphi(B, c) \rightarrow \{0, 1\}$, $\varphi(C, e) \rightarrow \{0, 1\}$, $\varphi(A, a) \rightarrow \{0, 1\}$, $\varphi(A, d) \rightarrow \{0, 1\}$.

可以有如下命题:

命题 4 ψ 无阻塞(证明略).

命题 5 ψ 是完备的.

证 闭环系统 S/G 的运行特性为:

$$L(S/G) =$$

$$(ac^+b)^*(de^+f)^*(ac^+ + de^+ + \varepsilon) = L(G).$$

引入 Σ^* 上的等价关系 R (参见命题 2) 把 $L(S/G)$ 划分为 5 个等价类:

$$\begin{aligned} &(ac^+b)^*(de^+f)^*, (ac^+b)^*(de^+f)^*a, \\ &(ac^+b)^*(de^+f)^*ac, (ac^+b)^*(de^+f)^*d \end{aligned}$$

和

$$(ac^+b)^*(de^+f)^*de.$$

对于等价类 $(ac^+b)^*(de^+f)^*$, 有

$$\varphi(q((ac^+b)^*(de^+f)^*), a) = 1$$

使

$$(ac^+b)^*(de^+f)^*a \in L(S/G);$$

$$\varphi(q((ac^+b)^*(de^+f)^*), d) = 1$$

使

$$(ac^+b)^*(de^+f)^*d \in L(S/G).$$

对于等价类 $(ac^+b)^*(de^+f)^*a$, 有

$$\varphi(q((ac^+b)^*(de^+f)^*a), c) = 1$$

使

$$(ac^+b)^*(de^+f)^*ac \in L(S/G).$$

对于等价类 $(ac^+b)^*(de^+f)^*d$, 有

$$\varphi(q((ac^+b)^*(de^+f)^*d), e) = 1$$

使

$$(ac^+b)^*(de^+f)^*de \in L(S/G).$$

对于等价类 $(ac^+b)^*(de^+f)^*ac$ 和 $(ac^+b)^*(de^+f)^*de$ 不存在

$$\varphi(q((ac^+b)^*(de^+f)^*ac), \sigma) = 1$$

和

$$\varphi(q((ac^+b)^*(de^+f)^*de), \sigma) = 1$$

的事件 σ , 根据完备性定义, 命题得证.

4 实验分析(Experiment and analysis)

为简化叙述, 考虑一个由 5 个 agent 和 3 种信息

流结构(图 1)组成的系统. 采用总线连接, 每一个 agent 可以与其他任意 agent 通信, 故满足连通条件. 各 agent 在每次执行内部功能之前首先要检测新的信息流切换指令是否到达, 故符合条件 2 的约束, 可以按照第 3 节所述的结构进行设计. 对于每一个 agent, 事件 a_i 是对信息流切换指令的响应, c_i 是修改输入控制表, b_i 是输入控制切换完成, 事件 d_i, e_i, f_i 是内部功能的运行.

设 agent 1 能进行开平方运算, agent 3 能进行平方运算, agent 2 能进行乘法运算, agent 4 能进行加法运算, agent 0 只有一种功能, 读取特定的信息, 生成并发布原始数据. 这些功能是固定的, 在不同的信息结构下组成不同的信息处理网络, 产生不同的输出.

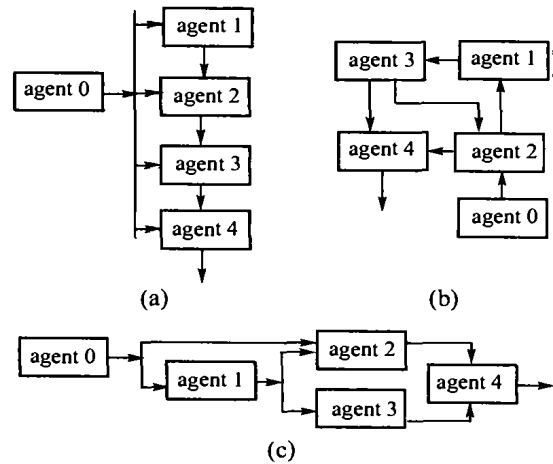


图 1 3 种结构

Fig. 1 Three structures

系统的集中控制指令由 8 位二进制数组成. 前 3 位是对象标识, 000 至 100 标识 agent 0 至 agent 4, 111 标识所有 agent, 其余冗余. 随后 4 位是控制码, 0000 表示暂停, 1111 表示开始; 其余定义如下: 对 agent 0 来讲表示所要发布的原始数据, 对其余 agent 来讲表示输入控制码. 最后一位是校验码. 以 agent 1 的输入控制码为例(见图 2), “1000”表示输入 agent 0 所发布的信息, 对其余信息不予理会, 代表 agent 1 在结构(a)和(c)下工作的情况, “0100”表示仅接受 agent 2 的信息, 代表结构(b)下的工作情况, 其余类推. Agent 1, 2, 3, 4 在接受暂停指令后结束正在执行的功能, 把运算器和输入/输出存储器清零, 在接受输入控制指令后根据输入控制码进行信息流方向的切换, 接受开始指令后按照当前信息结构运行. Agent 0 只读取发送给它的信息数据, 并不断地发布该数据, 直到新的数据到达. 某次运行的指令流是:

1110000*[1]0000100*0011000*0101100*

0110010*1001001*[2]1111111*[3]1110000*[4]

0110100*1000011*[5]1111111*[6]1110000*[7]
 0010100*0101010*[8]1111111*[9]1110000*[10]
 0011000*0101010*0110100*1001010*[11]1111111*
 [12]1110000*[13]1001001*[14]1111111*[15].

其中 * 表示校验码, $[x]$ 表示第 x 次延时. 在第 3, 6, 9, 12, 15 次延时期间对各 agent 的输出进行检验, 结果如表 1.

	0	2	3	4	
agent 1	1	0	0	0	(a) (c)
	0	1	0	0	(b)

图 2 输入控制表

Fig. 2 Table of input control

易于检验表中的数值符合相应结构所定义的信息处理过程. 特别要说明的是, 表中 $x = 3$ 和 $x = 12$ 对应同一种信息流结构, 区别是 agent 2 和 agent 3 的位置互换了; 而 $x = 15$ 虽然对应同一类结构, 但 agent 2 被隔离了, 不参加协作. 由此可见, 在同一类信息流结构下 agent 可以有不同的岗位指派, 从而产生不同类型的协作.

表 1 试验数据

Table 1 Data of experiment

x	agent 0	agent 1	agent 2	agent 3	agent 4	对应的结构
3	4	2	8	64	68	图 1(a)
6	4	2	8	4	12	图 1(c)
9	4	0	0	0	0	图 1(b)
12	4	2	16	4	20	图 1(a)
15	4	2	8	4	8	图 1(a)

5 结束语(Conclusion)

本文明确提出信息流变结构控制问题, 提出信息流变结构控制系统的基本条件, 提出并论证了一种信息流变结构控制系统方案, 通过实验验证了该方案的可行性. 信息流变结构控制不仅包含了启用不同的模块实现不同功能的传统方法, 而且可以通过改变模块之间的信息处理关系获得更丰富的系统功能, 从而赋予系统更广阔的应用空间和更灵活的应变能力.

参考文献(References):

- [1] ALAMI A, CHATILA R, FLEURY S, et al. An architecture for autonomy [J]. *Int J of Robotics Research*, 1998, 17(4): 315 - 337.
- [2] ZHANG Bo. Combination of traditional AI and control technique [J]. *Control Theory & Applications*, 1994, 11(2): 247 - 250 (in Chinese).
- [3] KEITH S D. Distributed problem-solving techniques: a survey [J]. *IEEE Trans Systems, Man, and Cybernetics*, 1987, 17(5): 729 - 739.
- [4] RAMADGE P J, WONHAM W M. The control of discrete event systems [J]. *Proceeding of the IEEE*, 1989, 77(1): 81 - 97.

作者简介:

林怡青 (1951 —), 女, 博士, 教授. 研究领域: 机器人学, 复杂系统控制, 计算机网络. Email: linyq@163.net;

毛宗源 (1936 —), 男, 教授, 博士生导师. 1961 年毕业于大连理工大学工业自动化专业. 发表论文 100 多篇. 目前研究方向: 现代控制理论与应用, 电力电子技术.