第 23 卷第 5 期
2006 年 10 月

控 制 理 论 与 应 用
Control Theory & Applications

Vol. 23 No. 5
Oct. 2006

文章编号：1000−8152(2006)05−0756−07

基于事件的设计与控制技术及其在机器人系统中的应用

路 飞[1], 宋沐民[1], 田国会[1], 席 宁[2], 康 伟[3]

(1. 山东大学 控制科学与工程学院, 山东 济南 250061;

2. 密歇根州立大学 电子与计算机工程学院, 美国 密歇根州; 3. 海军研究生院 数学系, 美国 加利福尼亚)

摘要: 基于事件的设计与控制技术已经引起人们的广泛关注, 其基本思想就是引入与系统输出相关的运动参考变量 (action reference), 在任意时刻使系统给定量的输入以及系统的设计都转化为这个参考变量的函数, 使系统的设计部分与控制器一样成为系统的决策部件, 从而使系统具备处理突发性、不确定性事件的能力, 可以根据系统的实际输出来实时、自动地调整系统的输入, 实现对系统的实时控制. 机器人系统是一个智能控制系统, 机器人间的协调协作是其智能性的主要表现. 本文首先对基于事件的控制理论及其发展做了回顾, 然后介绍了基于事件的控制技术在机器人队形保持、机器制造、多机器人协作等系统智能控制中的应用, 实验证明该方法可以取得很好的智能控制效果, 提高系统的控制性能. 最后探讨了这一研究领域的发展方向.

关键词: 基于事件; 运动参考变量; 决策部件; 突发性、不确定事件

中图分类号: TP273　　**文献标识码**: A

Event-based planning and control technology and the application in robotic system

LU Fei[1], SONG Mu-min[1], TIAN Guo-hui[1], XI Ning[2], KANG Wei[3]

(1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan Shandong 250061, China;
2. Department of Electrical and Computer Engineering, Michigan State University, East Lansing MI 48824, USA;
3. Mathematics Department, Naval Postgraduate School, Montery CA 93943, USA)

Abstract: There is a growing interest in the technology of event-based planning and control. The basic idea is to introduce a new action reference variable related to the output of the system, by which the desired input and the plant are parameterized. The designer can adjust and modify the original plant in real time to generate the desired system input according to the system output and sensory information. Therefore the planning becomes a decision component and has the ability to deal with unexpected or uncertain events. The input can be adjusted automatically by the output for the realization of the control on real time. Robotic system is an intelligent system, its main character is the coordination among multiple robots. In the paper, the event-based control theory and its development are reviewed. Its application in formation of moving robots, in manufacturing system and the coordination of multi-robot are introduced. The experiment shows that the event-based planning and control technology can improve the performance of these systems. Finally, the future research directions are discussed.

Key words: event-based; action reference; decision component; unexpected and uncertain event

1 引言(Introduction)

反馈控制是控制系统中最基本的控制方式, 系统的决策部件是控制器, 核心是反馈环. 正是由于反馈环的的存在, 才使系统具备稳定性、鲁棒性和可执行性. 由于控制任务一般是预先给定的, 所以整个设计过程是离线的, 并且设计方案为时间的函数, 设计者按照最初的设计方案给出被控对象的期望输入值, 在系统的设计与控制过程中, 设计部分相当于用于保存预定方案的存储部件. 当系统运行在复杂环境中或在运行过程中遇到最初的设计没有考虑到的突发事件时 (如机器人运行中遇到障碍物), 只能依靠反馈环来处理此类情况, 实践证明单独靠控制器很难满足系统的性能指标, 尤其在多机器人控制系统中更加突出.

收稿日期: 2005−09−08; 收修改稿日期: 2005−03−22.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60104009).

近10年来, 人们不断地改进设计过程和控制器, 从而实现对系统的智能控制, Saridis在文[1] 中提出了用3层 Hierarchy 来设计控制器和规划过程, Albus, Zeigler 等人在文[2, 3] 中也提出了各种不同类型的智能规划和控制方案. 他们的基本思想是对传统的设计控制系统加入监视器, 当系统在运行过程中遇到诸如外部干扰、系统元件故障等突发性离散事件时, 可以重新设计控制方案或将其转入预定的其他方案.

但是对于许多高速运行的系统而言, 在不了解突发性事件性质的前提下, 很难重新设计控制方案, 即便能够重新设计控制方案, 也往往满足不了系统对实时性的要求, 而且预先设计的其他备用方案又很难与突发的事件相一致; 当系统运行过程中发生连续型突发事件时, 监视器往往不能及时将其监测出来,这就降低了系统的精确度; 并且这些方法一般是基于启发式技术设计的, 其实现需要花费相当的时间, 具有局限性. 所以必须要设计一种控制方法, 不但能监测出突发性的离散事件和连续事件, 而且能够实时地调整和修改最初的设计方案, 使系统以尽快的速度恢复正常运行机制, 取得满意的性能指标.

2　基于事件的设计与控制技术(Event-based planning and control technology)

2.1　基于事件的设计与控制理论简介(Introduction to event-based planning and control theory)

基于事件的设计与控制理论的基本思想是在系统中引入一个不同于时间t的新的运动参考变量, 这个变量与系统的输出直接相关. 在任意时刻系统期望的输入以及系统的设计都是这个参考变量的函数. 参考变量能将传感器所检测到的系统的输出信息及时地反馈给系统的设计者, 用以及时调整或修改最初的设计规划以获得期望的输入, 从而达到期望的输出. 因此, 任意时刻, 可以根据系统的输出实时地调整或修改设计, 这就使系统的设计成为一个实时的、闭环的过程, 而不是离线地来进行设计.

传统的控制系统和基于事件的控制系统结构如图 1, 2 所示.

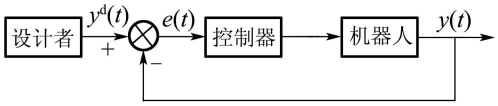

图 1　传统的控制系统

Fig. 1　Traditional planning and control system

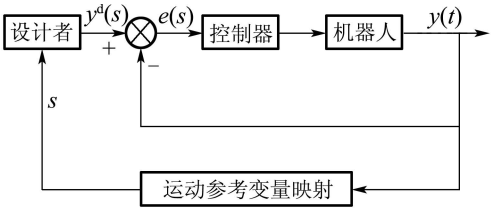

图 2　基于时间的控制系统

Fig. 2　Event-based planning and control scheme

在图 2 中, 运动参考变量映射模块的功能是根据所测量系统输出量的值来计算出当前与之相对应的参考变量的数值. 设计者根据参考变量的值来重新确定系统的期望输入. 从系统的角度而言, 很明显, 此时设计过程也具备了决策的性能. 当系统在运行过程中遇到突发事件时, 设计过程不是处于一种被动状态, 而是处于一种完全地主动状态, 能够根据发生的情况来采取相应的措施, 例如及时更改系统的期望输入. 这就克服了传统控制系统只依赖反馈控制环对系统进行调整且调整时间很长等缺点. 更重要的是运动参考变量的计算与实时反馈在时间上是同步的, 也就是说当系统输出发生变化时, 设计者可以对系统进行实时控制, 从而使系统运行在良好的状态. 正是对系统实现了实时控制, 所以基于事件的设计与控制系统不但能够处理突发性的离散事件, 也能够处理突发性的连续事件, 诸如系统误差的累积, 系统参数的漂移等. 这相对于现有的对传统控制系统的改进措施而言, 又是一大优点. 文献 [4] 对于基于事件的控制技术的稳定性分析以及使用方法做了详细论证, 该方法为多机器人合作领域的研究奠定了基础.

2.2　基于事件的设计与控制技术在机器人系统中的应用(Application in robotic system of the event-based planning and control technology)

不以时间为参考的控制器的设计引起了各个领域研究者的广泛关注, 在文[4] 中, 成功地将基于事件的设计与控制理论应用到机器人系统的控制中, 随后在多机器人协调协作、自动化制造等领域也得到广泛应用.

2.2.1　多自治移动机器人队形保持(Formation of multiple autonomous moving robots)

近年来, 自治移动机器人的队形控制问题已经引起学者的广泛关注. 该问题存在于众多领域, 如何设计一种控制器来使多个自治的移动机器人保持某种队形, 并且在环境变化时能够相互协调协作是该问题的主要研究方向. 在以往的复杂系统控制中, 存在

两种常用的控制器: 集中式控制器和分布式控制器. 前者具有较好的可执行性, 但柔性较差; 后者中的每个控制器具有各自的反馈环, 因此, 在该控制系统中, 当加入或撤消某一子系统时, 很容易实现系统的重新配置, 但是子系统间的协调协作性不如前者. 文献 [5, 6] 对多个自治移动机器人的队形保持问题提出了一种基于运动参考变量的控制器设计方法, 不仅能容易地实现系统的重新配置, 而且提高了子系统间的协调协作性能.

2.2.1.1 队形的结构(Formation structure)

包含多个子系统的复杂控制系统的模型为

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}x_i}{\mathrm{d}t} = f_i(x_i, u_i, r_i), \\ y_i = h_i(x_i), \end{cases} \quad 1 \leqslant i \leqslant k. \tag{1}$$

其中:k为子系统的个数, 变量$x_i \in I\mathbb{R}^{n_i}$是第$i$个子系统的状态,$u_i \in I\mathbb{R}^{m_i}$是第$i$个子系统的控制变量, 函数$r_i$代表各个子系统的耦合，输出函数$h_i(x_i)$. 队形控制实际上就是使所有的移动机器人沿着期望的轨迹运动. 问题的核心是为控制器$u_i(x), i = 1, 2, \cdots, k$寻求反馈控制算法, 从而使$y_i, i = 1, 2, \cdots, k$在指定的位置$P_i$, 并且沿给定的路线运动.

动作参考变量在队形控制中是一个关键参数, 它的选取是由控制任务所决定的, 一般选取队形所走过的弧长s做为参考变量, 它与系统的输出相关.

2.2.1.2 控制器设计及参考变量映射(Control law design and action reference projection)

在队形控制问题中, 采用参考变量映射法来进行反馈控制，应用该方法设计的控制器是以分布式控制器为基础, 因此当子系统数目变化时, 可以方便地实现系统的重新配置. 另一方面, 各个控制器之间通过共享参考变量所携带的信息进行协调协作, 整个系统的稳定性和可靠性得以提高.

在队形控制问题中, 为了达到协调的目的, 希望各个子系统的控制器能共享动作参考变量s的值. 动作参考变量s的值是由$s = \gamma(x)$所决定的, 它反映了系统在任意时刻的状态. 在用基于动作参考变量的方法设计控制器时, 不同的任务要求设计者采用不同的参考变量映射, 所以参考变量的映射方法并不是唯一的, 可根据不同的协作要求进行不同的选择, 例如:

a) 跟随第1个机器人运动队形.

在这种队形中, 要求所有的移动机器人跟随第1个机器人运动, 如果第1个机器人停止运动, 其余的移动机器人均会停止运动, 一旦第1个恢复运动, 其余的移动机器人恢复到给定的队形运动, 而无须设计者重新设计控制器; 如果任何一个非第一的移动机器人停止运动, 不影响其余移动机器人的运动. 选择如下映射

$$\gamma(x) = x_1,$$

它与$x_i, y_i, i \geqslant 2$无关.

b) 同步运动队形(以3个移动机器人为例).

在这种队形中, 要求所有移动机器人同步运动, 一旦任意一个移动机器人停止运动, 其余移动机器人均停止运动. 选择如下映射

$$\gamma(x) = \min(x_1 - d_1, x_2, x_3) + d_1,$$

其中d_1为常数.

用基于运动参考变量的方法设计多自治移动机器人队形保持系统的控制器具备如下优点: 1) 在队形运动过程中, 如果遇到突发事件(如某一个移动机器人发生故障), 可以选择不同的协调协作策略, 可以通过改变映射模式来改变协调协作方式, 而无须对设计进行大的改动; 2) 由于队形中的每一个子系统都是单独进行设计, 容易实现系统的重新配置; 3) 每个子系统都可以采用已有的控制方法. 文献[6]对系统的稳定性作出了详细证明.

2.2.2 在机器制造系统中的应用(Application in manufacturing system)

在机器制造系统的智能控制中, 某一个控制过程通常包括机器的一系列动作, 例如移动一个机器人, 装捡某一元件, 移动元件等, 为了完成期望的控制, 所有动作的执行应遵循它们之间的时间和逻辑关系. 设计一个自动地机器制造系统通常包括解决以下3个层次的问题: 1) 根据制造系统要求完成的任务, 离线地进行任务规划, 用以分析和决定不同机器的逻辑、时间顺序, 称之为任务调度层; 2) 离线地对各个任务的动作进行设计, 如路径规划、轨迹跟踪等, 称之为动作设计层; 3) 设计控制机制以确保各个动作的完成并取得预定的目标, 称之为动作控制层.

在传统的设计过程中, 以上3个层次往往被作为3个独立的部分分开研究, 其关键原因在于1) 找不到能同时描述各个层次特性的数学模型; 2) 找不到一个简单有效的方法来分析和设计既包含离散事件又包含连续事件的系统(称之为混合系统).

在过去的10多年中, 人们对混合系统进行了大量的研究, Nerode，Bencze, Mccarragher 等分别提出了不同的方法[7~10], 但这些方法均是启发式算法或一

类算法中的某一种形式. 文献[11]提出了用基于事件的方法来解决将机器制造系统中任务调度层, 动作设计层和动作控制层进行集成的混合系统的建模和设计, 并在汽车制造业取得了成功应用.

由于在机器制造系统中, 一个控制任务通常由几个部分组成, 每一个任务都可视为一个事件, 因此这些事件的运动参考变量是彼此不同的. 为了将基于事件的控制方法应用到该领域, 必须建立一个统一的动作参考变量, 由它和各个任务间建立逻辑关系. 其控制如图3所示.

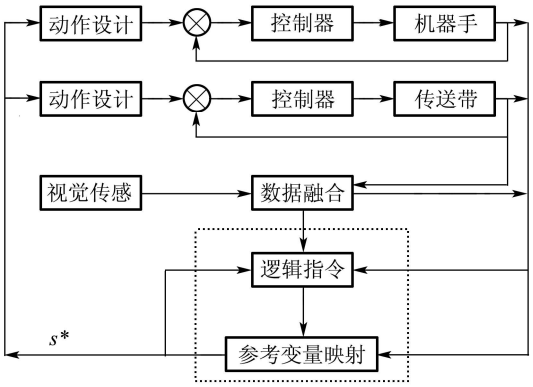

图 3　传感、设计与控制的集成

Fig. 3　Integrated sensing, planning and control

于是图2中的运动参考模块变成了任务参考模块, 任务参考变量s^*具有以下特点: 1) 不仅提供连续指令(动作参考变量)同时也提供离散指令(与各个动作参考变量间的逻辑切换); 2) s^*与系统的输出有关. 这样就使机器制造系统中的3个层次间建立了信息联系.

Part-sorting是机器制造系统中的一个常见任务, 假设在制造车间中由一个机器手和一个货物传送带来完成Part-sorting. 做如下假设:

$M = \{m(k)|k = 1, 2, 3\}$, 表示车间中3种不同的元件,它们随机地放在传送带上;

$L_1 = \{l_1(k)|k = 1, 2, 3\}$, 表示3种元件的初始放置位置;

$L_2 = \{l_2(k)|k = 1, 2, 3\}$, 表示机器手将3种元件放置的目标位置. 因此Part-sorting任务的执行顺序可描述为:

1) 传送带将元件$m(k)$送到位置$l_1(x)$;

2) 机器手从位置 $l_2(x)$ 移动到位置 $l_1(x)$ 处的元件 $m(k)$ 处, 并将其捡起, 其整个操作时间为 $a_{12}(k)$;

3) 机器手将元件 $m(k)$ 从位置 $l_1(x)$ 移动到位置 $l_2(x)$ 处, 并将其放下, 其整个操作时间为 $a_{21}(k)$;

4) 重复1)～3).

在设计这个制造系统时, 任务层有2个, 分别为机器手移动元件和传送带运送元件; 动作设计层为各个任务进行路径的规划.

定义:

1) $x_1(k)$为机器手第k次抓起元件的时间;

2) $x_2(k)$为机器手第k次放下元件的时间;

3) $u(k)$为第k个元件准备好的时间;

4) $y(k)$为第k个元件被放下的时间;

应用Max-Plus代数建立的Part-sorting的数学模型为

$$\begin{cases} x_1(k+1) = a_{12}(k) \bigotimes x_2(k) \bigoplus u(k+1), \\ x_2(k+1) = a_{21}(k) \bigotimes x_1(k+1), \\ y(k) = x_2(k). \end{cases} \tag{2}$$

在用基于事件的方法进行设计时, 选择机器手走过的弧长作为机器手规划的运动参考变量; 选择传送带走过的弧长作为传送带规划的运动参考变量; 由于这两个运动参考变量分别与机器手和传送带运行的距离有关, 而这些距离是可以实时检测出来的, 因此可以根据它们所走过的距离来规划各自的运行速度, 使它们在同一时刻走到指定位置. 更为重要的是, 任何一方的操作由于突发事件而停止时, 运动参考变量的值就保持在突发事件发生前的数值上,s^*的值将不再变化, 与其相关的动作也将停止. 当突发事件被清除后, 系统可以从故障发生时的运行状态接着运行, 而不用重新再被规划. 在传统的设计过程中, Part-sorting的高层次设计一般用PLC来实现, 并且只考虑一些离散事件, 而连续事件, 诸如低层次的传感器设计, 通常用分布式控制器来实现. 由于上下层之间缺少联系, 如果一旦出现一些局部的突发性事件, 诸如机器手故障, 高层次的控制器将其视为离散事件, 视为全局扰动, 从而关闭整个系统用以处理故障. 当故障清除后, 系统须花费一定的时间来恢复其最初状态, 这样一来就大大降低了系统的效率. 而采用上述方法后, 系统具备处理突发事件的性能, 从而避免将局部的扰动视为全局扰动, 整个系统可以继续运行, 不用重新进行规划设计. 关于此种方法的有效性在美国Washington大学的机器人实验室得到验证, 实验结果见图4.

在14.923 s～20.255 s时间段中, 机器手由于遇到障碍而停止运动，通过s^*, 传送带也停止运行, 当障碍物被拿走后, 系统自动在故障发生前的状态恢复运行而不用重新被设计, 从而保障了系统的稳定性和可靠性.

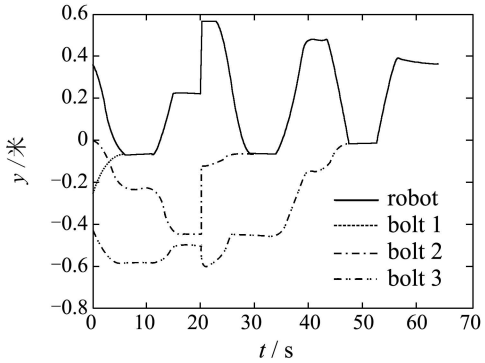

图 4 干扰情况下的Part-sorting操作仿真

Fig. 4 Part-sorting operation with disturbance

2.2.3 多机人协调协作(Multi-robot coordination)

多机器人系统的智能控制问题研究引起了众多学者的关注, 它普遍存在于许多领域: 工厂里的组装任务、各种恶劣环境下的材料处理以及空间站的服务等. 机器人系统的智能性表现在如下3个方面: 1) 能够直接执行任务层的指令; 2) 机器人控制系统能够广泛应用于许多类任务, 而不单单为某种任务设计; 3) 系统能够处理突发性和不确定性的事件.

在多机器人系统中, 为了达到系统的智能性, 一个重要的环节就是多机器人的协调控制. 为了使各个机器人能够协调工作, 每个机器人都应该了解系统中其他机器人的输出信息. 因此在多机器人系统的设计、控制中, 最为重要的就是建立一种有效的机制, 能够描述、处理、传递各个机器人的输出信息. 近年来, 研究人员对于该问题的解决提出了许多策略[12~15]. 文献[4]提出了用基于事件的方法来实现多机器人的协调智能控制.

2.2.3.1 系统基于事件的描述(Event-based description)

考虑系统: k个机器手拖动刚性物体b沿给定路线s运动, 要求物体b的重心始终在路线s上. 系统如图5所示.

在基于事件的多机器人协调设计、控制系统中, 最关键的问题是选取能够表征各机器手间的协调信息并能及时反馈给设计者的运动参考变量. 本例的运动参考变量s定义为物体的重心沿给定路线s所走过的距离, 可应用文献[16,17]的技术来建立物体关于s的时间或能量最优函数. 第i个机器手的基于事件的设计可表征为:

$$\dot{r}_i^d(s) = J_{hi}(\dot{r}_b^d)\dot{r}_b^d(s), \tag{3}$$

$$\ddot{r}_i^d(s) = J_{hi}(r_b^d)\ddot{r}_b^d(s) + J_{hi}^i(r_b^d)\dot{r}_b^d(s). \tag{4}$$

其中$J_{hi}(r_b^d) = \dfrac{\partial h_i}{\partial r_b}$为坐标转换的Jacobin矩阵.

$f_{oi} = [f_{o1i}, f_{o2i}, f_{o3i}, f_{o4i}, f_{o5i}, f_{o6i}]^{\mathrm{T}}, i = 1, 2, \cdots, k$为第$i$个机器手施加在物体上的力;

$I_j^+ = \{i|f_{oji} \geqslant 0\}, I_j^- = \{i|f_{oji} < 0\}, j = 1, 2, \cdots, 6,$

$f_{oj^+} = \sum\limits_{i\in I_i^+} f_{oji}, f_{oj^-} = \sum\limits_{i\in I_i^-} f_{oji}, j = 1, 2, \cdots, 6.$

内部力为

$$f_{\mathrm{int}} = [f_{1\mathrm{int}}, f_{2\mathrm{int}}, f_{3\mathrm{int}}, f_{\mathrm{int}4}, f_{5\mathrm{int}}, f_{6\mathrm{int}}]^{\mathrm{T}},$$

其中

$$f_{j\mathrm{int}} = \begin{cases} f_{oj^+}, f_{j^+} + f_{j^-} \leqslant 0, \\ f_{oj^-}, f_{j^+} + f_{j^-} > 0, \end{cases} \quad j = 1, 2, \cdots, 6.$$

又有

$$f_{j\mathrm{int}}^d = F_{j\mathrm{int}}(s), j = 1, 2, \cdots, 6. \tag{5}$$

系统基于事件的描述不仅仅用参考变量s取代了传统的t, 由于s与系统的状态直接相关, 因此整个设计过程被系统的状态所驱动, 系统的设计成为实时地闭环控制过程.

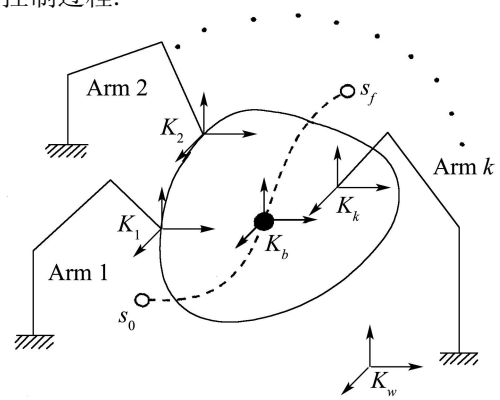

图 5 多机器手协调系统

Fig. 5 Rigid object handled by multiple robot

2.2.3.2 基于事件的运动参考变量(Event-based action reference)

方程(3)~(5)对多机器手系统中各个机器手的任务进行了描述, 系统的协调性要求所有的机器手跟随物体的运动, 这就要求必须知道物体b和各个机器手的运动信息, 这些信息可以通过所选定的动作参考变量传送到各个机器手的设计中, 从而使系统取得期望的协调控制.

例如对于测量出的r_1, f_1, 可以定义如下协调准则

$$J = \sum[(r_i^d(s) - r_i)^{\mathrm{T}} W_{ri}(r_i^d(s) - r_i) + (f_i^d(s) - f_i)^{\mathrm{T}} W_{fi}(f_i^d(s) - f_i)]. \tag{6}$$

其中$W_{ri}, W_{fi}, i = 1, 2, \cdots, k$是权重矩阵, 它们可以衡量系统在各个方向上的协调误差, 以确保系统在各个方向上取得较好的协调控制效果. 系统的最优

动作参考变量s^*可通过下式获得

$$\min_{s\in S} J \ \text{ s.t. } \frac{\partial J}{\partial S}=0.$$

一旦s确定后, 每个机器手的设计者均可根据s计算出系统的期望输入, 可见，基于事件的设计总是可以给出最优的计划从而将协调误差降低到最小状态. 文献[18]证明基于事件的协调策略适合于分布式计算结构, 在实际系统中, 该协调策略能够很方便地实现.

由多机器手系统的基于事件的控制策略可得出如下结论:

1) 在基于事件的设计过程中, 根据系统当前状态的信息, 设计者可以给出最优的设计方案来实现多机器手的协调, 整个系统的设计变成一个实时闭环控制, 设计者成为系统中的决策部件;

2) 系统中的每个机器手有其独立的控制器和设计, 这就使系统的结构具备柔性并且易于采用分布式计算结构来实现;

3) 系统中的每个机器手都能够获得其余机器手的当前状态信息, 从而使它们之间能实现较好的协调;

4) 由于系统是由事件来驱动的, 当遇到突发事件而停止运动时,s也不发生变化, 因此系统的协调误差保持为常数, 并且根据最初的设计所取得的协调操作仍可维持; 当障碍被消除后, 误差将驱动系统继续运行,s将继续变化, 不用重新规划系统就仍可以保持系统的协调. 因此系统能够实现对突发事件和不确定事件的处理;

5) 公式(6)所示的协调准则不是唯一的, 可以根据要求进行改变.

3　结论(Conclusion)

基于事件的设计和控制方法在近几年引起了学者广泛关注, 其实质就选择一个与系统输出相关的变量作为运动参考变量, 代替以往系统中的参考变量–时间t, 从而使系统成为闭环的、实时控制系统. 当系统运行在复杂环境中或在运行过程中遇到不确定、突发性事件时, 能够保持系统的协调并具备处理这些突发性情况的能力, 从而保证了系统的稳定性. 基于事件的控制方法为控制理论的研究开辟了一个新的研究方向, 特别在机器人系统的控制中开创了一个全新的研究领域, 对于智能控制理论的发展起到了很好的推动作用. 为了更好地研究和完善这种方法, 需要在如下方面开展深入研究:

1) 多数现存的系统的分析和设计方法只处理系统的结构, 在引入基于事件的控制方法后, 设计部分和控制器设计成为不可分割的一体, 应将重点放在如何将二者有机地集成在一起;

2) 深入研究并建立表达系统中各个子系统间关系的数学模型;

3) 基于事件的控制方法具备处理突发性、不确定性事件的能力, 为了提高系统的自适应性能, 可以考虑将传统理论下的障碍物躲避策略与其相结合;

4) 基于事件的控制方法是依据传感器的输出来计算参考变量的数值, 为检测该方法在不同系统、不同运行环境下的控制效果, 应考虑各种传感器间的融合.

参考文献(References):

[1] SARIDIS G N. Knowledge implementation: structure of intelligent control system[C] // *Proc of IEEE Int Symp on Intelligent Control*. Philadelphia, PA: IEEE Press, 1987 : 9 – 19.

[2] ALBUS J S. Hierarchical interaction between sensory processing and world modeling in intelligent systems[C] // *Proc of the 5th IEEE Symp on Intelligent Control*. Philadelphia, PA: IEEE Press, 1990 : 53 – 59.

[3] ZEIGLER B P. *Object-Oriented Simulation with Hierarchical, Modular Models: Intelligent Agents and Endomorphic System*[M]. San Diego, CA : Academic Press, 1990.

[4] XI N. *Event-based motion planning and control for robotic system*[D]. Washington : Washington University, 1993.

[5] KANG W, XI N. Formation control of multiple autonomous vehicles[C] // *Proc of IEEE Int Conf on Control Applications*. Hawai'i USA: IEEE Press, 1999 : 1027 – 1032.

[6] KANG W, XI N, ANDY S. Theory and application of formation control in a perceptive referenced frame[C] // *Proc of the 39th IEEE Conf on Decision and Control*. Sydney: IEEE Press, 2000 : 352 – 357.

[7] KIM G H, LEE C S G. Genetic reinforcement learning approach to the machine scheduling problem[C] // *Proc of 1995 IEEE Conf on Robotics and Automation*. Nagoya, Japan: IEEE Press, 1995 : 196 – 201.

[8] HSU H, FU L H. Fully automated robotic assembly cell: scheduling and simulation[C] // *Proc of 1995 IEEE Conf on Robotics and Automation*. Nagoya, Japan, 1995 : 208 – 214.

[9] SHIN K S, ZHENG Q. Scheduling job operations in a automatic assembly line[J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1991,7(3) : 333 –341.

[10] KANEHARA T, SUZUKI T, INABA A, et al. On algebraic and graph structural properties of assembly petri net: search by linear programming[C] // *Proc of ICRA'93*. Atlanta, Georgia: Icra Press, 1993: 2286 – 2293.

[11] MUMIN S, TZYH-JONG T, XI N. Integration of task scheduling, action planning and control in robotic manufacturing systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2000,188(3) : 1097 –1107.

[12] RAIBERT M H, CRAG J J. Hybrid position/force control of manipulators[J]. *Trans on ASME*, 1981, 103(2) : 126 – 133.

[13] MASON M T. Compliance and force control for computer controlled manipulators[J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics*, 1981,11(6) : 418 – 432.

[14] HAYATI S. Hybrid position/force control of multi-arm cooperating robots[C] // *Proc of IEEE Conf on Robotics and Automation*. San Francisco: IEEE Press, 1986 : 82 – 89.

[15] ZHENG Y F, LUH J Y S. Control of two coordinated robots in motion[C] // *Proc of IEEE Int Robotics and Automation Conference*. St.Louis: IEEE Press, 1985 : 1761 – 1766.

[16] TARN T J, BEJCZY A K, XI N. Phase space planning and control for intelligent robot arms[C] // *Proc of IEEE Conf on Intelligent Robots and Systems*. Raleigh, NC: [s.n.], 1992 : 1507.

[17] TARN T J, BEJCZY A K, XI N. Intelligent motion planning and control for robot arms[C] // *Proc of the IFAC 12th World Congress*. Sydney, Australia: IFAC Press, 205 – 208.

[18] TARN T J, XI N, RAMADORAI A K, et al. A versatile experimental system for dural-arm planning and control[C] // *Proc of 1994 IEEE Int Conf on Robotics and Automation*. San Diego, CA: IEEE Press, 1994 : 1515 – 1520.

作者简介:

路 飞 (1973—), 女, 山东大学控制科学与工程学院教师, 1997年获东北大学系统工程专业硕士学位, 现为山东大学控制科学与工程学院在读博士, 研究方向为智能控制, E-mail: lawyerlf@sdu.edu.cn;

宋沐民 (1968—), 男, 山东大学兼职教授, 博士导师, 哈尔滨工业大学宋健科学技术研究院常务副院长, 1997年美国圣路易斯华盛大学获理学博士, 研究方向为智能控制;

田国会 (1969—), 男, 博士后, 山东大学博士导师, 研究方向为智能控制;

席 宁 (1960—), 男, Michigan大学副教授, 1993年美国圣路易斯华盛大学获理学博士, 研究方向为智能控制;

康 伟 (1960—), 男, Naval Postgraduate School大学副教授, 1991年California大学获理学博士, 研究方向为非线性控制理论及智能控制.

第5届“全国技术过程的故障诊断与安全性学术会议”征文通知

第5届全国技术过程的故障诊断与安全性学术会议将于2007年8月中旬在古城西安召开.

会议议题和范围: 1) 状态监测与故障诊断; 2) 故障预报与主动视情维修; 3) 自修复与智能维护; 4) 容错控制; 5) 可靠性与安全性分析、设计与评估; 6) 计算智能; 7) 人工智能与专家系统; 8) 系统辨识、状态与参数估计; 9) 自动测试技术; 10) 测试信号处理; 11) 应用与实例分析等.

投稿截止日期: 2007年3月25日

论文录用日期: 2007年4月15日

修改稿返回截止日期: 2007年4月28日

被录用论文将在《控制工程》、《空军工程大学学报》、《第二炮兵工程学院学报》正刊或增刊上发表.

此次会议由中国自动化学会技术过程的故障诊断与安全性专业委员会主办, 由第二炮兵工程学院承办, 会议届时将邀请3名国内外故障诊断领域的著名学者作大会主题报告.

会议有关详细信息可查寻网址: http://www.epgc.net/meeting/fd2007/

来稿可通过电子邮箱发送到: hch_302@163.com

联系人: 胡昌华教授

电话: 029-84743949或029-84741949

欢迎广大同行踊跃投稿.

中国自动化学会技术过程的故障诊断与安全性专业委员会