

网络遥操作系统中基于事件的预测控制策略

陈 丹^{1~3}, 席 宁¹, 王越超¹, 李洪谊¹, 唐旭晟¹

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所 机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;

2. 福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350002; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 本文提出一种新的基于事件的预测控制策略, 在保证系统稳定的同时, 能适应环境的不断变化和应付突发事件, 极大提高了系统的操作性能. 该策略在主端设计一个基于时延预测的路径管理器, 在线产生一个适当的预测事件, 以提高跟踪性能以及环境适应能力和应付突发事件的发生; 在从端设计一个广义预测控制器, 产生冗余的控制信息以减小数据丢包和大时延对系统的影响, 提高系统的鲁棒稳定性和操作性能. 仿真试验结果表明本文方法能有效解决时变时延以及网络数据丢包引起的稳定性问题和性能下降问题.

关键词: 路径管理器; 广义预测控制; 遥操作; 基于事件的控制

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Event-based predictive control strategy for teleoperation via internet

CHEN Dan^{1~3}, XI Ning¹, WANG Yue-chao¹, LI Hong-yi¹, TANG Xu-sheng¹

(1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Sciences, Shenyang Liaoning 110016, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou Fujian 350002, China;

3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: We propose a new event-based predictive control strategy that not only ensures the system stability but also makes the teleoperation system adapt to environmental changes and deal with the burst incident. Thus, it improves the performance of the teleoperation system. At the master site, a Round-Trip-Timedelay-predictor-based Path Governor is designed to generate a suitable predictive event for improving the tracking performance, and dealing with environmental changes and the burst of events. At the slave site, a Global Predictive Control controller is designed, which generates the redundant control information to reduce the influence of the packet loss and the large time-delay of the internet, so as to improve the robust stability and the operation performance. Simulations and results demonstrate the effectiveness of the strategy.

Key words: path governor; global predictive control; teleoperation; event-based control

1 引言(Introduction)

由于Internet网络固有的时延、丢包和连接中断等问题, 使得设计一个稳定且有良好的可操作性的遥操作系统极具挑战性. 无源理论^[1]和波变量^[2]方法, 成功解决了遥操作系统的稳定性问题. Leung^[3]提出了 H_∞ -最优控制和 μ -综合方法. Kosuge^[4]变时延转换成恒定时延, 用散射理论证明了系统在时变时延的条件下仍然稳定, 但恒定时延很难选择. Tarn^[5]提出时间前向观测器的监督控制方法, Oboe^[6]提出基于位置的力反馈策略, 但系统的性能仍取决于系统模型, 时延以及环境. Tarn and Xi^[7]提出基于事件的方法解决遥操作系统中稳定性和同步性问题, 保证了系统的稳定性, 但这种方法采用“走走停

停”策略, 机器人在没有获得操作者下一个指令前处于静止状态.

本文提出一种新的基于事件的预测控制策略, 即操作者根据当前收到的事件, 发出指令, 并通过对时延的在线预测, 设计一个路径管理器(path governor, PG)在线确定机器人一段时间内要跟踪的路径; 在从端设计一个广义预测控制器, 当出现数据丢包且连续丢包数不超过广义预测器的预测步数时, 机器人能根据前一时刻计算的冗余控制信息控制机器人, 保证机器人的正常运行. 当出现长时间通讯中断时, 主、从端无法更新事件, 机器人会处于等待状态, 以保证任务的正常完成. 该策略能在时变时延、数据丢包以及通讯中断的条件下保证系统的稳定性, 并

获得良好的跟踪性能。

2 基于事件预测的网络遥操作系统结构(Configuration of the teleoperation based on event-prediction)

系统的结构主要由3个模块组成: 时延预测器; 路径管理器(PG); 广义预测控制器(GPC), 如图1所示。系统采用事件驱动方式, 操作者在收到从端事件

后, 发出速度指令, 因此指令到从端的时延可看作是系统回路时延(round trip time-delay, RTT)。时延预测器根据RTT的统计特征, 采用多元线性回归算法预测下一时刻RTT(pT_d)。PG根据预测时延及机器人当前的事件 s , 在线产生期望事件 s^* 。在从端设计一个基于CARIMA模型的GPC, 在线产生冗余的控制信息, 减小丢包及大时延成的不利影响。

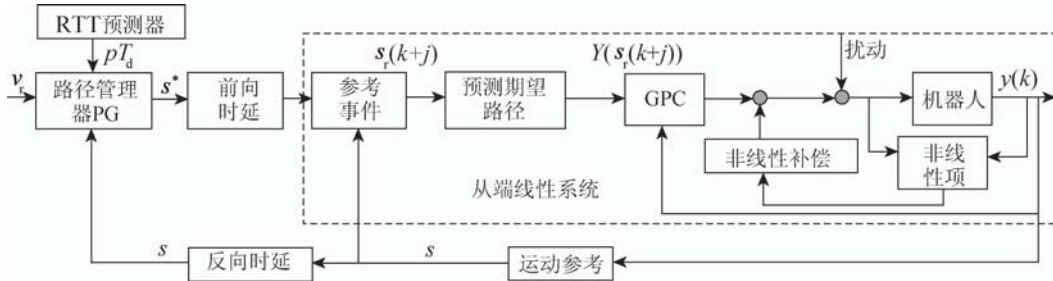


图1 基于事件预测的控制遥操作系统结构框图

Fig. 1 The diagram of the teleoperation based on event predictive

3 时延预测(Time-delay prediction)

通过有时间戳的控制指令可获得系统的RTT, 本文采用多元线性回归的方法来预测网络RTT, 采用固定窗口进行估计系数, 不断在线调整系数以适应网络变化。在Internet网络上进行了几组测试实验结果表明: 相对误差在10%以内的时延预测精度都能达到90%以上, 如表1所示。

表1 Internet网络回路时延预测相对精度表

Table 1 The relative precision of prediction of RTT

时延 相对 误差	沈阳 至 石家庄	沈阳 至 上海	沈阳 至 美国	沈阳 至 香港
< 5%	88.85%	94.097%	93.864%	80.864%
< 10%	98.462%	97.847%	96.692%	92.846%

4 基于事件的路径规划器设计(The event-based path governor)

PG采用事件 $s(\tau; kT, s_\infty)$ 作为优化参数, 其中 $\tau \in [0, +\infty)$ 表示预测时间, kT 表示当前时间, s_∞ 是自由标量, $s_\infty = \lim_{\tau \rightarrow \infty} s(\tau; t, s_\infty)$ 表示机械臂末端位置^[8]。基于可测量的量 $s(kT)$, 在 kT 时刻, PG可以通过计算优化问题, 选择适当的标量 s_∞^k 。PG的算法如下:

1) 令 α 为一个恒定正数, $s_\infty^{-1} \triangleq s_0$, $\Delta s_\infty = v_r \times pT_d$, 其中 v_r 为操作者发出的参考速度矢量, pT_d 为预测出的系统回路时延;

2) 当 $t = kT$ 时, 在 $[s_\infty^{k-1}, s_\infty^{k-1} + \Delta s_\infty]$ 范围内计

算出最优的机械臂临时末端 s_∞^k , 使得下面的优化指标函数取得极大值:

$$J(s_\infty) \triangleq s(T; kT, s_\infty), \quad (1)$$

其中虚拟参数 $s(\tau; kT, s_\infty)$ 按如下公式计算:

$$\begin{cases} s(\tau; kT, s_\infty) \triangleq s_\infty + [s(kT) - s_\infty]e^{-\alpha\tau}, \\ \tau > 0; \end{cases} \quad (2)$$

3) 当 $t \in (kT, (k+1)T)$, 整个闭环系统的参考为

$$r(s(t)) = r(s(t - kT; kT, s_\infty^k));$$

4) 在 $(k+1)T$ 时刻重复上述步骤, 直到任务完成。整个路径管理器(PG)的结构图如图2所示。



图2 路径管理器结构图

Fig. 2 Path governor

5 广义预测控制策略及其实现(The GPC strategy and its application)

5.1 网络遥操作系统的CARIMA模型(The CAR-IMA model of the teleoperation)

GPC的被控对象的数学模型采用下列具有随机阶跃扰动非平稳噪声的离散差分方程描述^[9]:

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k-1) + C(z^{-1})\xi(k)/\Delta. \quad (3)$$

式中: y, u, ζ 分别为系统输出、输入、均值为零、方差为 σ^2 的白噪声; $\Delta = 1 - z^{-1}$ 为差分算子,

$$A(z^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^{n_a} a_i z^{-i}; B(z^{-1}) = \sum_{i=0}^{n_b} b_i z^{-i};$$

$$C(z^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^{n_c} c_i z^{-i}.$$

令机器人状态矢量为 $x = [q' \dot{q}']^T, q(t) \in \mathbb{R}^n$ 为其关节矢量. 定义控制输入转矩:

$$\Gamma(t) = -D(x(t))\hat{f}(x(t)) + D(x(t))u(t - T_d). \quad (4)$$

其中: $u(t - T_d)$ 是经过 T_d 时延后的新控制变量, $\hat{f}(x)$ 为非线性项 $f(x)$ 的估计值:

$$f(x) = -D^{-1}(x)\{C(x) + G(x)\} - [A_{c21} A_{c22}]x.$$

则方程(4)可以描述为如下状态方程:

$$\dot{x}(t) = A_c x(t) + B_c u(t) + B_c \tilde{f}(x(t)). \quad (5)$$

其中 $\tilde{f}(t)$ 为非线性项估计误差. 选择适当的参数, 使得 A_c 稳定. 非线性项估计准确, 机器人系统可写成如式(3)所示的CARIMA模型形式.

5.2 广义预测控制器设计(The design of GPC)

kT 时刻, 机器人的优化性能指标为

$$J_P = E \left[\sum_{j=N_1}^P q_j [y(k+j) - y_r(k+j)]^2 + \sum_{j=1}^M \lambda_j [\Delta u(k+j-1)]^2 \right]. \quad (6)$$

其中: E 为数学期望, y_r 为系统的期望输出, N_1, P 分别为最小预测长度和最大预测长度, q_i, λ_i 分别为输出预测误差和控制增量加权系数, M 为控制时域长度. 系统期望的输出响应采用如下形式:

$$y_r(k+j) = y(k) + [w - y(k)](1 - e^{-\alpha*j}). \quad (7)$$

其中 w 是操作者发出的参考输入. 根据式(6)(7), 控制器输出的最优控制增量为

$$\Delta U(k) = (H^T Q H + \lambda)^{-1} H^T Q (y_r(k+1) - F). \quad (8)$$

式中:

$$\Delta U(k) = [\Delta u(k), \Delta u(k+1), \dots, \Delta u(k+M-1)]^T;$$

$$y_r(k+1) = [y_r(k+1), y_r(k+2), \dots, y_r(k+P)]^T$$

为系统期望输出矢量; H 为Diophantine方程的自回归量; $Q = \text{diag}\{q_1, q_2, \dots, q_P\}$; $\lambda = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M\}$; F 与输入增量、系统之前的输出有关:

$$F = R_0(z^{-1})\Delta U(k-1) + S(z^{-1})y(k). \quad (9)$$

其中 R_0, S 均为Diophantine方程的自回归量,

$$\Delta U(k-1) = [\Delta u(k-n_b), \dots, \Delta u(k-1)].$$

根据Diophantine方程和系统的CARIMA模型(3), 可以得到系统的 j 步向前输出 $y(k+j)$. 由于这个 j 步向前输出是根据系统真实模型参数推导出来的, 实际控制器是根据理论模型参数设计的, 而系统真实模型参数与理论模型参数不完全匹配, 存在模型误差. 设用理论模型参数表示的 j 步向前输出为 $y_m(k+j)$, 则可以利用 k 时刻已知的模型输出误差(10)来修正:

$$e(k) = y(k) - y_m(k), \quad (10)$$

$$y_m(k) = \hat{G}(z^{-1})u(k) + \hat{G}_\xi(z^{-1})\hat{\xi}(k), \quad (11)$$

$$\hat{G}(z^{-1}) = z^{-1}\hat{B}(z^{-1})/\hat{A}(z^{-1}), \quad (12)$$

$$\hat{G}_\xi(z^{-1}) = [\hat{C}(z^{-1}) - 1]/\hat{A}(z^{-1})\Delta. \quad (13)$$

带 “ $\hat{\cdot}$ ” 号表示参数估计值. 则经过修正后的 j 步向前输出为

$$y(k+j) = y_m(k+j) + h_j e(k). \quad (14)$$

根据优化性能指标(6), 重新计算的闭环控制策略, 可以得到与(8)一致的形式, 只是式中的 F 多了一项模型误差修正项, 其他各项在形式上基本相同:

$$F = \bar{R}(z^{-1})\Delta u(k-1) + \bar{S}(z^{-1})y(k) + h e(k). \quad (15)$$

其中: $\bar{R}, \bar{S}$ 均为Diophantine方程的自回归量, h 为修正误差系数. 当出现数据丢包, 将前一时刻计算出来的控制增量左移一位, 即利用 $u(k+1)$ 作为当前的控制增量作用在机器人上, 最后一个控制增量则保持 $u(k+M-1)$ 不变.

6 仿真结果(Result and simulation)

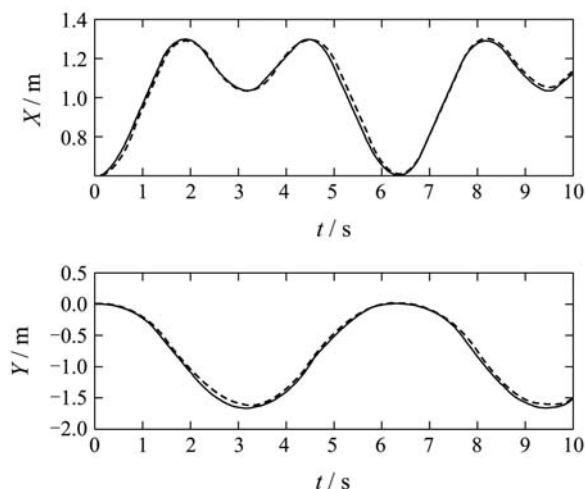
本文采用平面二连杆机械臂作为被控对象来说明本文提出方法的有效性. 把机械臂的每条臂看作是质量集中在末端的刚体, 其质量分别为 $m_1 = 1 \text{ kg}$, $m_2 = 1 \text{ kg}$, 长度为 $l_1 = 1 \text{ m}$, $l_2 = 1 \text{ m}$, 关节角位置为 q_1, q_2 , 转矩为 Γ_1, Γ_2 . 本次试验在沈阳与石家庄之间进行. 回路时延预测方法采用上面介绍的多元线性回归方法, 固定窗口大小设置为300.

定义最优控制输入如式(8), 对于GPC控制器, 选择 $N_1 = 4, P = 7, M = 4, \lambda = 0.00001, Q = \text{diag}\{20, \dots, 20\}$. 设系统期望输出(7)中参数 $\alpha = 2$, 采样时间 $T_s = 0.01 \text{ s}$, 机器人初始状态为 $q_1 = 1.2661 \text{ rad}, q_2 = -2.5322 \text{ rad}$.

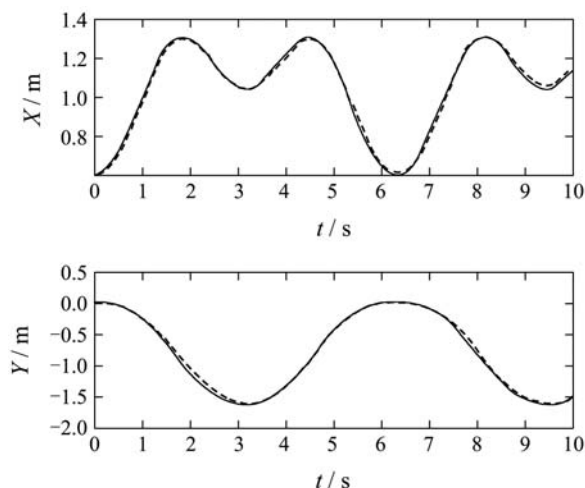
其次, 主端加入路径管理器(PG), 机器人线性化误差在5%和10%两种情况下, 即

$$\tilde{f} = 5\% \times f, \tilde{f} = 10\% \times f.$$

机器人的位置跟踪曲线如图3所示. 图中, 实线表示期望路径, 虚线表示跟踪路径.



(a) 非线性误差在5%以内



(b) 非线性误差在10%以内

图3 机器人位置跟踪曲线

Fig. 3 Robot position tracking

从仿真图可以看出, 在时变时延的条件下, 机器人的速度和位置跟踪误差是有界的. 同时, 本文比较了没有PG和存在PG的条件下, 系统的跟踪性能. 在存在PG条件下, 在非线性误差分别为5%和10%情况下, 机器人都能获得更好的跟踪性能, 并且在非线性误差增大的情况下, 仍然能保持良好的跟踪性能. 更重要的是遥操作系统的稳定性条件与时延无关. 基于事件的预测控制控制方法为设计遥操作系统提供了新的方案.

7 结论(Conclusion)

本文提出一种新的基于事件的预测控制遥操作系统结构, 使系统在变时延下依然保持稳定并具有较好的跟踪性能. 主端设计的时延预测器能

动态补偿网络的随机时延; 路径管理器(PG)能够根据在线预测出的时延以及机器人当前的状况, 在线产生一个适当的期望运动参考 s^* , 使得该系统对于不同的时延状况有较强的适应性. 从端设计的基于CARIMA模型的广义预测控制器(GPC), 产生冗余的控制信息, 以减小网络数据丢包对系统造成的不利影响, 提高系统的稳定性和跟踪性能. 将预测控制机制与基于事件的驱动方式结合, 在保证稳定性的条件下, 解决了基于事件方式的遥操作系统固有的“走走停停”的缺点, 为建立基于事件的遥操作系统结构提供新的思路.

参考文献(References):

- [1] ANDERSON R J, SPONG M W. Bilateral control of teleoperators with time delay[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1989, 34(5): 494 – 501.
- [2] NIEMEYER G, SLOTINE J G. Stable adaptive teleoperation[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1991, 16(1): 152 – 152.
- [3] LEUNG G M H, FRANCIS B A, APKARIAN. Bilateral controller for teleoperators with time delay via μ -synthesis[J]. *The main algorithm research on financial time series data mining*, 1995, 11(1): 105 – 116.
- [4] KOSUGE K, MURAYAMA H, TAKEO K. Bilateral feedback control of telemanipulators via computer network[C] // *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Osaka, Japan: IEEE, 1996: 1380 – 1385.
- [5] TARN T J, BRADY K. A framework for the control of time-delayed telerobotic systems[C] // *Proceedings of IFAC Robot Control*. Nantes, France: [s.n.], 1997: 599 – 604.
- [6] OBOE R, FIORINI P. A design and control environment for internet-based telerobotics[J]. *International Journal of Robotics Research*, 1998, 17(4): 433 – 459.
- [7] TARN T J, XI N. Planning and control of internet-based teleoperation[C] // *Proceedings of SPIE: Telemanipulator and Telepresence Technologies*. Boston, MA: [s.n.], 1998, 3524: 189 – 195.
- [8] BEMPORAD A, TARN T J, XI N. Predictive path parameterization for constrained robot control[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1999, 7(6): 648 – 656.
- [9] 舒迪前. 预测控制系统及其应用[M]. 北京: 北京机械工业出版社, 1996.

作者简介:

陈丹 (1977—), 女, 博士研究生, 目前研究方向为网络遥操作、机器人学、预测控制, E-mail: chendan@sia.cn;

席宁 (1959—), 男, 教授, 目前研究方向为网络遥操作、机器人学、微纳米操作;

王越超 (1960—), 男, 研究员, 目前研究方向为网络遥操作、机器人学、微纳米操作;

李洪谊 (1972—), 男, 研究员, 目前研究方向为网络遥操作机器人、微型机器人、仿生机器人;

唐旭晟 (1973—), 男, 博士, 目前研究方向为机器人视觉、智能计算.