

文章编号: 1001-0920(2005)07-0755-04

基于因特网的运动控制系统中变采样过程的研究

黄 杰, 吴平东, 修 震, 马树元, 陈之龙

(北京理工大学 机电一体化中心, 北京 100081)

摘 要: 基于因特网的运动控制系统多采用时间驱动方式, 由于采样周期与时延的不匹配, 在报文接收端会出现空采样和多采样现象, 这些采样现象使系统变得更难控制. 提出事件-时间驱动方式, 即采样周期要随着网络环境的变化而变化. 不但对该驱动方式下的采样信息处理方法进行研究, 而且提出了相应的网络时延补偿方案. 理论分析和实验结果证明该方法可在任何因特网环境下实现运动控制的任务.

关键词: 事件-时间驱动; 变采样过程; 因特网; 运动控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Variable-sampling Process in Internet-based Motion Control System

HUANG Jie, WU Ping-dong, XIU Zhen, MA Shu-yuan, CHEN Zhi-long

(Mechatronics Center, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China Correspondent: HUANG jie, E-mail: bit.huangjie@bit.edu.cn)

Abstract: The time-driven is adopted in Internet-based motion control system. Because of matching problem of sampling period and Internet time delay, more-sampled case and empty-sampled case exist in the datagram sink. The system is very difficult to control at those sampled case. The event-time driven is proposed, in which the sampling period is variable with the change of Internet time delay. The sampled-information processor is researched, and a compensator for Internet time delay is presented. The theory analysis and experiment result show that motion control system is feasible in any Internet condition by those methods.

Key words: Event-time driven; Variable sampling process; Internet; Motion control

1 引 言

基于因特网的运动控制系统的控制和反馈信号通过因特网进行传输, 因此该系统可实现任何时间、任何地点对任意节点上的设备进行控制的任务. 网络时延及其不确定性变化是基于因特网的运动控制系统研究的主要难点.

为了解决时变时延对控制系统的影响, 国内外学者提出很多解决方法. Dong-sung Kim 等人对网络控制系统的稳定性进行研究, 给出了最大允许时滞下的稳定边界^[1]. 其结论对某些现场总线协议下的网络控制系统是适用的, 但 TCP/IP 协议下传输时延无上界, 因此成果不适用于基于因特网的运动

控制系统. Feng-li Lian 等人研究了特定时滞规律下的网络控制系统的稳定问题^[2]. TCP/IP 协议下传输时延不满足任何已知的随机过程, 因此其研究结论没有普遍性. 国内的 Hu Shousong 在假设网络时延有界且满足已知分布规律基础上分析了时延大于一个采样周期的稳定问题^[3].

文献[4]的研究未对网络环境作出假设, 因此成果适用于任何网络环境. 但该方法采用时间驱动方式, 由于采样周期和网络时延的匹配关系, 造成了空采样和多采样现象的出现. 当发生多采样和空采样时, 需要进行复杂的信息处理和时延补偿过程^[4]. 而事件驱动方式仅适用于网络时延小于一个采样周期

收稿日期: 2004-09-06; 修回日期: 2004-11-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(60274035).

作者简介: 黄杰(1973—), 河北邯郸人, 工程师, 博士, 从事基于互联网的运动控制系统的研究; 吴平东(1940—), 江苏无锡人, 教授, 博士, 从事机电一体化研究.

的控制系统,应用范围有限.为此本文综合时间驱动和事件驱动的优点提出事件-时间驱动方式,不但对该驱动方式下的采样信息处理方法进行了深入的研究,而且提出了相应的网络时延补偿方案.研究成果可在任何因特网环境下实现运动控制的任务.

2 事件-时间驱动方式

2.1 运输层协议选择

为了保证报文传输的可靠性,运输层采用TCP协议.在报文接收端消除了丢包、重复和接收乱序现象,而仅存时延特性,可用时变时滞环节来表示TCP协议下双向通道的因特网环节^[4].

2.2 事件-时间驱动方式

事件-时间驱动方式指本地机或远程机报文的发送是由接收过程来触发,但预先要设定一个采样周期的最大值 T_{\max} ,如果相临报文发送间隔超过 T_{\max} ,就会在达到 T_{\max} 的时刻自动地发送报文.图2显示了该过程,本地机的采样点c和d之间的间隔超过了 T_{\max} ,因此在z点要自动发送报文,c和z的间隔为 T_{\max} ;远程计算机的采样点C和D之间的间隔也超过了 T_{\max} ,因此在Y和Z点自动发送报文,CY和YZ的间隔都为 T_{\max} .由此可见事件-时间驱动方式可以保证每个采样周期都不会大于 T_{\max} ,通过对 T_{\max} 限制,来保证信号不失真的要求.

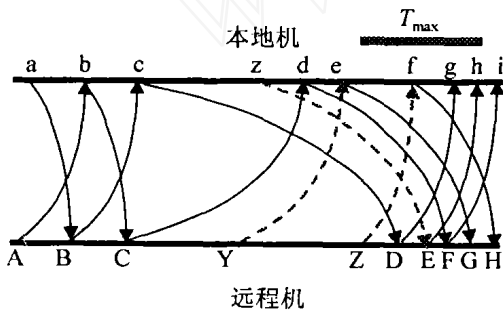


图1 事件-时间驱动下报文收发示意图

2.3 T_{\max} 的确定

引入基于因特网的运动控制系统最大工作频率的概念.传统计算机控制系统的最大工作频率,为闭环对数幅频特性的幅值下降3分贝对应的频率.基于因特网的运动控制系统的最大工作频率除受原系统截止频率的限制外,还要受到因特网承载能力的限制.即

$$\frac{2D}{R} T_s \quad (1)$$

其中: R 为本地计算机与远程计算机之间因特网的最小吞吐量; D 为报文的总长度; T_s 为采样周期.

采样控制系统信号不失真的条件为

$$10\omega \frac{2\pi}{T_s} \quad (2)$$

其中 ω 为基于因特网的运动控制系统的工作频率.根据式(1)和(2),可得

$$\omega \frac{TR}{10D} \quad (3)$$

基于因特网的运动控制系统的工作频率 ω 应同时满足以下两个限制条件:不大于原系统的截止频率和满足网络承载能力的要求.由于 ω 的上限是基于因特网的远程控制系统的最大工作频率,因此有

$$\omega = \min \left(\omega_c, \frac{TR}{10D} \right) \quad (4)$$

其中: ω 为基于因特网的运动控制系统的最大工作频率; ω_c 为原系统的截止频率,即闭环对数幅频特性的幅值下降3分贝对应的频率.

在基于因特网的运动控制系统中, T_{\max} 的选择首先满足信号不失真和网络承载能力的双重限制.即

$$\frac{2D}{R} T_{\max} \frac{2\pi}{10\omega} \quad (5)$$

T_{\max} 取得越大,网络中传输的信息量就越少,拥塞发生的几率就越低,网络时延就越小.因此在式(5)计算出的取值范围内,将 T_{\max} 设得较大来间接地减小网络时延.

3 事件-时间驱动方式下采样状态分析

3.1 采样状态分析

无论前向通道还是反馈通道的报文接收端,只会发生下面4种采样情况:

- 1) 11 采样情况,即采样周期的开始和结束都由报文的接收过程触发;
- 2) 10 采样情况,即采样周期的开始是由接收报文触发的,但结束是由 T_{\max} 内未收到报文而自发产生的;
- 3) 00 采样情况,即采样周期的开始和结束都是由 T_{\max} 内未收到报文而自发产生的;
- 4) 01 采样情况,即采样周期的开始是由 T_{\max} 内未收到报文而自发产生的,而结束是由接收报文来触发的.

发生 11 情况的充要条件为 $T(i) + d(i) + T_{\max} < T(i+1) + d(i+1)$; 采样区间为 $t \in [T(i) + d(i), T(i+1) + d(i+1))$.

发生 10 情况的充要条件为 $T(i) + d(i) + T_{\max} < T(i+1) + d(i+1)$; 采样区间为 $t \in [T(i) + d(i), T(i) + d(i) + T_{\max})$.

发生 00 情况的充要条件为 $T(i+1) + d(i+1) > T(i) + d(i) + (n+1) \times T_{\max}$; 采样区间为 $t \in [T(i) + d(i) + n \times T_{\max}, T(i) + d(i) + (n+1) \times T_{\max})$, $n = 1$.

发生 01 情况的充要条件为 $T(i) + d(i) + (n$

$+ 1) \times T_{\max} > T(i + 1) + d(i + 1) > T(i) + d(i) + n \times T_{\max}$; 采样区间为 $t \in [T(i) + d(i) + n \times T_{\max}, T(i + 1) + d(i + 1))$, $n = 1$.

其中: t 是本地计算机或远程计算机的时刻; $T(i)$ 是本地计算机或远程计算机发送的第 i 个报文的时刻; $d(i)$ 是本地计算机或远程计算机发送的第 i 个报文的网络时延

3.2 前向通道采样信息处理器

被控对象可表示为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), o(t) = Cx(t). \quad (6)$$

前向通道采样信息处理器设计原理: 经过前向通道采样信息处理器的信息, 作用在被控对象上的响应效果应与本地计算机发出的信息直接作用在被控对象上的效果等价. 即满足下式:

$$\begin{aligned} & \int_0^{T_b(i)} e^{A(T_b(i)-\tau)} B e(\tau) d\tau = \\ & \int_0^{T_{re}(j)} e^{A(T_{re}(j)-\tau)} B u(\tau) d\tau, \\ & T_{re}(j) = T_b(i) + f_{wd}(i). \end{aligned} \quad (7)$$

其中: $T_b(i)$ 是本地计算机发送第 i 个报文的时刻; $T_{re}(j)$ 是本地计算机发送的第 i 个报文到达远程计算机的时刻; $f_{wd}(i)$ 是本地计算机发送第 i 个报文的网络时延; $e(\tau)$ 是本地计算机在 τ 时刻的偏差信息; $u(\tau)$ 是远程计算机在 τ 时刻作用在被控对象上的控制信息

根据采样状态分析和式(7), 可得前向通道采样信息处理器

$$u(t) = \begin{cases} e(T_b(i)), & 11 \text{ 或 } 10 \text{ 采样;} \\ C \int_0^{T_b(i)} e^{A(T_b(i)-\tau)} B e(\tau) d\tau - \\ C \int_0^{T_{re}(j) + nT_{\max}} e^{A(T_{re}(j) + (n+1)T_{\max}-\tau)} B u(\tau) d\tau \\ C \int_0^{T_{\max}} e^{A(T_{\max}-\tau)} B u(\tau) d\tau, & 01 \text{ 或 } 00 \text{ 采样} \end{cases} \quad (8)$$

3.3 反馈通道采样信息处理器

当发生 11 采样或 10 采样时, 使用接收到报文内的信息; 当发生 00 采样或 01 采样时, 使用前一个采样周期内的信息. 即

$$\begin{aligned} f(t) &= o(T_{re}(j)), \\ t &\in [T_{re}(j) + f_{bd}(j), T_{re}(j + 1) + f_{bd}(j + 1)). \end{aligned} \quad (9)$$

其中: t 是本地计算机的时刻; $f(t)$ 是响应的反馈信号; $o(T_{re}(j))$ 是在 $T_{re}(j)$ 时刻的响应; $f_{bd}(j)$ 是远程计算机发送的第 j 个报文的网络时延

4 网络时延的补偿

在双向通道信息传输过程中运输层使用 TCP

协议, 尽管避免了丢包和乱序现象, 但仍存在网络时延. 前向通道网络时延相当于在这段时间内没有控制信息, 反馈通道网络时延相当于在这段时间内开环控制. 网络时延会影响系统动态性能, 严重时还会造成系统不稳定, 因此对网络时延要进行补偿

4.1 补偿器设计

通过动态补偿器, 可以实现对网络时延实时补偿的目的. 见图 2. 动态补偿器由被控对象的数学模型 $G_0(s)$ 和调节器 Φ 组成. FWP 和 FBP 分别为前向和反馈通道采样信息处理器. 反馈通道中不但要将响应 o 反馈给本地计算机, 还要将作用在被控对象上的控制信息 u 也反馈给本地计算机. 报文格式如图 3 所示

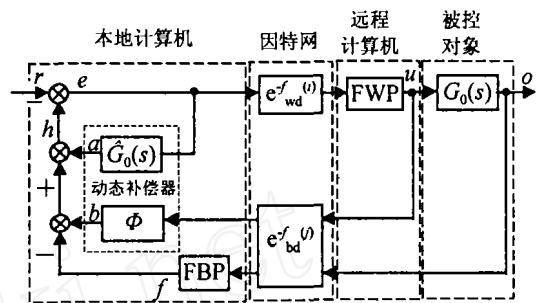


图 2 带有动态补偿器的远程控制系统

| 序号 (4) | 偏差信息 e 或控制信息 u (8 octet) | 响应的反馈信息 o (8 octet) |
|-----------------------|---------------------------------|--------------------------|
| 本地机发送时间戳 (8 octet) | 远程机接收时间戳 (8 octet) | 远程机发送时间戳 (8 octet) |

图 3 报文格式

根据反馈通道的采样状态可以确定调节器 Φ 的结构

当反馈通道发生 11 或 10 采样情况时, 调节器 Φ 由下式定义:

$$b(t) = C \int_0^{T_{re}(j)} e^{A(T_{re}(j)-\tau)} B u(\tau) d\tau, \quad (10)$$

$$t \begin{cases} [T_{re}(j) + f_{bd}(j), \\ T_{re}(j + 1) + f_{bd}(j + 1)), & 11 \text{ 采样;} \\ [T_{re}(j) + f_{bd}(j), \\ T_{re}(j) + f_{bd}(j) + T_{\max}], & 10 \text{ 采样} \end{cases}$$

当反馈通道发生 01 或 00 采样情况时, 调节器 Φ 的输出 b 取为前一个采样周期内的 b 值. 即

$$b(t) = b(v). \quad (11)$$

其中

$$t \begin{cases} [T_{re}(j) + f_{bd}(j) + nT_{\max}, \\ T_{re}(j + 1) + f_{bd}(j + 1)), & 01 \text{ 采样;} \\ [T_{re}(j) + f_{bd}(j) + nT_{\max}, \\ T_{re}(j) + f_{bd}(j) + (n + 1)T_{\max}], & 00 \text{ 采样} \end{cases}$$

$$v \begin{cases} [T_{re}(j) + f_{bd}(j), \\ T_{re}(j) + f_{bd}(j) + T_{max}], n = 1; \\ [T_{re}(j) + f_{bd}(j) + (n - 1)T_{max}, \\ T_{re}(j) + f_{bd}(j) + nT_{max}], n > 1 \end{cases}$$

调节器只需监控反馈通道的采样状态就可完成结构的切换, 无需对网络时延进行预测

4.2 补偿效果的理论分析

假设 1 被控对象的数学模型能精确地反应被控对象, 即

$$\hat{G}_0(s) = G_0(s).$$

在假设前提下进行理论分析:

当反馈通道发生 11 或 10 采样情况, 且被控对象初始状态为零时, 根据式(6)和(9), 可得

$$f(t) = o(T_{re}(j)) = C \int_0^{T_{re}(j)} e^{A(T_{re}(j)-\tau)} B u(\tau) d\tau \quad (12)$$

根据图 3 及式(10)和(12)可知经过补偿的反馈信息为

$$h(t) = f(t) + a(t) - b(t) = \dots = C \int_0^t e^{A(t-\tau)} B e(\tau) d\tau \quad (13)$$

从式(13)可看出, 经过补偿的反馈信息 h 与网络环境无关, 且等于原系统的反馈信息

反馈通道发生 01 或 00 采样时, 式(12)仍然成立 根据式(10)和(11)可知, 调节器输出为

$$b(t) = C \int_0^{T_{re}(j)} e^{A(T_{re}(j)-\tau)} B u(\tau) d\tau \quad (14)$$

其中

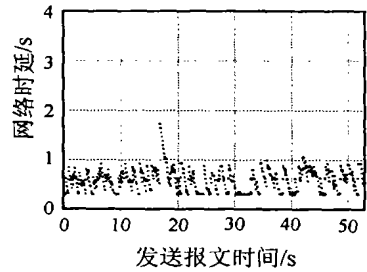
$$t \begin{cases} [T_{re}(j) + f_{bd}(j) + nT_{max}, \\ T_{re}(j + 1) + f_{bd}(j + 1)], 01 \text{ 采样}; \\ [T_{re}(j) + f_{bd}(j) + nT_{max}, \\ T_{re}(j) + f_{bd}(j) + (n + 1)T_{max}], 00 \text{ 采样} \end{cases}$$

根据图 3 及式(12)和(14)可知当反馈通道发生 01 或 00 采样时, 式(13)也是成立的

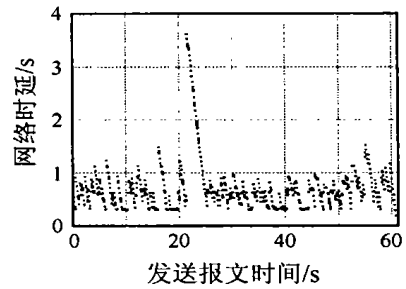
通过上述理论分析得出以下结论: 当被控对象数学模型能精确地反映被控对象时, 经过补偿的反馈信息 $h(t)$ 与因特网环境无关, 只与被控对象有关, 且等于原系统的反馈信息

5 试验结果

前向和反馈通道的网络环境如图 4 所示, 本地机位于北京, 远程机位于日本东京工业大学北川研究室 运输层采用 TCP 协议, 两机之间的路由器共 27 个, 在事件 - 时间驱动方式下测试, 其中采样周期最大值 $T_{max} = 100 \text{ ms}$ 为了保证试验条件的一致性



(a) 前向通道网络环境



(b) 反馈通道网络环境

图 4 因特网环境

和试验结果的可比性, 采用模拟因特网, 使试验中的网络环境与图 4 环境相同 被控对象是伺服阀控缸, 系统输出是液压缸的位置信号 实验条件: 油压 5 MPa, 油温 30 °C

图 5 是本文提出的事件 - 时间驱动下的控制算法与文献[4]时间驱动下的控制算法的单位阶跃响应试验对比 原系统是双向通道未组合进因特网的闭环控制系统, 因此原系统的响应是评价系统设计优劣的标准 时间驱动下不可避免地会发生空采样与多采样交替出现的现象, 当发生空采样时执行器没有收到任何报文, 因而没有控制信息作用在被控对象上, 系统响应变慢 事件 - 时间驱动下避免了空采样与多采样的影响, 因而系统响应加快 但事件 - 时间驱动方式下的响应与原系统的响应相比, 曲线的波动较大, 原因是时变的采样周期造成控制信息不能平稳地作用在被控对象上 设计出智能采样信息处理器是解决这个问题的途径

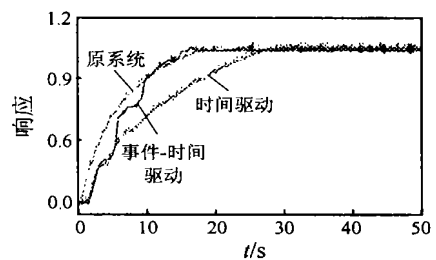


图 5 单位阶跃响应的试验结果

(下转第 763 页)

显然 $\frac{sZ_2}{s^2 + c_{1p}s + c_{1i}}$ 的脉冲相应函数为

$$h(t) = \begin{cases} ae^{-\alpha t} + be^{-\beta t}, & t \geq 0; \\ 0, & t < 0 \end{cases}$$

因此式(4-11)可以写为

$$z_1(t) = hz_2 = \int_0^t h(t-\tau)z_2(\tau)d\tau = \int_0^t (ae^{-\alpha(t-\tau)} + be^{-\beta(t-\tau)})z_2(\tau)d\tau \quad (4-12)$$

其中 $z_1(t)$ 和 $z_2(t)$ 分别是 $Z_1(s)$ 和 $Z_2(s)$ 的反 Laplace 变换 由于文献[1]只能保证 $z_2 \in L^\infty$, 由式

(4-12) 知 $\int_0^t z_1(\tau)d\tau < \infty$ 不能保证, 从而由[1]的式

(13) 知 $\alpha_1 \in L^\infty$ 也不能保证, 故由[1]的式(11)知 $x_2 = z_2 + \alpha_1 \in L^\infty$ 不成立, 所以[1]中关于 $x_2 \in L^\infty$ 的证明是错误的

5 结 语

本文针对一类磁悬浮系统, 在较弱的条件下, 通过引入监督控制, 保证了闭环系统的状态落入一紧集中 然后通过 RBF 网络和反推设计技术给出了一种鲁棒自适应控制器的设计, 严格地分析了自适应控制系统的稳定性和跟踪性能 当然, 如果不引入监督控制, 也可通过对系统的状态初值加条件来证明闭环系统的状态落入某一紧集中^[4-6].

参考文献(References)

[1] Yang Z J, Tateishi M. Adaptive Robust Nonlinear

Control of a Magnetic Levitation System [J] *Automatica*, 2001, 37(7): 1125-1131.

[2] Krstic M, Kanellakopoulos L, Kokotovic P V. *Nonlinear and Adaptive Control Design* [M] New York: John Wiley & Sons, 1995

[3] Haykin S. *Neural Networks* [M] New York: Macmillan College Publishing Company, 1994

[4] Ge S S, Hang C C, Lee T H, et al. *Stable Adaptive Neural Network Control* [M] London: Kluwer Academic Publishers, 2003

[5] 解学军, 王远. 基于神经元网和带死区的最小二乘法的非线性离散时间系统的自适应控制[J]. *控制理论与应用*, 1999, 16(3): 355-360

(Xie X J, Wang Y. Adaptive Control of Nonlinear Discrete-time Systems Based on Neural Networks and Least-squares Algorithm with Dead-zone [J]. *Control Theory and Applications*, 1999, 16(3): 35-360)

[6] 解学军, 禹梅, 张嗣瀛. 基于最小二乘法及神经网络的非线性离散系统的自适应控制[J]. *控制与决策*, 2003, 18(2): 243-246

(Xie X J, Yu M, Zhang S Y. Adaptive Control of Nonlinear Discrete-time Systems Based on Neural Networks and Least Squares Algorithm and Neural Networks [J]. *Control and Decision*, 2003, 18(2): 243-246)

[7] Ioannou P A, Sun J. *Robust Adaptive Control* [M] New Jersey: Prentice-Hall, 1996

(上接第 758 页)

6 结 语

以往的研究成果多使用时间驱动方式, 出现的多采样和空采样现象造成系统很难控制 当时延较大时, 事件驱动又容易造成采样信息失真 综合时间驱动和事件驱动的优点, 提出事件-时间驱动方式, 采样周期将随着网络时延的变化而变化 通过对事件-时间驱动下的采样状态分析, 得出了采样信息处理器和动态补偿器的设计方案, 理论分析和试验结果都证明控制算法可以对网络时延进行实时地补偿, 保证了系统稳定性和稳态动态性能, 可在任何因特网环境下实现运动控制的任务

参考文献(References)

[1] Kim Dong-sung, Young Sam Lee, Wook Hyun Kwon, et al. Maximum Allowable Delay Bounds of Networked Control Systems [J]. *Control Engineer Practice*, 2003,

11(11): 1301-1313

[2] Lian Feng-li, Moyné J, Tilbury D. Network Design Consideration for Distributed Control Systems [J]. *IEEE Trans on Control System Technology*, 2002, 10(2): 297-307.

[3] Hu S S, Zhu Q X. Stochastic Optimal Control and Analysis of Stability of Networked Control Systems with Long Delay [J]. *Automatica*, 2003, 39(11): 1877-1884

[4] 黄杰, 吴平东, 王晓峰, 等. 基于 TCP/IP 协议的远程控制系统中变结构动态补偿器的研究[J]. *控制理论与应用*, 2003, 20(6): 849-854

(Huang J, Wu P D, Wang X F, et al. Variable Structure Compensator in Telecontrol System Based on TCP/IP Protocol [J]. *Control Theory and Application*, 2003, 20(6): 849-854)