

for some special industrial robots, it can be widely applied to coordinated-motion control. The algorithm has been used in real time coordinated-motion control of two industrial robots. The object deforms resulted from kinematic and control errors are discussed in the paper.

Key words: robot; Coordinated-motion control; error analysis; compensation algorithm; real time control

控制理论专业杂志概述*

陆吉林

林云寰

(复旦大学数学系)

(中山大学数学系)

23. IEEE Control, Systems Magazine (IEEE 控制系统杂志), 1981-, 美国电气与电子工程师协会所属控制系统学会主办, 季刊, 刊载有关计算机控制系统研究和应用的论文.

24. IEEE Journal of Robotics and Automation (IEEE 机器人学与自动化杂志), 1986-, 季刊, 刊载机器人、生产控制自动化方面的理论和应用的原始研究论文.

25. IEEE Transactions on Automatic Control (IEEE 自动控制汇刊), 1956-, 月刊, 刊载有关自动控制系统的理论、设计与应用方面的研究论文、评论、新技术介绍等.

26. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics (IEEE 系统、人与控制论汇刊), 1971-, 双月刊, 内容有大规模系统、最优化、判定分析、模拟、控制论基础、图像识别、自适应系统与学习系统、生物控制论和人机系统等方面.

27. IMA Journal of Mathematical Control and Information (IMA 数学控制与信息杂志), 1984-, 季刊, 英国牛津大学应用数学研究所编辑, 发表有关数学控制理论, 系统论及相关信息科学理论研究的文章.

28. Information and Computation (信息与计算), 1957-, 月刊, 美国 Academic 出版社出版, 原刊名为 Information and Control, 1988 年改为现名, 发表理论计算机科学、信息论、控制论等方面的原始研究论文和评论.

29. International Journal of Control (国际控制杂志), 1965-, 月刊, 英国 Taylor & Francis 出版社出版, 内容涉及控制、控制系统、模型简化、最优控制、灵敏度、稳定性、随机系统、线性系统、非线性系统等.

30. International Journal of Robotics Research (国际机器人研究杂志), 1982-, 季刊, 美国麻省理工学院出版社出版, 刊载有关机器人知觉、动作控制、自动机械作用, 以及造型、系统和应用等方面的研究论文.

31. Journal A: Quarterly Journal of Automatic Control (自动控制季刊), 1959-, 季刊, 比利时自动控制联合会、荷兰皇家工程师协会控制与工程部联合主办, 刊载自动控制理论与应用方面的研究论文, 内容涉及到仪表应用, 计算机控制, 过程控制, 逻辑系统, 伺服系统等. (下转第 74 页)

* 本文的前 22 条刊于本刊 1989 年第 3 期.

具有鲁棒稳定性的伺服补偿器设计

王庆国 孙优贤 李成立

(浙江大学工业控制研究所, 杭州)

摘要 本文发展一种鲁棒控制器设计方法, 并将该法用于一个大型精馏塔的控制. 利用该法设计的控制器, 能使闭环系统满足稳定性, 渐近调节和跟踪, 以及某些瞬态性能指标, 即使在结构性建模不确定的情况下, 这些性能指标仍能满足.

关键词: 伺服补偿器设计; 鲁棒稳定性; 鲁棒镇定; 多变量系统; 精馏塔控制

(上接第 55 页)

32. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control (动力系统、测定与控制杂志), 1971—, 季刊, 美国机械工程师学会(ASME)主办, 内容有运输、生物工程、射流技术与流体动力控制, 控制系统组件, 城市动力学系统与社会问题, 仪表与经济系统动力学, 系统与控制理论等.

33. Journal of Economic Dynamics and Control (经济动力学与控制杂志), 1979—, 季刊, 荷兰 Elsevier 出版社出版, 刊载经济动力学、经济学与控制论的研究论文.

34. Journal of Guidance, Control and Dynamics (制导控制和动力学杂志), 1978—, 双月刊, 美国航空与航天学会(AIAA)主办, 刊载与航天和航空系统有关的动力学、稳定性、制导、控制、导航、最优化、电子学和信息处理的发展、设计和应用方面的研究论文.

35. Journal of Information and Optimization Sciences (信息与最优化科学杂志), 1980—, 年出 3 期, 印度分析出版社出版, 刊载信息科学和最优化科学及其相关领域的基础与应用研究论文.

36. Journal of Information Processing and Cybernetics (信息处理与控制论杂志), 1964—, 月刊, 民主德国科学出版社出版, 刊载计算机理论、最优化理论、数学语言学、信息处理和控制论等在自然科学和社会科学领域应用的论文.

37. Journal of Optimization Theory and Applications (最优化理论与应用杂志), 1967—, 月刊, 美国 Plenum 公司出版, 发表最优化理论及其在科学和工程中应用的研究论文, 涉及线性与非线性规划, 动态规划, 最优化控制, 对策论等.

38. Journal of Robotic Systems (机器人系统杂志), 1984—, 季刊, 美国 Wiley 公司出版, 刊载有关机器人系统的软、硬件, 操作, 传感器, 控制和外围设备方面的研究论文.

39. Kybernetes (控制论), 1972—, 季刊, 英国 MCB 大学出版社出版, 以刊载原始论文和研究简报为主, 兼载书评、会议消息等, 内容涉及到最广泛范围的控制论与系统的交叉学科研究.

40. Kybernetika (控制论), 1965—, 双月刊, 捷克斯洛伐克控制论学会主办, 刊载控制论研究及应用的文章和简讯.

41. Large Scale Systems: Theory and Applications (大规模系统: 理论与应用), 1980—, 双月刊, 荷兰 Elsevier 出版社出版, 内容有系统的稳定性, 大系统中的信息判定, 随机状态或动态系统的阶层最优化控制, 奇异扰动技术等.

42. Mathematics of Control, Signals, and Systems (控制、信号和系统数学), 1988—, 季刊, 联邦德国 Springer 出版社出版, 刊载有关数学系统理论、控制论和信号处理的研究论文, 内容涉及线性与非线性控制系统的代数与几何问题, 随机控制, 稳定性, 数值与计算技术, 大型系统, 分散与分级控制, 强适应和自适应系统动态优化和最优化控制等. (下转第 91 页)

可以证明：基于观测数据 $(z_1, \dots, z_k)$, Q , R 的极大后验 (MAP) 估计为^[2, 5]

$$\begin{aligned}\hat{Q}_k &= \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k (\hat{x}_{j|k} - A\hat{x}_{j-1|k})(\hat{x}_{j|k} - A\hat{x}_{j-1|k})^T \\ &= \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \hat{w}_{j-1|k} \hat{w}_{j-1|k}^T,\end{aligned}\quad (3)$$

$$\begin{aligned}\hat{R}_k &= \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k (z_j - H\hat{x}_{j|k})(z_j - H\hat{x}_{j|k})^T \\ &= \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \hat{v}_{j|k} \hat{v}_{j|k}^T,\end{aligned}\quad (4)$$

其中 $\hat{x}_{j|k}$, $\hat{w}_{j|k}$, $\hat{v}_{j|k}^T$ 分别为基于观测 $(z_1, \dots, z_k)$ 对 x_j , w_j , v_j 的最优估值. 而由 (1) 和 (2) 式有

$$z_k = H(I_n - q^{-1}A)^{-1}w_{k-1} + v_k, \quad (5)$$

这里 q^{-1} 是单位延迟算子. 由 Fadeeva 求逆公式^[6]

$$(I_n - q^{-1}A)^{-1} = \sum_{i=0}^{n-1} F_i q^{-i} / \sum_{i=0}^n a_i q^{-i}, \quad (6)$$

式中纯量系数 a_i 和矩阵 F_i 可递推计算为

$$\begin{aligned}a_k &= -\frac{1}{k} \text{tr}(AF_{k-1}); \quad a_0 = 1; \quad k = 1, 2, \dots, n; \\ F_k &= AF_{k-1} + a_k I_n; \quad F_0 = I_n; \quad k = 1, 2, \dots, n-1,\end{aligned}$$

式中 I_n 为 $n \times n$ 单位阵, tr 为矩阵的迹, 我们有

$$A(q^{-1})z_k = C(q^{-1})w_{k-1} + A(q^{-1})v_k, \quad (7)$$

其中 $A(q^{-1})$, $C(q^{-1})$ 为多项式矩阵

$$\begin{aligned}A(q^{-1}) &= I_m + a_1 I_m q^{-1} + \dots + a_n I_m q^{-n}; \\ C(q^{-1}) &= C_0 + C_1 q^{-1} + \dots + C_{n-1} q^{-(n-1)}; \quad C_i = HF_i.\end{aligned}\quad (8)$$

注意 (7) 式右端的两个滑动平均 (MA) 过程可用一个等价的 MA 过程表示为^[3, 6]

$$u_k = C(q^{-1})w_{k-1} + A(q^{-1})v_k = D(q^{-1})e_k, \quad (9)$$

其中 $D(q^{-1}) = I_m + D_1 q^{-1} + \dots + D_n q^{-n}$ 是稳定的, e_k 是零均值、协方差为 Q_e 的白噪声. 于是有 ARMA 观测模型

$$A(q^{-1})z_k = D(q^{-1})e_k. \quad (10)$$

因为矩阵 A 是稳定的, 易知 $\det A(q^{-1})$ 的零点在单位圆外, 因而 $A(q^{-1})$ 是稳定的. 从而 ARMA 过程 (10) 式是平稳可逆的. 这引出 e_k 是 z_k 的新息过程, 故称 (10) 式为观测过程 z_k 的 ARMA 新息模型.

(10) 式中的 D_i 和 Q_e 可用 Gevers 和 Wouters 法计算^[4]:

$$\text{令 } R_{ue}(t, t-i) = R_u(i) - \sum_{j=i+1}^n R_{ue}(t, t-j) R_e^{-1}(t-j, t-j) R_{ue}^T(t-i, t-j),$$

其中规定对 $j < 0$, $R_{ue}(t, j) = 0$, 且

$$R_e(0, 0) = R_{ue}(0, 0) = R_u(0),$$

则有

$$Q_e = \lim_{t \rightarrow \infty} R_{ue}(t, t); \quad D_i = \lim_{t \rightarrow \infty} R_{ue}(t, t-i) Q_e^{-1}.$$

上式中 $R_u(i)$ 是 u_k 是相关函数, 注意到 $u_k = A(q^{-1})z_k$, 其估值可代以采样协方差:

$$\hat{R}_u(i) = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M u_k u_{k-i}^T, \quad i = 0, 1, \dots, n.$$

周知, 观测序列 $(z_t, z_{t-1}, \dots)$ 与新息序列 $(e_t, e_{t-1}, \dots)$ 含有同样的统计信息, 它们生成同样的 Hilbert 空间, 因此基于观测 $(z_t, z_{t-1}, \dots)$ 的 w_k 和 v_k 的稳态最优估值 $\hat{w}_{k|t}$ 和 $\hat{v}_{k|t}$ 分别是 w_k 和 v_k 在由 $(e_t, e_{t-1}, \dots)$ 所生成的 Hilbert 空间上的射影. 由白噪声 e_k 的正交性和射影公式^[6] 可得

$$\hat{w}_{k|t} = \sum_{j=0}^{\infty} E(w_k e_{t-j}^T) Q_e^{-1} e_{t-j}, \quad (11)$$

$$\hat{v}_{k|t} = \sum_{j=0}^{\infty} E(v_k e_{t-j}^T) Q_e^{-1} e_{t-j}. \quad (12)$$

由 (9) 和 (10) 式, e_k 可分别表为

$$\begin{aligned} e_k &= D^{-1}(q^{-1}) C(q^{-1}) w_{k-1} D^{-1}(q^{-1}) A(q^{-1}) v_k \\ &= \sum_{j=0}^{\infty} S_j w_{k-1-j} + \sum_{j=0}^{\infty} G_j v_{k-j} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\text{和 } e_k = D^{-1}(q^{-1}) A(q^{-1}) z_k = \sum_{j=0}^{\infty} G_j z_{k-j}. \quad (14)$$

其中系数阵 S_j 和 G_j 由如下恒等式得到:

$$\begin{aligned} C(q^{-1}) &= D(q^{-1}) (S_0 + S_1 q^{-1} + \dots), \\ A(q^{-1}) &= D(q^{-1}) (G_0 + G_1 q^{-1} + \dots). \end{aligned}$$

比较恒等式两端 q^{-j} 的系数阵有递推公式:

$$S_j = -D_1 S_{j-1} - \dots - D_n S_{j-n} + C_j,$$

式中 $S_0 = C_0 = H$; $S_j = 0$, 对 $j < 0$; $C_j = 0$, 对 $j > n-1$.

$$G_j = -D_1 G_{j-1} - \dots - D_n G_{j-n} + a_j I_m,$$

式中 $G_0 = I_m$; $G_j = 0$, 对 $j < 0$; $a_j = 0$, 对 $j > n$.

因 w_k 和 v_k 是独立的, 把 (13) 式代入 (11) 和 (12) 式可推得如下最优固定滞后平滑器:

$$\hat{w}_{k|k+N} = \sum_{j=0}^{N-1} Q S_j^T Q_e^{-1} e_{k+1-j} \quad (15)$$

$$\text{和} \quad \hat{v}_{k|k+N} = \sum_{j=0}^N R G_j^T Q_e^{-1} e_{k+j}, \quad (16)$$

式中 N 是固定滞后. 把 (15) 和 (16) 式代入 (3) 和 (4) 式可得 Q , R 的次优估值器:

$$\hat{Q}_k = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \hat{w}_{j-1|j-1+N} \hat{w}_{j-1|j-1+N}^T, \quad (17)$$

$$\hat{R}_k = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \hat{v}_{j|j+N} \hat{v}_{j|j+N}^T. \quad (18)$$

但此估值器是有偏的. 事实上,

$$E(\hat{Q}_k) = Q q_N Q; \quad E(\hat{R}_k) = R r_N R, \quad (19)$$

其中 E 是数学期望号, 且

$$q_N = \sum_{j=0}^{N-1} S_j^T Q_e^{-1} S_j; \quad r_N = \sum_{j=0}^N G_j^T Q_e^{-1} G_j. \quad (20)$$

这引出如下次优无偏 MAP 估值器:

$$\hat{Q}_k = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \left(\hat{w}_{j-1|j-1+N} \hat{w}_{j-1|j-1+N}^T - OE \right), \quad (21)$$

$$\hat{R}_k = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \left(\hat{v}_{j|j+N} \hat{v}_{j|j+N}^T - RE \right), \quad (22)$$

其中 OE 和 RE 分别为

$$QE = Q q_N Q - Q; \quad RE = R r_N R - R. \quad (23)$$

易知估值器 (21) 和 (22) 式是无偏的:

$$E(\hat{Q}_k) = Q; \quad E(\hat{R}_k) = R. \quad (24)$$

置 QE 和 RE 的估值分别为

$$QE_k = \hat{Q}_{k-1} q_N \hat{Q}_{k-1} - \hat{Q}_{k-1}, \quad RE_k = \hat{R}_{k-1} r_N \hat{R}_{k-1} - \hat{R}_{k-1}, \quad (25)$$

并在 (21) 和 (22) 式中以 QE_k 和 RE_k 分别近似代替 QE 和 RE , 可得如下次优无偏递推 MAP 估值器:

$$\hat{Q}_k = \left(1 - \frac{1}{k} \right) \hat{Q}_{k-1} + \frac{1}{k} \left(\hat{w}_{k-1|k-1+N} \hat{w}_{k-1|k-1+N}^T - QE_k \right), \quad (26)$$

$$\hat{R}_k = \left(1 - \frac{1}{k} \right) \hat{R}_{k-1} + \frac{1}{k} \left(\hat{v}_{k|k+N} \hat{v}_{k|k+N}^T - RE_k \right), \quad (27)$$

其初值为 $\hat{Q}_0 = Q_0$, $\hat{R}_0 = R_0$.

容易看出, 基于 Gevers 和 Wouters 算法, 在参数阵 G_j , S_j , Q_e , q_N 和 r_N 被确定之后, 只要把 Q 和 R 的最新估值代入 (15) 和 (16) 式, 便可交替地使用估值器 (26) 和 (27) 式与 (15) 和 (16) 式来递推求得 Q 和 R 的估值以及白噪声估值. 应指出, 如果

用递推增广最小二乘法^[6]或其他方法在线辨识 ARMA 新息模型 (10) 式, 则可在线计算估值 $\hat{G}_j$, $\hat{S}_j$, $\hat{Q}_e$, $\hat{q}_N$, $\hat{r}_N$, $\hat{e}_k$, 从而可得到自适应 Q , R 递推估值器和相应的自适应白噪声平滑估值器.

3. 数值仿真例子

例 1 考虑纯量系统^[2]

$$x_{k+1} = 0.9x_k + w_k, \quad (28)$$

$$z_k = x_k + v_k, \quad (29)$$

其中 $x_0 = 1$, $Q = 7$, $R = 5$. 取初值 $\hat{Q}_0 = 10$, $\hat{R}_0 = 10$, 分别用本文算法和 Sage 和 Husa^[5] 算法递推第 400 步的 Q , R 的估值如表 1 所示, 其中还列出了应用本文算法时不同滞后 N 对估值精度的影响. 可看到本文算法和精度明显高于 Sage 和 Husa 算法的精度. 还可看到本文算法随着固定滞后 N 的增加, 估值精度有所改进, 理论上也应如此. 但 N 取较大时将增加计算量, 且精度改进并不明显. 因此在应用中通常取固定滞后 $N = 3 \sim 5$ 时即可满足精度的要求.

表 1 例 1 的仿真结果

协方差 真 值	Sage 算 法估值	本文算法的估值(对不同固定滞后 N)					
		$N=1$	$N=2$	$N=3$	$N=4$	$N=5$	$N=6$
$Q=7$	7.963	6.216	6.235	6.673	6.812	6.864	6.833
$R=5$	3.807	4.377	4.675	4.497	4.446	4.440	4.452

参 考 文 献

- (1) Mendel, J.M., Minimum-Variance Deconvolution, IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, 19,3, (1981), 161-171.
- (2) Soeda, T., Yoshimura, T., Tabuchi, T., A Suboptimal Identification of Noise Covariances in Discrete Time Linear Systems, Int. J. Control, 27,3, (1978).
- (3) Box, G.E.P., Jenkins, G.M., Time Series Analysis, Holden-Day, San Francisco, (1970).
- (4) Gevers, M., Wouters, W.R.E., An Innovation Approach to the Stochastic Realization Problem, Journal A, 19, 2, (1978).
- (5) Sage, A.P., Husa, G.W., Adaptive Filtering with Unknown Prior Statistics, JACC, (1969), 769-776.
- (6) 邓自立、郭一新, 动态系统分析及其应用, 辽宁科学技术出版社, 沈阳, (1985).

A Recursive Estimation Approach to Noise Covariances

Luan Enlian

(Harbin Economic, Technical and Social Development and Research Centre)

Deng Zili

(Institute of Applied Mathematics, Heilongjiang University, Harbin)

Abstract: Based on white noise estimators, this paper presents a new recursive estimation approach to the noise covariances in the state-space model. Suboptimal unbiased maximum a posteriori (MAP) recursive estimators of noise covariances are given, which can be applied to signal deconvolution and Kalman filtering. Simulation example shows usefulness of proposed result.

Key words: signal deconvolution; Kalman filtering; noise statistics estimators; white noise estimators

(上接第 74 页)

43. Measurement and Control (计量与控制), 1968—, 双月刊, 英国计量与控制学会主办, 刊载学会的会议论文, 内容有计量与自动控制仪器的设计, 应用方面的理论与技术。

44. Messen—Steuern—Regeln (测量—控制—调节), 1958—, 月刊, 民主德国 VEB 出版社出版, 刊载自动控制方面的论文。

45. Moscow University Computational Mathematics and Cybernetics (莫斯科大学计算数学与控制论), 1977—, 季刊, 是苏联期刊《莫斯科大学通报》第 15 辑的英译本, 刊载研究论文与简讯。

46. Numerical Functional Analysis and Optimization (数值函数分析与最优化), 1979—, 双月刊, 美国 Marcer Dekker 出版社出版, 刊载数值分析、近似法、最优化和控制论等领域的研究与应用方面的论文。

47. Optimal Control Applications and Methods (最优控制应用与方法), 1980—, 季刊, 由设在英国的 Wiley 分公司出版, 刊载理论与应用文章, 兼载评论及简讯等, 内容有最优控制在结构工程、工业流程、医药剂量分析等方面的应用。

48. Optimization (最优化), 1970—, 双月刊, 民主德国科学出版社出版, 刊载线性规划和运筹学方面的理论与应用研究论文、评论、会议文献及书评等, 内容有线性、非线性、随机、参数、离散及动态规划, 控制论、对策论等。

49. Problems of Control and Information Theory (控制与信息理论问题), 1971—, 双月刊, 匈牙利科学出版社出版, 刊载控制与信息的理论与应用方面的文章及书评。

50. RAIRO: Automatique Productique Informatique Industrille (法国自动化、信息与运筹学: 自动控制生产系统), 1977—, 双月刊, 法国经济与技术控制论协会编辑, 原刊名为 RAIRO: Automatique, 1985 年改为现名, 刊载有关自动化生产与自动控制系统的理论和技术方面的研究论文。

51. Robotics and Automation (机器人学与自动化), 1986—, 年出 3 期, 国际科学技术发展协会 (IASTED) 编辑, 刊载有关机器人与自动化系统的理论、设计和应用方面的论文, 内容有模拟、设计、控制、传感器、视觉、图像处理等。(下转第 97 页)