

基于递推闭环子空间辨识的自适应预测控制方法

苏奇全^{1,2}, 贾宏光¹, 朱明超¹, 刘 慧¹, 宣 明¹

1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

基金项目: 中国科学院知识创新工程国防科技创新重要项目(YYYJ-1122)

通信作者: 苏奇全, suqq12345@163.com 收稿/录用/修回: 2014-03-26/2014-07-02/2014-08-25

摘要

针对存在噪声干扰与时变特性的线性系统的模型不确定性问题, 提出了一种基于递推闭环子空间辨识的自适应预测控制方法. 通过结合 PID (proportional-integral-derivative) 控制采用新的目标函数, 对闭环子空间预测控制算法进行改进, 推导出具有类似 PID 结构的闭环子空间预测控制算法; 采用固定输入输出数据集大小的递推方法将改进后的算法在线实施, 通过采用一种简单直观的更新方法代替 LQ 分解, 有效提高了在线计算效率. 最后, 通过仿真实验验证了方法的有效性.

关键词

闭环子空间辨识
预测控制
比例—积分—微分
自适应控制
中图分类号: TP273
文献标识码: A

An Adaptive Predictive Control Method Based on Recursive Closed-loop Subspace Identification

SU Qiquan^{1,2}, JIA Hongguang¹, ZHU Mingchao¹, LIU Hui¹, XUAN Ming¹

1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

In order to deal with model uncertainty problem for linear systems with time-variability, which exists due to noise perturbances in the model, an adaptive predictive control method is proposed based on recursive closed-loop subspace identification. A closed-loop subspace predictive control algorithm is constructed by making improvements to the closed-loop subspace predictive control algorithm through the incorporation of a PID-type objective function. This proposed algorithm is implemented online using a recursive algorithm, with fixed-size input and output data, and a simple, direct update method, which replaces LQ decompositions, for improving computational efficiency. Simulations prove this closed-loop subspace control algorithm to be efficient, predictive, and adaptive.

Keywords

closed-loop subspace identification;
predictive control;
proportional-integral-derivative (PID);
adaptive control

1 引言

预测控制是 20 世纪 70 年代末期发展起来的一种基于模型的控制算法, 经过多年的研究与应用, 已成为一种重要的现代控制方法^[1-4]. 模型精度是影响预测控制性能的一个重要因素, 而实际工程系统由于条件受限与噪声干扰等原因, 难以建立精确的系统模型. 针对这种模型不确定性问题, 文[5]最先结合预测控制与子空间辨识算法 N4SID (numerical algorithms for subspace state space system identification), 提出了子空间预测控制算法 SPC (subspace predictive control). SPC 算法仅通过输入输出数据就能实现不依赖模型的预测控制, 因此能够避免建模精度对控制

性能的影响. 目前, 这种完全数据驱动算法已得到越来越多的研究与应用^[6-9].

实际工程系统的时变特性也会造成模型不确定性问题, 往往需要进行自适应控制才能达到期望的控制效果. 不少学者在 SPC 算法的基础上, 结合递推子空间辨识方法, 研究自适应预测控制方法^[10-13]. 但因为 N4SID 算法是一种开环子空间辨识算法, 当系统闭环且存在噪声时, N4SID 算法会出现估计偏差^[14], 所以这类基于 SPC 算法的自适应预测控制方法并不适用于闭环且存在噪声的系统. 另一方面, 子空间辨识方法涉及较多的矩阵运算, 为提高在线计算效率, 目前主要采用的方法是用 Givens 旋转方法进行快速 LQ 分解更新^[10-12], 另外还有用 Cholesky 分

解代替 LQ 分解^[15]、快速滑动窗口^[16-17]等方法. 虽然采用这些矩阵分解修正方法能够提高计算效率, 但也难以避免要考虑其过于复杂、数值稳定性与迭代收敛性等问题.

文[18]提出了闭环子空间预测控制算法 CLSPC (closed-loop subspace predictive control), 该算法避免了 SPC 算法的问题, 适用于闭环且存在噪声干扰的系统. 本文在 CLSPC 算法的基础上, 提出了一种自适应预测控制方法. 通过结合 PID 控制, 采用新的目标函数, 对 CLSPC 算法进行改进, 并采用固定输入输出数据集大小的递推方法将改进后的算法在线实施. 为提高在线计算效率, 根据输入输出数据组成的 Hankel 矩阵与相应 LQ 分解的 L 矩阵的特点, 采用一种简单直观的方法进行系统马尔可夫参数矩阵的更新. 最后, 通过仿真验证方法的有效性.

2 改进的闭环子空间预测控制算法

考虑如下线性离散系统:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k + \mathbf{K}\mathbf{e}_k \\ \mathbf{y}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{e}_k \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{x}_k \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{u}_k \in \mathbb{R}^m$, $\mathbf{y}_k \in \mathbb{R}^l$, \mathbf{e}_k 为零均值高斯白噪声序列.

若已知系统 $p + N - 1$ 对数据 $\{\mathbf{u}_k, \mathbf{y}_k\}$, 构造 Hankel 矩阵 $\mathbf{Y}_k = [\mathbf{y}_k \ \mathbf{y}_{k+1} \ \dots \ \mathbf{y}_{k+N-1}]$ 与 $\mathbf{Z}_p = [\mathbf{U}_{k-p}^T \ \mathbf{Y}_{k-p}^T \ \dots \ \mathbf{U}_{k-1}^T \ \mathbf{Y}_{k-1}^T]^T$. 记 $\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{A} - \mathbf{K}\mathbf{C}$, $\tilde{\mathbf{X}}_0 = [\mathbf{C}\tilde{\mathbf{A}}^{p-1}\mathbf{B} \ \mathbf{C}\tilde{\mathbf{A}}^{p-1}\mathbf{K} \ \dots \ \mathbf{C}\mathbf{B} \ \mathbf{C}\mathbf{K}]$ 为系统马尔可夫参数矩阵, 其最优估计值 $\hat{\tilde{\mathbf{X}}}_0$ 可由 \mathbf{Y}_k 与 \mathbf{Z}_p 求解:

$$\hat{\tilde{\mathbf{X}}}_0 = \min_{\tilde{\mathbf{X}}_0} \|\mathbf{Y}_k - \tilde{\mathbf{X}}_0 \mathbf{Z}_p\| \quad (2)$$

记 $\bar{\mathbf{Z}}_p \triangleq [\mathbf{u}_{k-p}^T \ \mathbf{y}_{k-p}^T \ \dots \ \mathbf{u}_{k-1}^T \ \mathbf{y}_{k-1}^T]^T$, $\mathbf{u}_f \triangleq [\mathbf{u}_k^T \ \mathbf{u}_{k+1}^T \ \dots \ \mathbf{u}_{k+f-2}^T]^T$, 分别表示在控制作用 k 时刻的过去输入输出序列与将来控制输入序列. k 时刻的将来输出序列的最优估计值 $\hat{\mathbf{y}}_f \triangleq [\hat{\mathbf{y}}_{k+1}^T \ \hat{\mathbf{y}}_{k+2}^T \ \dots \ \hat{\mathbf{y}}_{k+f-1}^T]^T$ 可由以下输出预测器得到:

$$\hat{\mathbf{y}}_f = \mathbf{I}^{(i)} \bar{\mathbf{Z}}_p + \mathbf{A}^{(i)} \mathbf{u}_f \quad (3)$$

矩阵 $\mathbf{I}^{(i)}$ 与 $\mathbf{A}^{(i)}$ 由 $\hat{\tilde{\mathbf{X}}}_0$ 构造, 具体可见文[18].

结合 PID 控制, 采用如下目标函数^[19-20]:

$$J_k = k_p \Delta \tilde{\mathbf{e}}_f^T \Delta \tilde{\mathbf{e}}_f + k_i \tilde{\mathbf{e}}_f^T \tilde{\mathbf{e}}_f + k_d \Delta^2 \tilde{\mathbf{e}}_f^T \Delta^2 \tilde{\mathbf{e}}_f + \lambda \Delta \mathbf{u}_f^T \Delta \mathbf{u}_f \quad (4)$$

式中, k_p 、 k_i 与 k_d 分别为比例、积分与微分系数, λ 为加权系数, Δ 为差分算子, 误差序列 $\tilde{\mathbf{e}}_f = \mathbf{r}_f - \hat{\mathbf{y}}_f$, $\mathbf{r}_f \triangleq [\mathbf{r}_{k+1}^T \ \mathbf{r}_{k+2}^T \ \dots \ \mathbf{r}_{k+f-1}^T]^T$ 为参考输入柔化序列, 由下式构造得到:

$$\begin{cases} \mathbf{r}_k = \mathbf{y}_k \\ \mathbf{r}_{k+j} = \alpha \mathbf{r}_{k+j-1} + (1-\alpha) \mathbf{d}_k, \quad j=1, 2, \dots \end{cases} \quad (5)$$

其中, $0 \leq \alpha < 1$ 为柔化因子, \mathbf{d}_k 为参考输入.

由式(3)可得:

$$\tilde{\mathbf{e}}_f = \mathbf{r}_f - \mathbf{I}^{(i)} \bar{\mathbf{Z}}_p - \mathbf{A}^{(i)} \mathbf{u}_{k-1} - \mathbf{A}^{(i)} \cdot \mathbf{S}_m \Delta \mathbf{u}_f \quad (6)$$

式中, $\mathbf{U}_{k-1} \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{k-1} \\ \vdots \\ \mathbf{u}_{k-1k-1} \end{bmatrix}$, $\mathbf{S}_m = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_m & & \\ \vdots & \ddots & \\ \mathbf{I}_m & \dots & \mathbf{I}_m \end{bmatrix}$.

记 $\tilde{\mathbf{A}}^{(i)} \triangleq \mathbf{A}^{(i)} \cdot \mathbf{S}_m$, 由式(5)知 $\Delta \tilde{\mathbf{e}}_k = \tilde{\mathbf{e}}_k = 0$, 则有:

$$\begin{cases} \Delta \tilde{\mathbf{e}}_f = \Delta \mathbf{r}_f - \mathbf{I}^{(p)} \bar{\mathbf{Z}}_p - \mathbf{A}^{(p)} \mathbf{U}_{k-1} - \tilde{\mathbf{A}}^{(p)} \Delta \mathbf{u}_f \\ \Delta^2 \tilde{\mathbf{e}}_f = \Delta^2 \mathbf{r}_f - \mathbf{I}^{(d)} \bar{\mathbf{Z}}_p - \mathbf{A}^{(d)} \mathbf{U}_{k-1} - \tilde{\mathbf{A}}^{(d)} \Delta \mathbf{u}_f \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\Delta \mathbf{r}_f \triangleq [\mathbf{r}_{k+1}^T \ \mathbf{r}_{k+2}^T \ \dots \ \mathbf{r}_{k+f-1}^T]^T$, $\Delta^2 \mathbf{r}_f$ 与 $\Delta \mathbf{r}_f$ 类似定义; $\mathbf{M}(\tau, :)$ 表示矩阵 \mathbf{M} 的第 τ 行向量,

$$\mathbf{I}^{(p)} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}^{(i)}(1, :) \\ \mathbf{I}^{(i)}(2, :) - \mathbf{I}^{(i)}(1, :) \\ \vdots \\ \mathbf{I}^{(i)}(f-1, :) - \mathbf{I}^{(i)}(f-2, :) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{I}^{(d)} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}^{(p)}(1, :) \\ \mathbf{I}^{(p)}(2, :) - \mathbf{I}^{(p)}(1, :) \\ \vdots \\ \mathbf{I}^{(p)}(f-1, :) - \mathbf{I}^{(p)}(f-2, :) \end{bmatrix}$$

矩阵 $\mathbf{A}^{(p)}$ 和 $\tilde{\mathbf{A}}^{(p)}$ 与 $\mathbf{I}^{(p)}$ 类似, 矩阵 $\mathbf{A}^{(d)}$ 和 $\tilde{\mathbf{A}}^{(d)}$ 与 $\mathbf{I}^{(d)}$ 类似.

将式(6)、(7)代入式(4), 令 $\frac{\partial J_k}{\partial \Delta \mathbf{u}_f} = 0$, 可得:

$$\Delta \mathbf{u}_f = \mathbf{R}_p (\Delta \mathbf{r}_f - \mathbf{I}^{(p)} \bar{\mathbf{Z}}_p - \mathbf{A}^{(p)} \mathbf{u}_{k-1}) + \mathbf{R}_i (\mathbf{r}_f - \mathbf{I}^{(i)} \bar{\mathbf{Z}}_p - \mathbf{A}^{(i)} \mathbf{u}_{k-1}) + \mathbf{R}_d (\Delta^2 \mathbf{r}_f - \mathbf{I}^{(d)} \bar{\mathbf{Z}}_p - \mathbf{A}^{(d)} \mathbf{u}_{k-1}) \quad (8)$$

式中, $\mathbf{R}_p = k_p \mathbf{Q}(\tilde{\mathbf{A}}^{(p)})^T$, $\mathbf{R}_i = k_i \mathbf{Q}(\tilde{\mathbf{A}}^{(i)})^T$, $\mathbf{R}_d = k_d \mathbf{Q}(\tilde{\mathbf{A}}^{(d)})^T$, $\mathbf{Q} = (\lambda \mathbf{I} + k_p (\tilde{\mathbf{A}}^{(p)})^T \tilde{\mathbf{A}}^{(p)} + k_i (\tilde{\mathbf{A}}^{(i)})^T \tilde{\mathbf{A}}^{(i)} + k_d (\tilde{\mathbf{A}}^{(d)})^T \tilde{\mathbf{A}}^{(d)})^{-1}$.

将式(8)与常规数字 PID 控制律

$$\Delta \mathbf{u}_k = k_p \tilde{\mathbf{e}}_k + k_i \tilde{\mathbf{e}}_k + k_d \Delta^2 \tilde{\mathbf{e}}_k \quad (9)$$

比较可知, 式(8)与式(9)具有类似的结构.

3 自适应预测控制方法

如图 1 所示, 在线作用时, 通过实时更新系统马尔可夫参数矩阵 $\hat{\tilde{\mathbf{X}}}_0$, 进而实现控制律的更新. $\hat{\tilde{\mathbf{X}}}_0$ 由数据集 $\{\mathbf{u}_k, \mathbf{y}_k\}$ 构造的 Hankel 矩阵计算得到, 本文采用保持数据集大小不变的方法, 即往数据集中增加新收集的数据的同时, 剔除数据集中最早的旧数据, 这样可避免因数据累积而使在线计算量不断增大.

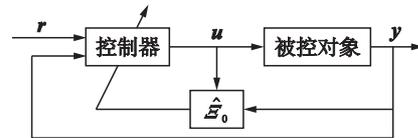


图 1 自适应预测控制框图

Fig.1 Block of adaptive predictive control

式(2)最小二乘问题由 LQ 分解进行求解:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Z}_p \\ \mathbf{Y}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{11}^{(k)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{L}_{21}^{(k)} & \mathbf{L}_{22}^{(k)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} (\mathbf{Q}_1^{(k)})^T \\ (\mathbf{Q}_2^{(k)})^T \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\hat{\tilde{\mathbf{X}}}_0^{(k)} = \mathbf{L}_{21}^{(k)} \cdot (\mathbf{L}_{11}^{(k)})^{-1} \quad (11)$$

LQ 分解计算量较大, 为提高计算效率, 通常采用 Givens 旋转方法进行快速 LQ 分解更新:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{L}_{11}^{(k+1)} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{L}_{21}^{(k+1)} & \mathbf{L}_{22}^{(k+1)} & * \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{11}^{(k)} & \mathbf{0} & \mathbf{z}_{\text{new}} \\ \mathbf{L}_{21}^{(k)} & \mathbf{L}_{22}^{(k)} & \mathbf{y}_{\text{new}} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{P}^{(k)} \quad (12)$$

式中, $\mathbf{P}^{(k)}$ 为一系列 Givens 旋转矩阵的乘积, \mathbf{z}_{new} 和 \mathbf{y}_{new} 为

接收新数据时 Z_p 与 Y_k 分别增加的新向量. 当剔除旧向量 z_{old} 和 y_{old} 时, 再由相同原理进行一次更新. Givens 旋转方法虽然能提高计算效率, 但相对较为复杂. 本文采用一种简单直观的方法即可实现 $\hat{\Xi}_0$ 的更新.

接收新数据且剔除旧数据后, 有如下关系:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} L_{11}^{(k)} (Q_1^{(k)})^T & z_{new} \\ L_{21}^{(k)} (Q_1^{(k)})^T + L_{22}^{(k)} (Q_2^{(k)})^T & y_{new} \end{bmatrix} \\ = & \begin{bmatrix} z_{old} & L_{11}^{(k+1)} (Q_1^{(k+1)})^T \\ y_{old} & L_{21}^{(k+1)} (Q_1^{(k+1)})^T + L_{22}^{(k+1)} (Q_2^{(k+1)})^T \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

将上式视为 $[H_1 \quad h_2] = [h_3 \quad H_4]$, 记 $L_1^{(k)} \triangleq L_{11}^{(k)}$. $(L_{11}^{(k)})^T$ 与 $L_2^{(k)} \triangleq L_{21}^{(k)} (L_{11}^{(k)})^T$, L_1 与 L_2 的更新关系可由式 $H_1 H_1^T + h_2 h_2^T = h_3 h_3^T + H_4 H_4^T$ 化简得到:

$$\begin{cases} L_1^{(k+1)} = L_1^{(k)} + z_{new} z_{new}^T - z_{old} z_{old}^T \\ L_2^{(k+1)} = L_2^{(k)} + y_{new} y_{new}^T - y_{old} y_{old}^T \end{cases} \quad (14)$$

同时, 由式(11)可得 $\hat{\Xi}_0$ 的更新关系:

$$\hat{\Xi}_0^{(k+1)} = L_2^{(k+1)} \cdot (L_1^{(k+1)})^{-1} \quad (15)$$

LQ 分解方法、Givens 旋转方法和本文方法分别由式(10)与式(11)、式(12)与式(11)和式(14)与式(15)更新 $\hat{\Xi}_0$ 矩阵. 式(11)和式(15)的计算复杂度一样, 记 $\bar{n} \triangleq p(m+l)$

(通常取值 $\bar{n} \ll N$), 式(10)、(12)和式(14)的复杂度分别为 $O(3\bar{n}^2 N)$ 、 $O(\frac{7}{2}\bar{n}^2)$ 与 $O(4\bar{n}^2)$. 注意到 Givens 旋转方法需要进行两次更新, 因此, 本文方法为 3 种方法中计算效率最高的. 同时, 由式(14)可以看出, 本文方法通过简单的矩阵运算即可实现更新, 不需要考虑数值稳定性与迭代收敛性等问题.

具有类似 PID 结构的闭环子空间自适应预测控制器 (PID-ACLSPC) 实现步骤如下:

- Step 0: 设定相关参数, 离线准备初始数据集, 计算矩阵 L_1 与 L_2 的初始值;
- Step 1: 收集当前 k 时刻的系统输入输出数据, 构建向量 z_{new} 、 y_{new} 、 z_{old} 与 y_{old} ;
- Step 2: 由式(14)更新矩阵 L_1 与 L_2 ;
- Step 3: 由式(15)更新矩阵 $\hat{\Xi}_0$;
- Step 4: 由式(8)计算控制序列, 取其第一个量为系统控制输入;
- Step 5: $k = k + 1$, 转 Step 1.

4 仿真验证

考虑如下的 2 阶和 5 阶慢时变线性系统:

$$\begin{aligned} x_{k+1}^{(1)} &= \begin{bmatrix} 0.6 + 0.03\sin k & 0.479 & 13 \\ -0.323 & 86 & 0.882 & 92 \end{bmatrix} x_k^{(1)} + \begin{bmatrix} -0.029 & 472 \\ 0.011 & 775 \end{bmatrix} u_k^1 + \begin{bmatrix} 0.003 & 574 & 7 \\ 0.007 & 152 & 1 \end{bmatrix} e_k^1 \\ y_k^1 &= [10.878 \quad 112.15] x_k^1 + e_k^1 \\ x_{k+1}^{(2)} &= \begin{bmatrix} 1 + 0.1\sin k & -0.023 & 492 & -0.007 & 655 & -0.001 & 570 & -0.000 & 760 \\ 0.02 + 0.01\sin k & 0.984 & 52 & -0.138 & 86 & -0.012 & 691 & 0.035 & 256 \\ 0.015 & 567 & 0.159 & 56 & 0.948 & 18 & -0.029 & 708 & 0.035 & 529 \\ 0.000 & 969 & 1 & -0.010 & 768 & -0.004 & 927 & 0.779 & 71 & 0.626 & 37 \\ 0.005 & 973 & -0.012 & 717 & -0.163 & 28 & -0.567 & 87 & 0.687 & 49 \end{bmatrix} x_k^{(2)} + \begin{bmatrix} 0 \\ -0.000 & 657 \\ 0.001 & 783 \\ 0.000 & 079 \\ 0.002 & 675 \end{bmatrix} u_k^2 + \\ & [0.000 & 113 \quad -0.001 & 784 \quad -0.001 & 539 \quad -0.012 & 031 \quad 0.001 & 031]^T e_k^2 \\ y_k^2 &= [12 & 500 + 100\sin k \quad -147.01 \quad -43.826 \quad -8.954 & 4 \quad -7.114 & 2] x_k^{(2)} + e_k^2 \end{aligned}$$

其中, $E((e_k^1)^2) = 0.1$, $E((e_k^2)^2) = 0.05$.

p 、 f 、 N 与 PID 参数等参数对 PID-ACLSPC 的控制性能影响较大, 选择不当甚至有可能造成闭环不稳定. 但这些参数隐含在矩阵中, 难以推导出其与性能之间的显式关系, 可参考文[15]与文[20], 通过反复实验总结出参数变化影响性能的规律, 再根据系统进行调试确定.

图 2 与图 3 为 PID-ACLSPC 与 GPC (generalized predictive control) 和 ACLSPC 的控制效果对比, 表 1 为超调量百分比 (P.O.)、上升时间 (T_r) 与时间乘误差平方积分 (ITSE) 等性能指标的对比. 可以看出, GPC 输出波动较大, ACLSPC

与 PID-ACLSPC 都能较好地克服系统参数变化跟踪参考输入, 同时比较易知, PID-ACLSPC 能够较好地抑制超调, 快速跟踪参考输入, 减小跟踪误差.

5 结论

本文提出了一种完全数据驱动的基于递推闭环子空间辨识的自适应预测控制方法. 对计算复杂度的分析表明, 该方法具有较高的计算效率. 仿真结果表明该方法能够对存在噪声干扰的线性时变系统进行良好控制, 结合 PID 控制采用新的目标函数对 CLSPC 算法进行的改进能够有效提高控制性能.

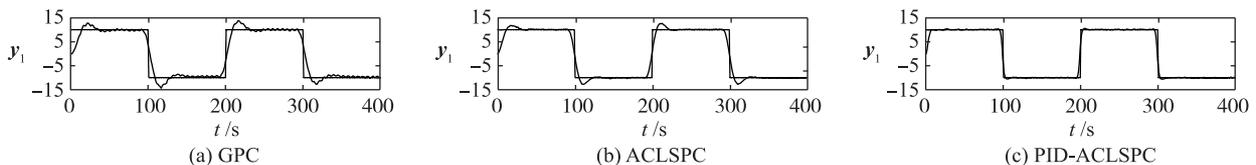


图 2 y_1 输出跟踪效果

Fig.2 Output tracking performance of y_1

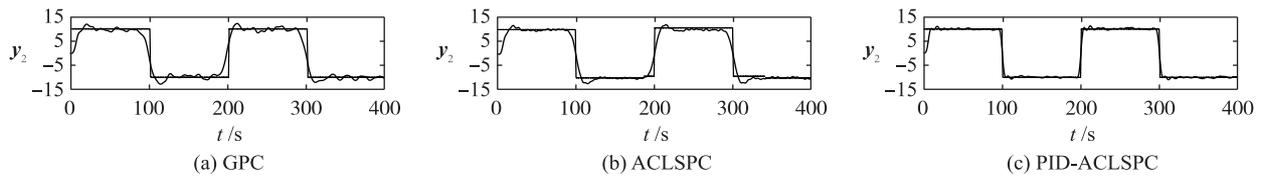
图3 y_2 输出跟踪效果Fig.3 Output tracking performance of y_2

表1 性能指标对比

Tab.1 Comparison of performance indexes

	y_1			y_2		
	P. O.	T_r	ITSE	P. O.	T_r	ITSE
GPC	20.8%	16	2.76×10^4	19.3%	17	3.41×10^4
ACLSPC	11.8%	12	2.18×10^4	15.4%	15	2.75×10^4
PID-ACLSPC	4.5%	6	1.14×10^4	8.6%	8	1.64×10^4

参考文献

- [1] 胡耀华, 贾欣乐. 广义预测控制综述[J]. 信息与控制, 2000, 29(3): 248-256.
Hu Y H, Jia X L. Summarization of generalized predictive control[J]. Information and Control, 2000, 29(3): 248-256.
- [2] 席裕庚, 李德伟, 林姝. 模型预测控制——现状与挑战[J]. 自动化学报, 2013, 39(3): 222-236.
Xi Y G, Li D W, Lin S. Model predictive control - Status and challenges[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(3): 222-236.
- [3] 李锐, 方洋旺, 蔡文新, 等. 随机系统预测控制稳定性分析及快速预测算法[J]. 信息与控制, 2013, 42(2): 145-151.
Li R, Fang Y W, Cai W X, et al. Stability analysis and a fast algorithm for the predictive control of stochastic systems[J]. Information and Control, 2013, 42(2): 145-151.
- [4] 杨世忠, 任庆昌. 基于在线优化的鲁棒模型预测控制[J]. 信息与控制, 2013, 42(6): 742-749.
Yang S Z, Ren Q C. Robust model predictive control based on online optimization[J]. Information and Control, 2013, 42(6): 742-749.
- [5] Favoreel W, Moor D B. SPC: Subspace predictive control[C]//Proceedings of the 14th IFAC World Congress. Oxford, UK: Pergamon Press, 1998: 235-240.
- [6] Kadali R, Huang B, Rossiter A. A data driven subspace approach to predictive controller design[J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(3): 261-278.
- [7] 王宇红, 王学剑. 基于协方差基准的模型预测控制性能评价与监视[J]. 信息与控制, 2010, 39(6): 694-699.
Wang Y H, Wang X J. Performance assessment and monitoring of model predictive control based on covariance benchmark[J]. Information and Control, 2010, 39(6): 694-699.
- [8] Mardi N A, Wang L P. Subspace-based model predictive control of time-varying systems[C]//Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 4005-4010.
- [9] Wu X, Shen J, Li Y G, et al. Data-driven modeling and predictive control for boiler-turbine unit[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(3): 470-481.
- [10] 孙磊, 金晓明. 基于子空间辨识的模型预测控制策略及其应用[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(3): 313-315.
Sun L, Jin X M. Model-predictive-control based on subspace identification and its application[J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(3): 313-315.
- [11] 谢志刚, 陈自力, 何应德. 无人动力伞在线子空间模型预测控制[J]. 信息与控制, 2011, 40(6): 841-845.
Xie Z G, Chen Z L, He Y D. Online subspace predictive control of unmanned powered parafoil[J]. Information and Control, 2011, 40(6): 841-845.
- [12] Wahab N A, Katebi R, Balderud J, et al. Data-driven adaptive model-based predictive control with application in wastewater systems[J]. IET Control Theory and Applications, 2011, 5(6): 803-812.
- [13] 张立, 高亮文. 递推子空间自适应预测控制综合方法[J]. 信息与控制, 2012, 41(4): 439-453.
Zhang L, Gao X W. A Synthesis method of adaptive predictive control based on recursive subspace[J]. Information and Control, 2012, 41(4): 439-453.
- [14] Overschee V P, Moor D B. Closed loop subspace system identification[C]//Proceedings of the 36th IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1997: 1848-1853.
- [15] Woodley B R. Model free subspace based H_∞ control[D]. Stanford, USA: Stanford University, 2001.
- [16] Liang W X, Kruger U, Wang X, et al. Fast moving window algorithm for QR and cholesky decompositions[C/OL]//Proceedings of the 17th IFAC World Congress. (2012-07-06)[2014-03-01]. <http://www.ifac-paperonline.net/Detailed/37403.html>.

- [17] 谢磊, 梁武星, 张泉灵, 等. 基于快速滑窗 QR 分解的自适应子空间辨识[J]. 化工学报, 2008, 59(6): 1449 - 1453.
Xie L, Liang W X, Zhang Q L, et al. Adaptive subspace identification based on fast moving window QR decomposition[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2008, 59(6): 1449 - 1453.
- [18] Dong J F, Verhaegen M, Holweg E. Closed-loop subspace predictive control for fault tolerant MPC Design[C/OL]//Proceedings of the 17th IFAC World Congress. (2010 - 11 - 06)[2014 - 03 - 01]. <http://www.ifac-papersonline.net/Detailed/36263.html>.
- [19] 张俊, 罗大庸. 广义预测控制和 PID 控制在混凝投药中的应用[J]. 信息与控制, 2012, 41(1): 89 - 94.
Zhang J, Luo D Y. The application of GPC control and PID control to coagulant dosing[J]. Information and Control, 2012, 41(1): 89 - 94.
- [20] 郭伟, 王伟. PID 型广义预测控制在过热温控中的应用[J]. 计算机工程, 2009, 35(11): 251 - 253.
Guo W, Wang W. Application of PID-type generalized predictive control in superheated temperature control system[J]. Computer Engineering, 2009, 35(11): 251 - 253.

作者简介

苏奇全(1988 -), 男, 硕士生. 研究领域为自适应控制.

贾宏光(1971 -), 男, 研究员, 博士生导师. 研究领域为复合制导及目标识别技术.

(上接第 222 页)

- [42] 王树根, 李德仁. 正射影像上阴影和遮蔽的信息处理方法研究[J]. 测绘信息与工程, 2004, 29(4): 1 - 4.
Wang S G, Li D R. Method for information processing of shadows and occlusion on orthophotos[J]. Journal of Geomatics, 2004, 29(4): 1 - 4.
- [43] Tomá F, Yago V, Yu C, et al. Single image shadow detection using multiple cues in a supermodular MRF[C]//British Machine Vision Conference. London, UK: British Machine Vision Association, 2013: 1 - 12.
- [44] Panagopoulos A, Samaras D, Paragios N. Robust shadow and illumination estimation using a mixture model[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 651 - 658.
- [45] 刘艳丽, 石俊, 张严辞. 一种单幅室外图像的阴影去除算法[J]. 软件学报, 2012, 23(2): 168 - 175.
Liu Y L, Shi J, Zhang Y C. A method of shadow removal in single outdoor image[J]. Journal of Software, 2012, 23(2): 168 - 175.
- [46] Huang X, Hua G, Tumblin J. What characterizes a shadow boundary under the sun and sky[C]//IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 898 - 905.
- [47] Aksoy Y, Alatan A A. Utilization of false color images in shadow detection[C]//European Conference on Computer Vision. Berlin, Germany: Springer, 2012: 472 - 481.
- [48] Rufenacht D, Fredembach C, Susstrunk S. Automatic and accurate shadow detection using near-infrared information[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 36(8): 1672 - 1678.
- [49] Liu J, Fang T, Li D. Shadow detection in remotely sensed images based on self-adaptive feature selection[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(12): 5092 - 5103.

作者简介

田建东(1980 -), 男, 博士, 副研究员. 研究领域为模式识别与图像处理.

王占鹏(1990 -), 男, 硕士生. 研究领域为模式识别与图像处理.

唐延东(1962 -), 男, 博士, 研究员. 研究领域为模式识别与图像处理.