



# 执行器退化的遥机器人系统量化反馈容错控制

## 摘要

针对遥机器人系统中存在执行器退化、控制输入量化,且编、解码端的量化灵敏度参数不匹配的问题,设计了遥机器人系统的鲁棒量化反馈容错控制系统.控制器结构的线性部分由线性矩阵不等式给出,旨在解决系统指标性能问题,非线性部分则用于处理量化参数不匹配问题.经稳定性理论证明,提出的鲁棒量化反馈容错控制方法能消除执行器退化及量化参数不匹配等的影响,并确保从机器人能渐近跟踪主机器人.最后,算例仿真验证了方法的有效性.

## 关键词

量化控制;机器人;容错控制;不匹配;执行器退化

中图分类号 TP273

文献标志码 A

收稿日期 2016-01-10

资助项目 国家自然科学基金青年基金(61403207);江苏省自然科学基金青年基金(BK20131000);江苏省大学生实践创新训练计划(201410300030)

## 作者简介

郑柏超,男,博士,副教授,主要研究领域为量化控制、机器人控制、滑模变结构控制. zhengbochao81@126.com

- 1 南京信息工程大学 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心,南京,210044
- 2 南京信息工程大学 信息与控制学院,南京,210044

## 0 引言

遥(操作)机器人系统是一个复杂的、强耦合的时变非线性系统,由操作者、主、从机器人、通信环节组成,易受外界复杂环境等影响.通常,它由操作者对主机器人进行操作,发送运行指令,并经传输网络传送到从机器人端,让从机器人依照指令开展相关工作.迄今为止,遥机器人系统已在空间探索、海洋开发、远程医疗等多个领域被广泛采用.遥机器人系统的控制设计研究是一个非常重要的领域.文献[1]研究了遥机器人系统的鲁棒控制设计,文献[2]采用线性矩阵不等式技术研究了遥机器人的预测控制问题,文献[3-5]则分别侧重研究了遥机器人系统的时滞问题、凝视控制和网络同步等.

遥机器人系统是电子、机械、软件等的复合体,其元器件经长时间、高强度运行可能发生故障.一旦故障发生,除了停运检修外,真正能有效提高其安全性和可靠性的途径是容错控制技术.容错控制器不仅能保证系统正常运行时拥有理想性能,还能确保系统在执行器/传感器等发生故障时仍能稳定并具有可接受的性能<sup>[6-9]</sup>.

另一方面,信道带宽限制也是遥机器人系统不可避免的核心问题之一.数据量化是解决这一棘手问题的有效途径.2001年以来,国际主流期刊上每年均有不少信号量化领域的文章刊登,有力地促进了网络系统量化反馈控制问题的研究<sup>[10-15]</sup>.这些理论成果为遥操作机器人系统的控制研究提供了方法,打开了思路.

本文针对不确定遥机器人系统,研究其在执行器退化及量化不匹配情形下的控制设计.鲁棒量化反馈容错控制器包括两部分:通过结合执行器退化矩阵及量化不匹配的时变比例模型边界等,由线性矩阵不等式条件给出线性部分控制增益,旨在考虑性能问题;非线性部分拥有 bang-bang 特性,主要用于处理量化不匹配问题.经稳定性理论证明,本文构造的控制器能有效克服模型不确定性、量化不匹配以及执行器退化的影响,实现从机器人对主机器人系统的鲁棒跟踪控制.

## 1 系统描述

### 1.1 遥机器人模型

遥机器人系统是由主、从机器人构成的,其动力学模型如下<sup>[1-2]</sup>:

$$d_m + u_m = (M_m + \Delta M_m) \dot{v}_m + (B_m + \Delta B_m) v_m, \quad (1)$$

$$u_s - d_s = (M_s + \Delta M_s) \dot{v}_s + (B_s + \Delta B_s) v_s, \quad (2)$$

其中,  $M_m$  与  $B_m$  分别为主机机器人的标称质量与阻尼,  $M_s$  与  $B_s$  分别为从机器人的标称质量与阻尼; 主、从机器人的速度由  $v_m$  与  $v_s$  表示, 设  $x_m$  与  $x_s$  为主、从机器人的位置, 可知  $\dot{x}_m = v_m, \dot{x}_s = v_s$ ;  $d_m$  与  $d_s$  分别为操作者对主、从机器人对环境作用力;  $u_m$  与  $u_s$  分别表示主、从机器人的控制力矩;  $\Delta M_m, \Delta B_m, \Delta M_s, \Delta B_s$  为系统中的不确定性.

$$\text{记 } \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_m \\ u_s \end{bmatrix}, \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_m \\ x_s \\ v_m \\ v_s \end{bmatrix}, \boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} d_m(t) \\ d_m(t-h) \\ d_s(t) \\ d_s(t-h) \end{bmatrix}. \text{系统}$$

(1)–(2) 可化为状态空间表示:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = (\mathbf{A} + \Delta\mathbf{A}(t))\mathbf{x}(t) + (\mathbf{B}_1 + \Delta\mathbf{B}_1(t))\boldsymbol{\omega}(t) + \mathbf{B}_2\mathbf{u}(t), \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{B_m}{M_m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{B_s}{M_s} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{M_m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{M_s} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{M_m} & 0 \\ 0 & \frac{1}{M_s} \end{bmatrix},$$

$\Delta\mathbf{A}(t), \Delta\mathbf{B}_1(t)$  为不确定项, 符合下列形式<sup>[2]</sup>:

$$[\Delta\mathbf{A}(t), \Delta\mathbf{B}_1(t)] = \mathbf{H}\boldsymbol{\Delta}(t) [\mathbf{E}, \mathbf{E}_1], \quad (4)$$

$\mathbf{H}, \mathbf{E}, \mathbf{E}_1$  为已知的常值矩阵,  $\boldsymbol{\Delta}(t)$  为未知矩阵, 满足不等式约束  $\boldsymbol{\Delta}^T(t)\boldsymbol{\Delta}(t) \leq \mathbf{I}, \mathbf{I}$  为单位矩阵. 记  $\bar{\mathbf{A}} = \mathbf{A} + \Delta\mathbf{A}(t), \bar{\mathbf{B}}_1 = \mathbf{B}_1 + \Delta\mathbf{B}_1(t), \bar{\mathbf{B}}_2 = \mathbf{B}_2$ . 系统整理为

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \bar{\mathbf{A}}\mathbf{x}(t) + \bar{\mathbf{B}}_1\boldsymbol{\omega}(t) + \bar{\mathbf{B}}_2\mathbf{u}(t). \quad (5)$$

## 1.2 量化器

本文采用下列形式的量化器:

$$\mathbf{Q}(\mathbf{u}(t)) \triangleq \tau_d(t) \mathbf{q}\left(\frac{\mathbf{u}(t)}{\tau_c(t)}\right), \quad (6)$$

参数  $\tau_c(t)$  ( $\tau_d(t)$ ) 为编(解)码器端的量化灵敏度. 系统运行时  $\mathbf{u}(t)$  经编码器编码生成信号  $\mathbf{q}\left(\frac{\mathbf{u}(t)}{\tau_c(t)}\right)$  并由信道传输至解码器端, 再经解码器解码生成  $\tau_d(t) \mathbf{q}\left(\frac{\mathbf{u}(t)}{\tau_c(t)}\right)$ , 即量化信号  $\mathbf{Q}(\mathbf{u}(t))$ . 已有

郑柏超, 等. 执行器退化的遥机器人系统量化反馈容错控制.

研究大多假设量化参数  $\tau_c(t)$  与  $\tau_d(t)$  相等. 文献 [16] 中指出这样的假设往往会因实际工程中硬件执行不理想等而无法实现, 并由此提出  $\tau_c(t)$  与  $\tau_d(t)$  时不变不匹配的关系模型; 参数  $\tau_c(t)$  与  $\tau_d(t)$  不相等, 但它们在动态调节中比值要保持不变. 文献 [17-18] 则在此基础上再一次拓宽了研究, 建立了  $\tau_c(t)$  与  $\tau_d(t)$  时变不匹配的比例模型, 即:

$$r(t) = \frac{\tau_d(t)}{\tau_c(t)}, \quad (7)$$

$r(t)$  满足  $r_{\max} \geq r(t) \geq r_{\min} > 0$ .

## 1.3 执行器退化

本文考虑的故障类型为执行器部分失效故障, 即执行器退化问题. 故障模式如下:

$$\mathbf{u}^F(t) = \boldsymbol{\Xi}\mathbf{Q}(\mathbf{u}(t)), \quad (8)$$

其中, 对角矩阵  $\boldsymbol{\Xi} = \text{diag}\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m\}$  刻画执行器故障的情形: 当  $\theta_j = 1$  时, 表示第  $j$  个执行器通道未发生故障, 当  $\theta_j = 0$  时, 表示第  $j$  个执行器通道完全卡死, 当介于两者之间时发生部分失效故障, 即执行器退化.  $\theta_j$  称为失效因子, 一般来说,  $0 < \alpha_j \leq \theta_j \leq \beta_j \leq 1$ . 其中  $\alpha_j, \beta_j$  为已知正常数. 定义集合

$$\boldsymbol{\Delta}_\theta = \{\text{diag}\{\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_m\}, \hat{\theta}_i \in [\alpha_i, \beta_i]\}.$$

为刻画  $\boldsymbol{\omega}(t)$  对遥机器人系统的影响, 需要用到性能指标. 首先给出下列评价信号:

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\boldsymbol{\omega}(t),$$

其中矩阵

$$\mathbf{C} = \text{diag}\{q_1, -q_1, q_2, -q_2\},$$

$$\mathbf{D} = \text{diag}\{q_3, -q_3, q_4, -q_4\}.$$

$q_i$  为设定的参数. 通过选取不同的参数  $q_i$  能反映  $\boldsymbol{\omega}$  对系统性能的影响.

联合式(6)–(8), 系统模型整理为

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \bar{\mathbf{A}}\mathbf{x}(t) + \bar{\mathbf{B}}_1\boldsymbol{\omega}(t) + \bar{\mathbf{B}}_2 r \boldsymbol{\Xi} \mathbf{q}_{\tau_c}(\mathbf{u}(t)),$$

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\boldsymbol{\omega}(t), \quad (9)$$

其中, 符号  $\mathbf{q}_{\tau_c}(\mathbf{u}(t)) = \tau_c \mathbf{q}\left(\frac{\mathbf{u}(t)}{\tau_c}\right)$ .

## 2 控制设计

对系统(9), 设计鲁棒容错控制器如下:

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{F}_1\mathbf{x}(t) + \mathbf{F}_2\boldsymbol{\omega}(t) + \mathbf{u}_n(t), \quad (10)$$

其中, 线性部分  $\mathbf{F}_1\mathbf{x}(t) + \mathbf{F}_2\boldsymbol{\omega}(t)$  中的增益  $\mathbf{F}_1$  与  $\mathbf{F}_2$  待求,  $\mathbf{u}_n(t)$  为非线性控制器部分, 用于消除量化不匹配的影响.

据遥机器人系统特点, 主、从机器人端无法获得从、主机器人端的瞬时信息, 因此, 增益矩阵  $\mathbf{F}_1$  与  $\mathbf{F}_2$

中相应元素应为 0, 即  $F_1 = (f_{ij}^1) \in \mathbf{R}^{2 \times 4}$ ,  $f_{12}^1 = f_{14}^1 = f_{21}^1 = f_{23}^1 = 0$ ,  $F_2 = (f_{ij}^2) \in \mathbf{R}^{2 \times 4}$ ,  $f_{13}^2 = f_{21}^2 = 0$ .

本文目标: 设计如式(10)的鲁棒容错控制法则, 确保遥机器人系统能克服模型不确定性、执行器退化以及量化参数不匹配的影响, 实现闭环稳定并满足期望的鲁棒  $H_\infty$  性能.

**引理 1**<sup>[17]</sup> 对任意给定维数适当的矩阵  $X, Y$ , 有下列结论:

$$X^T Y + Y^T X \leq \alpha X^T X + \frac{1}{\alpha} Y^T Y, \quad \forall \alpha > 0.$$

下列定理 1 为本文主要结论.

**定理 1** 对不确定遥机器人系统(9), 若存在正定矩阵  $X, V$ , 一般矩阵  $Y, F_2$  及正常数  $\lambda, \alpha_i, i=1, 2$ ,  $r \in (r_{\min}, r_{\max})$ ,  $\Xi \in \Delta_\theta$ , 满足

$$F = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & XE^T & XC^T & 0 & \gamma_{15} & 0 & X \\ EX & -\alpha_1 I & & & & & \\ CX & & -I & & & & \\ 0 & & & -V & & & \\ \gamma_{15}^T & & & & \gamma_{55} & E_1^T & \\ 0 & & & & E_1 & -\alpha_2 I & \\ X & & & & & & -V \end{bmatrix} < 0, \quad (11)$$

$$f_{12}^1 = f_{14}^1 = f_{21}^1 = f_{23}^1 = 0, \quad f_{13}^2 = f_{21}^2 = 0,$$

其中

$$\gamma_{11} = AX + XA^T + B_2 r \Xi Y + Y^T r \Xi B_2^T + (\alpha_1 + \alpha_2) H H^T,$$

$$\gamma_{15} = B_1 + B_2 r \Xi F_3 + X C^T D,$$

$$\gamma_{55} = D^T D - \lambda^2 I,$$

当取控制器增益矩阵  $F_1 = YX^{-1}$ , 并设计

$$u_n(t) = -\Delta \tau_c \text{sign}(x^T P B_2), \quad (12)$$

其中

$$\text{sign}(x^T P B_2) = -\Delta \tau_c \times [\text{sign}(x^T P B_2^{(1)}), \text{sign}(x^T P B_2^{(2)})],$$

则闭环遥操作机器人系统不受模型不确定性、量化不匹配以及执行器退化的影响, 最终鲁棒渐近稳定且性能指标为  $\lambda$ .

**证明** 将式(10)代入式(9)中第一个方程可得

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) = & \bar{A}x(t) + \bar{B}_1 \omega(t) + \bar{B}_2 r \Xi (u(t) + e_c) = \\ & (\bar{A} + \bar{B}_2 r \Xi F_1)x(t) + (\bar{B}_1 + \bar{B}_2 r \Xi F_2)\omega(t) + \\ & \bar{B}_2 r \Xi (u_n(t) + e_c), \end{aligned} \quad (13)$$

其中量化误差  $e_c = q_{\tau_c}(u(t)) - u(t)$  满足

$$|e_c| \leq \Delta \tau_c, \Delta = \frac{\sqrt{2}}{2}. \text{取李雅普诺夫泛函}$$

$$V(t) = x^T(t) P x(t) + \int_{t-d}^t x^T(\theta) S x(\theta) d\theta, \quad (14)$$

矩阵  $P$  与  $S$  均正定, 则对  $V(t)$  沿系统(13)关于时间  $t$  求得:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & ((\bar{A} + \bar{B}_2 r \Xi F_1)x(t) + (\bar{B}_1 + \bar{B}_2 r \Xi F_2)\omega(t) + \\ & \bar{B}_2 r \Xi (u_n(t) + e_c))^T P x(t) + x^T(t) P (\bar{A} + \\ & \bar{B}_2 r \Xi F_1)x(t) + (\bar{B}_1 + \bar{B}_2 r \Xi F_2)\omega(t) + \\ & \bar{B}_2 r \Xi (u_n(t) + e_c) + x^T(t) S x(t) - \\ & x^T(t-d) S x(t-d), \end{aligned} \quad (15)$$

结合非线性控制部分式(12), 不难证得:

$$x^T(t) P \bar{B}_2 r \Xi (u_n(t) + e_c) \leq 0,$$

因此, 对任意的正常数  $\tau$ , 零初始条件下有

$$J_\tau = \int_0^\tau [z^T(t) z(t) - \lambda^2 \omega^T(t) \omega(t)] dt =$$

$$\begin{aligned} & \int_0^\tau [z^T(t) z(t) - \lambda^2 \omega^T(t) \omega(t) + \dot{V}(t)] dt - V(\tau) \leq \\ & \int_0^\tau \{ x^T C^T C x + x^T C^T D \omega + \omega^T D^T C x + \omega^T (D^T D - \lambda^2 I) \omega + \\ & ((\bar{A} + \bar{B}_2 r \Xi F_1)x(t) + (\bar{B}_1 + \bar{B}_2 r \Xi F_2)\omega(t) + \\ & \bar{B}_2 r \Xi (u_n(t) + e_c))^T P x(t) + x^T(t) P ((\bar{A} + \bar{B}_2 r \Xi F_1)x(t) + \\ & (\bar{B}_1 + \bar{B}_2 r \Xi F_2)\omega(t) + x^T(t) S x(t) - \\ & x^T(t-d) S x(t-d) \} dt, \end{aligned} \quad (16)$$

联合  $\bar{A} = A + \Delta A(t)$ ,  $\Delta A(t) = H \Delta(t) E$ , 引理 1 可得:

$$\begin{aligned} & x^T(t) P \bar{A} x(t) + x^T(t) \bar{A}^T P x(t) = \\ & x^T(t) P (A + H \Delta(t) E) x(t) + x^T(t) (A + H \Delta(t) E)^T P x(t) \leq \\ & x^T(t) (P A + A^T P) x(t) + \alpha_1 x^T(t) P H H^T P x(t) + \\ & \frac{1}{\alpha_1} x^T(t) E^T E x(t). \end{aligned} \quad (17)$$

同理, 联合  $\bar{B}_1 = B_1 + \Delta B_1(t)$ ,  $\Delta B_1(t) = H \Delta(t) E_1$  与引理 1, 推导可得:

$$\begin{aligned} & x^T(t) P (\bar{B}_1 + \bar{B}_2 r \Xi F_2) \omega(t) + \\ & (x^T(t) P (\bar{B}_1 + \bar{B}_2 r \Xi F_2) \omega(t))^T = \\ & x^T(t) P (B_1 + H \Delta E_1 + B_2 r \Xi F_2) \omega(t) + \\ & (x^T(t) P (B_1 + H \Delta E_1 + B_2 r \Xi F_2) \omega(t))^T \leq \\ & x^T(t) (P B_1 + P B_2 r \Xi F_2) \omega(t) + \\ & \omega^T(t) (B_1^T P + r \Xi F_2^T B_2^T P) x(t) + \\ & \alpha_2 x^T(t) P H H^T P x(t) + \frac{1}{\alpha_2} \omega^T(t) E_1^T E_1 \omega(t). \end{aligned} \quad (18)$$

此外, 经简单推导可知

$$\begin{aligned} & x^T(t) P \bar{B}_2 r \Xi F_1 x(t) + x^T(t) F_1^T \Xi r \bar{B}_2^T P x(t) = \\ & x^T(t) (P B_2 r \Xi F_1 + r \Xi F_1^T B_2^T P) x(t). \end{aligned} \quad (19)$$

$$\text{记 } \zeta(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \mathbf{x}(t-d) \\ \boldsymbol{\omega}(t) \end{bmatrix}, \text{ 结合式 (16)---(19),}$$

可知

$$J_\tau \leq \int_0^\tau \zeta^T(t) \mathbf{M} \zeta(t) dt,$$

要使  $J_\tau \leq 0$ , 只需

$$\begin{bmatrix} \mathbf{m}_{11} & 0 & \mathbf{m}_{13} \\ 0 & -\mathbf{S} & 0 \\ \mathbf{m}_{13}^T & 0 & \frac{1}{\alpha_2} \mathbf{E}_1^T \mathbf{E}_1 + \mathbf{D}^T \mathbf{D} - \lambda^2 \mathbf{I} \end{bmatrix} < 0,$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{m}_{11} &= \mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{B}_2 r \Xi \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_1^T r \Xi \mathbf{B}_2^T \mathbf{P} + \\ & (\alpha_1 + \alpha_2) \mathbf{P} \mathbf{H} \mathbf{H}^T \mathbf{P} + \frac{1}{\alpha_1} \mathbf{E}^T \mathbf{E} + \mathbf{S} + \mathbf{C}^T \mathbf{C}, \end{aligned}$$

$$\mathbf{m}_{13} = \mathbf{P} \mathbf{B}_1 + \mathbf{P} \mathbf{B}_2 r \mathbf{F}_2 + \mathbf{C}^T \mathbf{D},$$

由舒尔补引理, 上述不等式等价于

$$\begin{bmatrix} l_{11} & \mathbf{E}^T & \mathbf{C}^T & 0 & l_{15} & 0 \\ \mathbf{E} & -\alpha_1 \mathbf{I} & & & & \\ \mathbf{C} & & -\mathbf{I} & & & \\ 0 & & & -\mathbf{S} & & \\ l_{15}^T & & & & l_{55} & \mathbf{E}_1^T \\ 0 & & & & \mathbf{E}_1 & -\alpha_2 \mathbf{I} \end{bmatrix} < 0, \quad (20)$$

$$\begin{aligned} l_{11} &= \mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{B}_2 r \Xi \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_1^T r \Xi \mathbf{B}_2^T \mathbf{P} + \\ & (\alpha_1 + \alpha_2) \mathbf{P} \mathbf{H} \mathbf{H}^T \mathbf{P} + \mathbf{S}, \end{aligned}$$

$$l_{15} = \mathbf{P} \mathbf{B}_1 + \mathbf{P} \mathbf{B}_2 r \Xi \mathbf{F}_2 + \mathbf{C}^T \mathbf{D},$$

$$l_{55} = \mathbf{D}^T \mathbf{D} - \lambda^2 \mathbf{I}.$$

记  $\mathbf{X} = \mathbf{P}^{-1}$ ,  $\mathbf{V} = \mathbf{S}^{-1}$ , 对式 (20) 两端同乘以  $\text{diag}(\mathbf{X}, \mathbf{I}, \mathbf{I}, \mathbf{V}, \mathbf{I}, \mathbf{I})$  可知, 式 (20) 等价于

$$\begin{bmatrix} \mathbf{w}_{11} & \mathbf{X} \mathbf{E}^T & \mathbf{X} \mathbf{C}^T & 0 & \mathbf{w}_{15} & 0 \\ \mathbf{E} \mathbf{X} & -\alpha_1 \mathbf{I} & & & & \\ \mathbf{C} \mathbf{X} & & -\mathbf{I} & & & \\ 0 & & & -\mathbf{V} & & \\ \mathbf{w}_{15}^T & & & & \mathbf{w}_{55} & \mathbf{E}_1^T \\ 0 & & & & \mathbf{E}_1 & -\alpha_2 \mathbf{I} \end{bmatrix} < 0,$$

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_{11} &= \mathbf{A} \mathbf{X} + \mathbf{X} \mathbf{A}^T + \mathbf{B}_2 r \Xi \mathbf{F}_1 \mathbf{X} + \mathbf{X} \mathbf{F}_1^T r \Xi \mathbf{B}_2^T + \\ & (\alpha_1 + \alpha_2) \mathbf{H} \mathbf{H}^T + \mathbf{X} \mathbf{V}^{-1} \mathbf{X}, \end{aligned}$$

$$\mathbf{w}_{15} = \mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2 r \Xi \mathbf{F}_2 + \mathbf{X} \mathbf{C}^T \mathbf{D},$$

$$\mathbf{w}_{55} = \mathbf{D}^T \mathbf{D} - \lambda^2 \mathbf{I},$$

再次应用舒尔补引理并记  $\mathbf{Y} = \mathbf{F}_1 \mathbf{X}$ , 可得线性矩阵不等式 (11). 可知, 闭环系统稳定且  $H_\infty$  范数小于界  $\lambda$ .

郑柏超, 等. 执行器退化的遥机器人系统量化反馈容错控制.

### 3 算例仿真

选取遥机器人参数为  $M_m = 0.5 \text{ kg}$ ,  $M_s = 1.2 \text{ kg}$ ,  $B_m = 1.2 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,  $B_s = 15 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{mm}^{-1}$ . 可知

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -2.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -12.5 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.8333 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 2 & 0 \\ 0 & 0.8333 \end{bmatrix}.$$

选取

$$\mathbf{C} = [0.2, 0.2, 0.3, -0.3],$$

$$\mathbf{D} = [0.4, -0.4, -0.5, 0.5],$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0.0050 & -0.0002 \\ 0.0000 & 0.0200 \\ 0.0500 & -0.0250 \\ -0.0100 & 0.0050 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0.2 & -0.4 & 0 & 0.2 \\ 0.4 & -0.2 & 0 & -1.8 \\ 0 & -1.6 & 0 & 0.4 \\ -0.2 & 0 & -2.4 & 0.2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{E}_1 = \begin{bmatrix} 0.05 & -0.2 & 0.2 & 0 \\ -0.18 & 1.4 & 0.18 & -0.6 \\ 0.10 & 0 & -0.288 & 0 \\ -0.8 & 0.2 & 0 & -0.5 \end{bmatrix}.$$

取性能指标  $\gamma = 1.5$ ,  $r_{\max} = 1$ ,  $r_{\min} = 0.88$ . 对执行器故障而言, 参数  $\theta_1$  在  $\alpha_1 = 0.7, \beta_1 = 0.85$  之间,  $\theta_2$  在  $\alpha_2 = 0.85, \beta_2 = 0.98$  之间. 解定理 1 得

$\mathbf{F}_1 =$

$$\begin{bmatrix} -966.8696 & 0 & -272.8946 & 0 \\ 0 & -7.4090 & 0 & -2.0393 \end{bmatrix},$$

$\mathbf{F}_2 =$

$$\begin{bmatrix} -3.5745 & -0.4659 & 0 & 0.5827 \\ 0 & -7.0782 & 8.2000 & 7.2546 \end{bmatrix}.$$

仿真中取初始条件  $\mathbf{x}_0^T = [0.5, 1, -0.8, 1.2]$ , 通信时延  $d = 1 \text{ s}$ ,  $\tau_c = 1$ ,  $\tau_d = 0.88$  及

$$\boldsymbol{\Delta}(t) = \begin{bmatrix} 0.2e^{-t} & 0.2\cos(t) & 0.2 & 0.15\cos(2t) \\ 0 & -0.06\cos(3t) & 0.06\sin(2t) & -0.2\cos(3t) \end{bmatrix},$$

经 Matlab 仿真, 结果如图 1 和图 2 所示.

由图 1 可以看出从机器人系统在位置与速度方面都能很快跟踪主机器人的位置与速度, 系统控制输入则由图 2 给出. 由此可见, 本文设计方法能使主

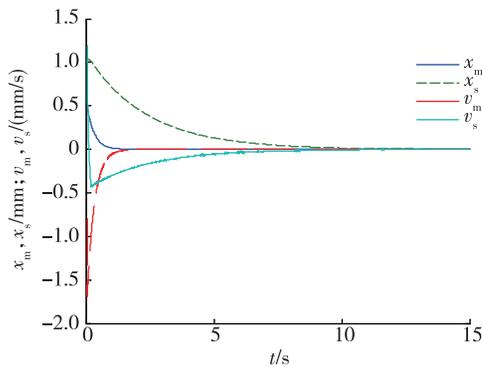


图1 机器人位置与速度响应曲线

Fig. 1 Response of robot positions and velocities

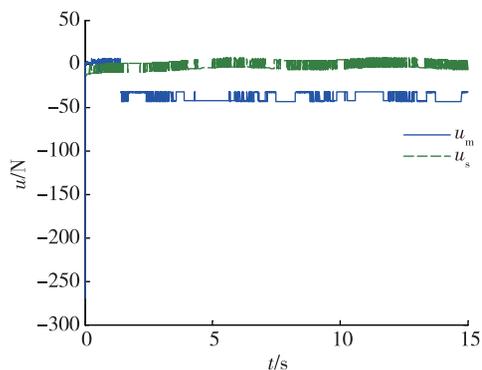


图2 控制输入仿真曲线

Fig. 2 Simulation curves of control inputs

从机器人工作稳定,并保证从机器人能很好地跟踪主机器人。

#### 4 结论

针对受模型不确定性、量化参数不匹配以及执行器退化故障影响的遥操作机器人系统,本文基于线性矩阵不等式技术等,探讨了鲁棒量化反馈容错控制设计问题.所提方法能有效克服上述影响,并确保从机器人能渐近跟踪主机器人.最后,经过仿真算例验证了本文方法的有效性。

#### 参考文献

##### References

[ 1 ] 郑敏,费树岷.遥操作机器人系统的鲁棒控制[J].自动化技术与应用,2006,25(1):11-15  
ZHENG Min, FEI Shumin. Robust control of a teleoperated robot system[J]. Techniques of Automation and Applications, 2006, 25(1): 11-15  
[ 2 ] 陈启宏,费树岷,宋爱国.遥操作机器人系统的预测控制[J].东南大学学报(自然科学版),2003,33(2):177-181

CHEN Qihong, FEI Shumin, SONG Aiguo. Predictive control of teleoperation robot systems [ J ]. Journal of Southeast University ( Natural Science Edition ), 2003, 33 ( 2 ): 177-181  
[ 3 ] Hashtrudi-Zaad K, Salcudean S E. Transparency in time-delayed systems and the effect of local force feedback for transparent teleoperation [ J ]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18( 1 ): 101-114  
[ 4 ] Mora A, Glas D F, Kanda T, et al. A teleoperation approach for mobile social robots incorporating automatic gaze control and three-dimensional spatial visualization [ J ]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2013, 43( 3 ): 630-642  
[ 5 ] Liu Y C. Robust synchronisation of networked Lagrangian systems and its applications to multi-robot teleoperation [ J ]. IET Control Theory & Applications, 2015, 9( 1 ): 129-139  
[ 6 ] Jin X, Yang G H, Li P. Robust adaptive tracking control of distributed delay systems with actuator and communication failures [ J ]. Asian Journal of Control, 2012, 14 ( 5 ): 1282-1298  
[ 7 ] 何潇,王子栋,吉吟东,等.一类非线性网络化系统的鲁棒故障检测[J].空间技术及应用,2010,36(5):7-12  
HE Xiao, WANG Zidong, JI Yindong, et al. Robust fault detection for a class of nonlinear networked systems [ J ]. Aerospace Control and Application, 2010, 36( 5 ): 7-12  
[ 8 ] Zuo Z, Ho D W C, Wang Y. Fault tolerant control for singular systems with actuator saturation and nonlinear perturbation [ J ]. Automatica, 2010, 46( 3 ): 569-576  
[ 9 ] 刘金良,田恩刚,顾洲.多自由度遥操作机器人可靠性控制研究[J].中国科学(信息科学),2012,42(9):1158-1169  
LIU Jinliang, TIAN Engang, GU Zhou. Reliable control for tele-robotics with multi degree of freedom [ J ]. Scientia Sinica ( Informationis ), 2012, 42( 9 ): 1158-1169  
[ 10 ] 游科友,谢立华.网络控制系统的最新研究综述[J].自动化学报,2013,39(2):101-118  
YOU Keyou, XIE Lihua. Survey of recent progress in networked control systems [ J ]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39( 2 ): 101-118  
[ 11 ] Jiang Z P, Liu T F. Quantized nonlinear control-A survey [ J ]. Acta Automatica, 2013, 39( 11 ): 1820-1830  
[ 12 ] Yan Y, Yu X H, Yu S H. Quantization effect on a second-order dynamical system under sliding-mode control [ J ]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2013, 23 ( 8 ): 82-93  
[ 13 ] 谢林柏,纪周成,赵维一.基于状态观测的量化系统稳定性分析[J].控制理论与应用,2007,24(4):581-586  
XIE Linbo, JI Zhoucheng, ZHAO Weiyi. Stability analysis of systems with signal quantization and state observation [ J ]. Control Theory & Applications, 2007, 24 ( 4 ): 581-586  
[ 14 ] Gao H J, Chen T W. A new approach to quantized feedback control systems [ J ]. Automatica, 2008, 44( 2 ): 534-542  
[ 15 ] Niu Y, Jia T, Wang X, et al. Output feedback control design for NCSs subject to quantization and dropout [ J ].

Information Sciences, 2009, 179(21):3804-3813

- [16] Kameneva T, Nesic D. Robustness of quantized control systems with mismatch between coder/decoder initializations[J]. Automatica, 2009, 45(3):817-822
- [17] Zheng B C, Yang G H.  $H_2$  control of linear uncertain systems considering input quantization with encoder/decoder mismatch[J]. ISA Transactions, 2013, 52(5):577-582
- [18] 薛艳梅,郝立颖.量化参数不匹配的线性系统监督滑模控制设计[J].计算机工程与应用,2015,51(15):22-27
- XUE Yanmei, HAO Liying. Supervisory-based sliding mode control design for a class of linear systems subject to quantization parameter mismatch[J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51(15):22-27

## Quantized feedback fault-tolerant control of teleoperated robot systems subject to actuator degradation

ZHENG Bochao<sup>1,2</sup> FU Xiyu<sup>2</sup> YANG Xin<sup>2</sup> KAN Yajin<sup>2</sup>

1 Jiangsu Collaborative Innovation Center on Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 School of Information and Control, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

**Abstract** This paper mainly discusses the robust quantized feedback tolerant-fault control design for teleoperated robotic systems. The teleoperated robot systems are obstructed by problems of actuator degradation, control input quantization, and quantized sensitivity parameter mismatch on the coder and decoder side. The construction of the controller includes two parts: the linear part is established via linear matrix inequality (LMI) for indexed performance problem, and the nonlinear part is designed to deal with quantized parameter mismatch issue. It shows that the proposed robust quantized feedback fault-tolerant control law can effectively eliminate the effects of actuator degradation and quantized parameter mismatch, and ensure the trajectory tracking from slaver robot to master robot asymptotically. Finally, the validity of the theoretical result is verified via simulation.

**Key words** quantized control; robotic; tolerant-fault control; mismatch; actuator degradation