

文章编号: 1000-8152(2004)03-0351-06

类 Lyapunov 理论在类人形机器人任务空间内跟踪的应用

刘英卓, 王越超, 席 宁

(中国科学院沈阳自动化研究所 机器人学重点实验室, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 考虑了类人形机器人的各种不确定因素, 提出了其手臂控制的新方法. 基于类 Lyapunov 方法, 设计出具有鲁棒性功能的任务空间控制器. 该方法得到的控制器不但在有限确定时间内达到稳定跟踪, 而且不需要雅可比矩阵求逆, 对一定类型的外部干扰具有鲁棒性功能. 最后通过数值仿真显示了所得结果的有效性及其应用方法.

关键词: 类人形机器人; 自适应控制; 神经网络

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Application of Lyapunov-like methodology for a humanoid robot tracking in task space

LIU Ying-zhuo, WANG Yue-chao, XI Ning

(Robotics Laboratory, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang Liaoning 110016, China)

Abstract: A new method for the arm control of a humanoid robot is proposed under the consideration of many uncertain factors. Based on Lyapunov-like methodology, controllers in task space were constructed which had a robust effect. Being different from common results, the obtained controllers not only guarantee tracking stability within a finite prescribed time, but also need not solve the inverse of Jacobian matrix and achieve robustness with respect to a class of bounded disturbance. Finally, numerical simulation results were given to illustrate the proposed methods.

Key words: humanoid robot; adaptive control; neural network

1 引言 (Introduction)

在类人形机器人作业描述中, 更多地是在任务空间进行的. 因此人们更加关心的是其末端执行器在任务空间的跟踪精度. 类人形机器人由于机构复杂, 超多自由度, 存在各种柔性环节以及外扰^[1,2], 对保障跟踪精度提出了特殊的要求. 因此考虑对其直接在任务空间中施以控制行为, 将会得到优于在关节空间内控制的性能^[2]. 同时, 因为任务空间的维数远小于类人形机器人关节空间的维数, 对任务空间轨迹给予规划, 各关节的运动自动适应任务, 这将有效降低问题的复杂度. 如何为类人形机器人在任务空间设计性能优良、同时避免过于复杂的控制器, 是一个挑战性的问题.

类 Lyapunov 方法^[3]是一种综合分解加速度类型的机器人跟踪控制理论. 其优点是不需要求导逆雅可比矩阵、能够保证在有限的规定时间内稳定跟踪、通过简单的调整能够很自然的得到自适应控制

结果. 在以往的文献[1]中, 作者采用神经网络和机理建模方法为一个以正交轮式移动车为载体的类人形机器人在关节空间内建立了动力学模型. 网络模型的本质需要自适应调整参数, 如何集成自适应机制, 使用关节空间内建立的模型实现任务空间的控制. 本文将采用类 Lyapunov 方法为类人形机器人建立自适应任务空间控制器, 从理论上给予探讨.

2 类人形机器人在任务空间内的自适应控制 (Adaptive control of humanoid robots in task space)

根据文献[1], 作者的类人形机器人右臂模型可以表达为

$$D_{r1}\ddot{q}_{r1} + C_{r1}(q_{r1}, \dot{q}_{r1}) + G_{r1}(q_{r1}) + T_{r1} \cdot F_{r1} = \tau_{r1}. \quad (1)$$

将其改写为参数化的形式, 即

$$Y(q_{r1}, \dot{q}_{r1}, \ddot{q}_{r1})\theta_{r1} + T_{r1} \cdot F_{r1} = \tau_{r1}.$$

F_{ri} 表示交互作用力, $F_{ri} = \{W\}^T \cdot \{\Xi(z)\} + \epsilon$, 使用 RBF 网络来逼近, ϵ 表示网络逼近误差. $\{\Xi(z)\}$ 表示网络活化函数, z 是网络输入, 后面的 $\{\Xi'(z)\}$ 表示为了适合矩阵运算而对 $\{\Xi(z)\}$ 所作的相应调节形式. T_{ri} 表示将力转换为等效转矩的类雅可比矩阵, 其他符号含义与通常机器人文献中相同. 设抓手位置 y (相对于右手臂的基系) 与其关节空间矢量 q_{ri} 的关系为 $y = f(q)$, 此处为方便起见, 省略掉了下标. 于是相应有

$$\dot{y} = J\dot{q}, \ddot{y} = J\ddot{q} + \dot{J}\dot{q}. \quad (2)$$

此处

$$J = \left(\frac{\partial f}{\partial q} \right) \quad (3)$$

是有手臂的雅可比矩阵. 雅可比矩阵与关节空间和任务空间 (注意此处相对于右臂的基系) 位形的关系相关, 可以假设为已知的.

在本部分, 作者首先考察已知参数的情况, 即类人形机器人物理参数明确, 模型辨识部分的神经网络权重逼近最优值^[4].

2.1 交互作用模块的自适应 (Adaptation of the interaction module)

定义 $e = y_d - y, x = \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix}$, 设计控制器为

$$\begin{aligned} \tau &= D(q)b + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + T \cdot \hat{F} = \\ &D(q)b + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + \\ &T \cdot [\{\hat{W}\}^T \cdot \{\Xi(z)\}]. \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $b = w \frac{h_1 + h_2}{e^T J w}$.

如果 $e^T J w \neq 0$, b 的物理含义是分解的加速度. 此处 w 是任意选择的矢量; $w \in \mathbb{R}^7, h_1 = e^T(e + \dot{y}_d - \dot{J}\dot{q}), h_2 = (1/2)\alpha x^T x, \alpha > 0, \alpha = \ln(v_0/\epsilon)/\tau_s, \tau_s$ 为跟踪的设定时间, ϵ 为任意小正数.

控制律成立的条件是 $e^T J w \neq 0$, 若 $e^T J w = 0$, 则应该对控制律作以调整. 考虑引进 $e^T J w$ 的一个死区 δ , 进一步可以将 w 取作 $J^T e$, 而使分母成为偏差变化趋势的度量球.

定理 1 假设类人形机器人机理模型部分不包含未建模动力学, 系统没有外部干扰; 假设神经网络部分的隐层输出 $\{\Xi'(z)\}$ 是持续激励的; 如果选择权重更新率为

$$\dot{\hat{W}} = \Gamma \{\Xi'(z)\}^T T^T D^{-T}(q) J^T \dot{e}, \Gamma = \Gamma^T > 0.$$

那么, 由式(4)控制的闭环机器人系统(1)是一致最终有界的. 即, 当时间趋于无穷时, 跟踪误差将位于

一球内, 所有信号保持界定. 令常数 c 定义为

$$\lambda_{\max}(J) * \lambda_{\max}(T) / \lambda_{\min}(D(q)). \quad (5)$$

$\lambda_{\max}(\cdot)$ 和 $\lambda_{\min}(\cdot)$ 表示矩阵的最大和最小奇异值.

该球可以表达为 $\left(\|x\| - \frac{c\epsilon_N}{\alpha} \right)^2 \leq \frac{c^2 \epsilon_N^2}{\alpha^2}, \epsilon_N \geq 0$ 是网络逼近误差的界.

证 取一 Lyapunov 函数候选

$$V = \frac{1}{2} x^T x + \frac{1}{2} \tilde{W}'^T \Gamma^{-1} \tilde{W}', \quad (6)$$

则其沿式(1)的轨迹的时间导数为

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e^T \dot{e} + \dot{e}^T \dot{e} + \tilde{W}'^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{W}}' = \\ &e^T \dot{e} + \dot{e}^T (\dot{y}_d - \dot{J}\dot{q}) - \dot{e}^T J\dot{q} + \tilde{W}'^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{W}}' = \\ &\dot{e}^T (e + \dot{y}_d - \dot{J}\dot{q}) - \dot{e}^T J\{b + D^{-1}(q)T[\{\tilde{W}\}^T \cdot \{\Xi(z)\}]\} - \\ &D^{-1}(q)T\epsilon\} + \tilde{W}'^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{W}}' = \\ &h_1 - e^T J w \frac{h_1 + h_2}{e^T J w} - e^T J D^{-1}(q)T[\{\tilde{W}\}^T \cdot \{\Xi(z)\}] + \\ &\tilde{W}'^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{W}}' + e^T J D^{-1}(q)T\epsilon = \\ &-h_2 + e^T J D^{-1}(q)T\epsilon \leq \\ &-\frac{\alpha}{2} \|x\|^2 + c\epsilon_N \|x\| = \\ &-\frac{\alpha}{2} \left(\|x\| - \frac{c\epsilon_N}{\alpha} \right)^2 + \frac{c^2 \epsilon_N^2}{2\alpha}. \end{aligned} \quad (7)$$

式(4) - 式(1)得

$$\ddot{q} - b = D^{-1}(q)T[\{\tilde{W}\}^T \cdot \{\Xi(z)\}] - D^{-1}(q)T\epsilon. \quad (8)$$

其中 $\tilde{W} = \hat{W} - W$.

从式(7)可见, 存在一个球, 当跟踪误差在该球外部时, $\dot{V} < 0$ 暗示了跟踪误差将最终落进该球内, 环内其他信号类似也有界. 证毕.

2.2 完全自适应的情况 (Whole adaptation situation)

事实上, 对于类人形机器人这样复杂的系统, 各个物理参数不可能明确知晓. 现在, 对前面的自适应控制器(4)作某种改进, 使内部要求的惯量估计阵的逆有界不再必需. 假设没有非结构化干扰. 取控制器为

$$\begin{aligned} \tau &= \\ &\hat{D}(q)\ddot{q} + \hat{C}(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{G}(q) + T \cdot \hat{F} + K(b - \ddot{q}) = \\ &Y(q, \dot{q}, \ddot{q})\hat{\theta} + T[\{\hat{W}\}^T \cdot \{\Xi(z)\}] + K(b - \ddot{q}). \end{aligned} \quad (9)$$

其中各符号 b, h_1, h_2, w, α 的定义与前面相同.

定理 2 给定如定理 1 的假设, 另外假设回归量 Y 是一致激励的. 如果选择参数更新率为

$$\begin{cases} \dot{\hat{\theta}} = \Gamma_1^{-1} Y^T K^{-T} J^T \dot{e} - \Gamma_1^{-1} Y^T \epsilon_\tau, \\ \dot{\hat{W}} = \Gamma_2^{-1} \{ \Xi'(z) \}^T T^T K^{-T} J^T \dot{e}. \end{cases} \quad (10)$$

此处 $\Gamma_1 = \Gamma_1^T > 0, \Gamma_2 = \Gamma_2^T > 0, \epsilon_\tau = Y\hat{\theta} - Y\theta, K$ 选作

$$K = \begin{cases} \hat{D}(q), & \text{if } \hat{D}(q) \neq 0, \\ kI, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (11)$$

此处 $K > 0$, 则闭环系统是全局稳定的, 跟踪误差和预测误差 ϵ_τ (ϵ_τ 同时保证了机器人的物理参数估计误差) 将保持在一个椭球内.

证 选择 Lyapunov 函数候选

$$V = \frac{1}{2} (x^T x + \hat{\theta}^T \Gamma_1 \hat{\theta}) + \frac{1}{2} \tilde{W}'^T \Gamma_2 \tilde{W}'. \quad (12)$$

此处 $\hat{\theta} = \hat{\theta} - \theta^*, \tilde{W} = \hat{W} - W$, 并且定义

$$\tilde{D}(q) = \hat{D}(q) - D(q),$$

$$\tilde{C}(q) = \hat{C}(q) - C(q),$$

$$\tilde{G}(q) = \hat{G}(q) - G(q),$$

则从式(1)和式(9), 得到

$$\begin{aligned} 0 &= \tilde{D}(q)\dot{q} + \tilde{C}(q, \dot{q})\dot{q} + \tilde{G}(q) + \\ &T \cdot \tilde{F} + K(b - \dot{q}) - T\epsilon = \\ &Y(q, \dot{q}, \ddot{q})\hat{\theta} + K(b - \dot{q}) + T \cdot \tilde{F} - T\epsilon. \end{aligned}$$

即

$$\dot{q} - b = K^{-1} [Y(q, \dot{q}, \ddot{q})\hat{\theta} + T \cdot \tilde{F} - T\epsilon]. \quad (13)$$

式(12)沿式(1)轨迹的时间导数为

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e^T \dot{e} + \dot{e}^T e + \hat{\theta}^T \Gamma_1 \dot{\hat{\theta}} + \tilde{W}'^T \Gamma_2 \dot{\tilde{W}}' = \\ &e^T \dot{e} + e^T (\dot{y}_d - \dot{J}\dot{q}) - \dot{e}^T J\dot{q} + \hat{\theta}^T \Gamma_1 \dot{\hat{\theta}} + \tilde{W}'^T \Gamma_2 \dot{\tilde{W}}' = \\ &\dot{e}^T (e + \dot{y}_d - \dot{J}\dot{q}) - \dot{e}^T J [b + K^{-1} Y \hat{\theta} + K^{-1} T \{ \tilde{W} \}^T \cdot \\ &\{ \Xi(z) \}] - K^{-1} T\epsilon + \hat{\theta}^T \Gamma_1 \dot{\hat{\theta}} + \tilde{W}'^T \Gamma_2 \dot{\tilde{W}}' = \\ &h_1 - e^T Jw \frac{h_1 + h_2}{e^T Jw} - e^T J K^{-1} Y \hat{\theta} - e^T J K^{-1} T \{ \tilde{W} \}^T \cdot \\ &\{ \Xi(z) \}] + e^T J K^{-1} T\epsilon + \hat{\theta}^T \Gamma_1 \dot{\hat{\theta}} + \tilde{W}'^T \Gamma_2 \dot{\tilde{W}}' = \\ &- h_2 + e^T J K^{-1} T\epsilon - \epsilon_\tau^T \epsilon_\tau \leq \\ &-\frac{\alpha}{2} \|x\|^2 - \epsilon_\tau^T \epsilon_\tau + c \epsilon_N \|x\| = \\ &-\frac{\alpha}{2} \left(\|x\| - \frac{c \epsilon_N}{\alpha} \right)^2 - \epsilon_\tau^T \epsilon_\tau + \frac{c^2 \epsilon_N^2}{2\alpha}. \end{aligned} \quad (14)$$

这表明跟踪误差和预测误差(同时决定参数估计误

$$\dot{\hat{\theta}} = \begin{cases} \Gamma_1^{-1} Y^T (K^{-T} J^T \dot{e} - \epsilon_\tau) - \Gamma_1^{-1} \frac{(K^{-T} J^T \dot{e} - \epsilon_\tau)^T Y \hat{\theta}}{d_1^2} \hat{\theta}, & \text{if } \|\hat{\theta}\| = d_1 \text{ and } (K^{-T} J^T \dot{e} - \epsilon_\tau)^T Y \hat{\theta} > 0, \\ \Gamma_1^{-1} Y^T (K^{-T} J^T \dot{e} - \epsilon_\tau), & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (19)$$

差)是一致最终有界的, 内部信号也有界. 证毕.

3 鲁棒性整定控制器 (Robust adjustment controller)

以上提出的控制器内作了严格的假设: 假设一致激励条件, 避免参数的“漂移”; 假设没有外扰. 然而对于一个复杂系统来讲, 各种干扰、未建模因素的存在, 要求实际的控制器具有鲁棒性. 鲁棒性要求抵制一定范围的干扰, 要求避免参数的漂移. 因此, 要求从控制器结构到参数更新律作相应的调整.

3.1 参数更新率的调整 (Tuning of parameters updating law)

假设类人形机器人右臂模型(1), 在具有外界干扰和网络逼近误差时, 可以描述为

$$D_{cl} \ddot{q}_{cl} + C_{cl}(q_{cl}, \dot{q}_{cl}) + G_{cl}(q_{cl}) + T_{cl} \cdot F_{cl} = \tau_{cl} + d. \quad (15)$$

设干扰 d 为常数有界(实际上已有扩充到关于跟踪误差范数线性), 即

$$\|d\| \leq d^* < +\infty. \quad (16)$$

采用在前一部分描述的控制律

$$\begin{aligned} \tau &= \hat{D}(q)\ddot{q} + \hat{C}(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{G}(q) + T \cdot \hat{F} + K(b - \dot{q}) = \\ &Y(q, \dot{q}, \ddot{q})\hat{\theta} + T \{ \hat{W} \}^T \cdot \{ \Xi(z) \} + K(b - \dot{q}). \end{aligned} \quad (17)$$

其中 b, h_1, h_2, w, α 的定义形式如前, 则由式(17)和式(1)得到

$$\dot{q} - b = K^{-1} [Y(q, \dot{q}, \ddot{q})\hat{\theta} + d + T \cdot \tilde{F} - T\epsilon]. \quad (18)$$

可以直接限定参数的边界(结构性边界), 而给出某种投影算法, 避免一致激励条件. 机器人的物理参数可以很自然的定界, 但是对于神经网络的权重来说, 尽管从理论上可以应用需要权重边界值的投影算法, 实际上其边界的确定并不容易. 现取两个足够大包容机器人物理参数和神经网络权重的凸紧集 $\{\hat{\theta} \mid \|\hat{\theta}\| \leq d_1\}, \{\hat{W} \mid \|\hat{W}\| \leq d_2\}$, d_1, d_2 是足够大正数.

注意, 只有当给定的轨迹有界, 没有网络重构误差, 没有未建模干扰时, 对于 $\{ \Xi(z) \}$ 的 PE (persistent excitation) 假设才不需要, 单独的反向传播算法调节权重使用才充分.

令变更后的更新率为

$$\dot{\hat{W}} = \begin{cases} \Gamma_2^{-1} \{\Xi(z)\}^T T^T K^{-T} J^T \dot{e} - \Gamma_2^{-1} \frac{(\{\Xi'(z)\}^T T^T K^{-T} J^T \dot{e})^T \hat{W}}{d_2^2} \hat{W}, & \text{if } \|\hat{W}\| = d_2 \text{ and } (\{\Xi'(z)\}^T T^T K^{-T} J^T \dot{e})^T \hat{W} > 0, \\ \Gamma_2^{-1} \{\Xi(z)\}^T T^T K^{-T} J^T \dot{e}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (20)$$

令

$$c = \lambda_{\max}(J) * \lambda_{\max}(T) / \lambda_{\min}(D(q)), \quad (21)$$

$$\xi = \frac{2|\lambda_{\max}(J)|}{\alpha \lambda_{\min}(K)}, \quad (22)$$

则得到如下的结论:

定理 3 在式(18)~(22)下的闭环系统是全局稳定的,即环内变量保持有界,并且系统的跟踪误差和预测误差(从而参数)位于以下的椭球之内:

$$\frac{\alpha}{2} \left[\|x\| - \frac{\xi d^+ + c \varepsilon_N}{\alpha} \right]^2 + \|\varepsilon_\tau\|^2 = \frac{(\xi d^+ + c \varepsilon_N)^2}{2\alpha}.$$

证 定义 Lyapunov 候选函数为式(12),

$$V = \frac{1}{2}(x^T x + \bar{\theta}^T \Gamma_1 \bar{\theta}) + \frac{1}{2} \hat{W}'^T \Gamma_2 \hat{W}'. \quad (23)$$

它沿式(18)轨迹的时间导数为

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e^T \dot{e} + \dot{e}^T \bar{e} + \bar{\theta}^T \Gamma_1 \dot{\bar{\theta}} + \hat{W}'^T \Gamma_2 \dot{\hat{W}}' = \\ &e^T \dot{e} + \dot{e}^T (\dot{y}_d - J\dot{q}) - \dot{e}^T J\dot{q}' + \bar{\theta}^T \Gamma_1 \dot{\bar{\theta}} + \hat{W}'^T \Gamma_2 \dot{\hat{W}}' = \\ &\dot{e}^T (e + \dot{y}_d - J\dot{q}) - \dot{e}^T J \{b + K^{-1} Y \bar{\theta} + K^{-1} d + \\ &K^{-1} T [\{\hat{W}\}^T \cdot \{\Xi(z)\}] - K^{-1} T \varepsilon\} + \bar{\theta}^T \Gamma_1 \dot{\bar{\theta}} + \hat{W}'^T \Gamma_2 \dot{\hat{W}}' = \\ &-h_2 - \dot{e}^T J K^{-1} Y \bar{\theta} - \dot{e}^T J K^{-1} d - \dot{e}^T J K^{-1} T [\{\hat{W}\}^T \cdot \\ &\{\Xi(z)\}] + \dot{e}^T J K^{-1} T \varepsilon + \bar{\theta}^T \Gamma_1 \dot{\bar{\theta}} + \hat{W}'^T \Gamma_2 \dot{\hat{W}}' \leq \\ &-h_2 - \dot{e}^T J K^{-1} d - \varepsilon_\tau^T \varepsilon_\tau + \dot{e}^T J K^{-1} T \varepsilon \leq \\ &-\frac{\alpha}{2} \|x\|^2 - \varepsilon_\tau^T \varepsilon_\tau + \|x\| \left(\frac{|\lambda_{\max}(J)|}{|\lambda_{\min}(K)|} \|d\| + c \varepsilon_N \right) \leq \\ &-\frac{\alpha}{2} \left[\|x\| - \frac{\xi d^+ + c \varepsilon_N}{\alpha} \right]^2 + \frac{(\xi d^+ + c \varepsilon_N)^2}{2\alpha} - \|\varepsilon_\tau\|^2. \end{aligned}$$

因此,在椭球之外, Lyapunov 函数的时间导数为负值.跟踪误差将保持在球内,被估计参数将保持有界,环内其它信号也是有界的.

注 如果将权重更新律取为 e 调整^[5]形式,可以得到同样的一致最终有界结果,只是权重的边界根据给定的理想权重的边界进行了重新划定.

3.2 控制器结构的调整 (Adjustment of controller structure)

调整控制器结构,可以在转矩级调整,或者在关节加速度级调整.为此,在控制律(9)中增加一个鲁棒调节项.

同样假设类人形机器人的右手臂带干扰的模型

为

$$D_{r1} \ddot{q}_{r1} + C_{r1}(q_{r1}, \dot{q}_{r1}) + G_{r1}(q_{r1}) + T_{r1} \cdot F_{r1} = \tau_{r1} + d, \quad (24)$$

干扰有界,即

$$|d_i| \leq m_i < +\infty, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (25)$$

取控制律

$$\tau = \hat{D}(q) \ddot{q} + \hat{C}(q, \dot{q}) \dot{q} + \hat{G}(q) + T \cdot \hat{F} + K(b - \dot{q}) + \tau_r. \quad (26)$$

其中: b, h_1, h_2, w, α 的定义形式如前;取 $\tau_r = (m + \|\|T\|\| \varepsilon_N) \text{sgn}(e^T J)$, 表示由 $(m_i + \|\|T\|\| \varepsilon_N) \text{sgn}(e^T J)_i$ 组成的矢量; $\|\|T\|\|$ 表示由 $\|T\|$ 组成的与系统同维的矢量.将以上控制律带入式(24),得到

$$\ddot{q} - b = K^{-1} [Y(q, \dot{q}, \ddot{q}) \bar{\theta} + d + T \cdot \tilde{F} - T \varepsilon + \tau_r]. \quad (27)$$

利用和式(10)一样的参数更新律

$$\begin{cases} \dot{\bar{\theta}} = \Gamma_1^{-1} Y^T K^{-T} J^T \dot{e}, \\ \dot{\hat{W}} = \Gamma_2^{-1} \{\Xi'(z)\}^T T^T K^{-T} J^T \dot{e}, \end{cases} \quad (28)$$

则得到如下的结论:

定理 4 由式(27)、(28)组成的闭环系统是渐近稳定的,系统的跟踪误差将随时间趋于无穷而趋于零.

证 选择 Lyapunov 函数候选

$$V = \frac{1}{2}(x^T x + \bar{\theta}^T \Gamma_1 \bar{\theta}) + \frac{1}{2} \hat{W}'^T \Gamma_2 \hat{W}'. \quad (29)$$

其沿式(27)的轨迹的时间导数为

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \\ &e^T \dot{e} + \dot{e}^T (\dot{y}_d - J\dot{q}) - \dot{e}^T J\dot{q}' + \bar{\theta}^T \Gamma_1 \dot{\bar{\theta}} + \hat{W}'^T \Gamma_2 \dot{\hat{W}}' = \\ &\dot{e}^T (e + \dot{y}_d - J\dot{q}) - \dot{e}^T J \{b + K^{-1} Y \bar{\theta} + \\ &K^{-1} (d + \tau_r) + K^{-1} T [\{\hat{W}\}^T \cdot \{\Xi(z)\}] + \\ &K^{-1} T \varepsilon\} + \bar{\theta}^T \Gamma_1 \dot{\bar{\theta}} + \hat{W}'^T \Gamma_2 \dot{\hat{W}}' = \\ &-h_2 - \dot{e}^T J K^{-1} (d + \tau_r + T \varepsilon) = \\ &-h_2 - \dot{e}^T J K^{-1} d - \dot{e}^T J K^{-1} m \text{sgn}(e^T J) - \\ &\dot{e}^T J K^{-1} \|\|T\|\| \varepsilon_N \text{sgn}(e^T J) - \dot{e}^T J K^{-1} T \varepsilon \leq -h_2. \end{aligned}$$

因此,闭环系统是渐近稳定的,跟踪误差将随时间趋

于无穷而趋于零。

讨论 在以上提出的鲁棒性控制律中,都严格假设了外部干扰、未建模动力学等是有界的,这种边界在仿真中易于给定,但是对于实际系统的衡量是一个难点.如果取的边界值不对,则所推导的控制器将不再保持稳定.同时,控制抖动将激发系统高频响应,在实际应用中并不可行.为此,应该考虑放宽不实际的约束条件,使控制器具有 H_∞ 跟踪性能。

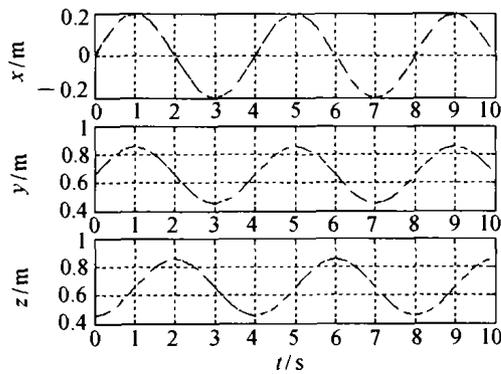
4 仿真结果 (Simulation results)

利用计算机辅助设计软件 MATLAB/Simulink 来仿真所提出的拟人机器人任务空间控制器性能状况.假设车和上身以及左臂保持静止,只有右臂运动,则所控制的情况与固定基时相同,旨在验证所提出的控制律的有效性.给定期望的轨迹如下(见图 1 所示):

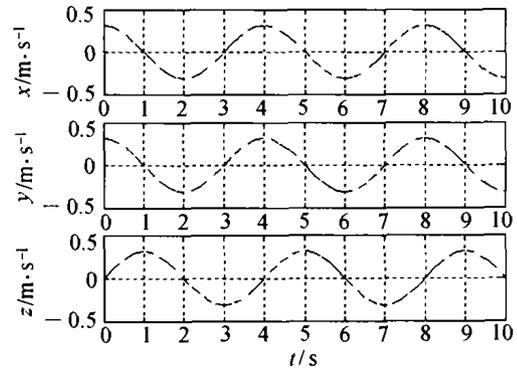
$$x = 0.2 \sin \frac{\pi}{2} t,$$

$$y = 0.6555 + 0.2 \sin \frac{\pi}{2} t,$$

$$z = 0.6555 - 0.2 \cos \frac{\pi}{2} t.$$

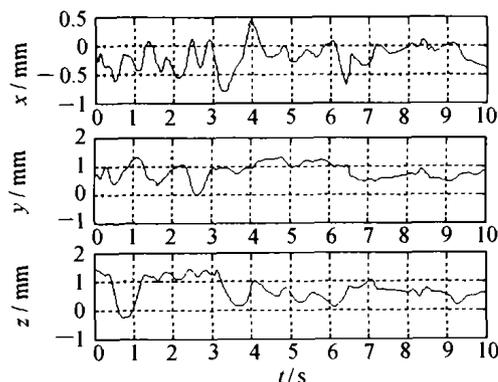


(a) 理想位置

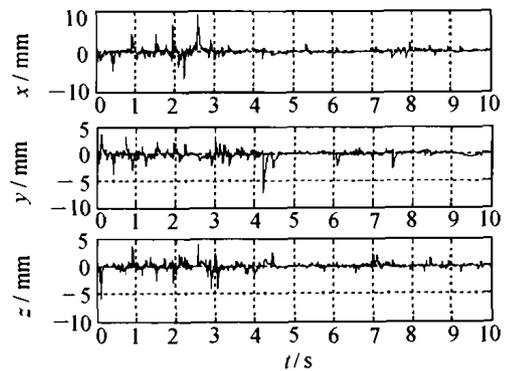


(b) 期望的速度

图 1 期望的轨迹
Fig. 1 Desired trajectory



(a) 位置误差



(b) 速度误差

图 2 跟踪误差响应和速度误差响应
Fig. 2 Tracking errors and velocity errors

仿真试验的控制参数设置见表 1;机器人的物理参数见文献[1];控制中用到的参数取作: $\tau_s = 0.2 \text{ s}, \delta = 10^{-3}, \epsilon = 10^{-6}, v_0 = 0.5 * \left\| \begin{matrix} e_0 \\ e_0 \end{matrix} \right\|^2$.以定理 1 为例设计控制器,取网络的学习率 Γ 为 0.35,得到位置跟踪误差结果和跟踪速度误差如图 2 所示,图 3 是右臂的各关节的控制输入, s_1, s_2, s_3 代表肩部 3 个关节, w_1, w_2, w_3 代表腕部 3 个关节。

从这些数值结果可以看出,所提出的控制器具有很好的响应。

表 1 仿真试验的控制参数

Table 1 Control parameters for simulation test

控制参数	设定值
起动时间/s	0
停止时间/s	10
最小步长/s	auto
最大步长/s	auto
容许偏差/rad	10^{-3}
积分算法	ode45(Dormand-Prince)
初始状态	[0 0 0 0 0 0 0]

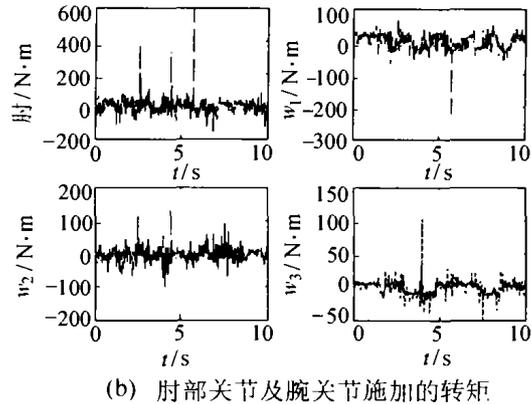
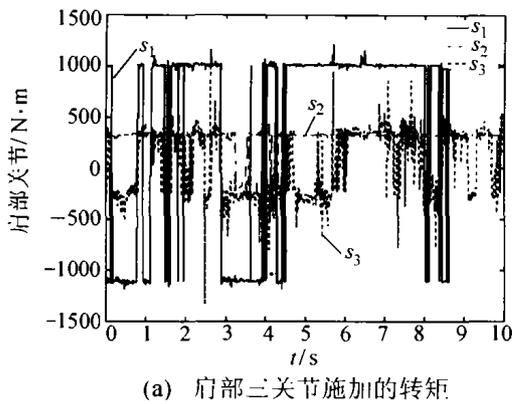


图3 控制输入响应曲线

Fig. 3 Response curves of control inputs

5 结论(Conclusion)

本文将类 Lyapunov 方法推广到类人形机器人的手臂任务空间自适应跟踪控制问题. 在假设其雅可比矩阵是已知、外界动力学干扰是常数有界时, 提出的控制器不但具有类 Lyapunov 方法自身的优点: 避免对雅可比矩阵求逆, 回避要求参数更新律中的估计惯量阵的逆有界. 而且将应用智能建模技术得到的混合模型有机集成到自适应控制中去, 从理论上给出了详细阐述. 控制律和参数更新率中涉及到关节加速度的测量, 这一点可以通过相关的技术给予解决^[2,6].

参考文献(References):

[1] NOVAKOVIC Z R. Lyapunov-like methodology for robot tracking control synthesis [J]. *Int J Control*, 1990, 51(3):567 - 583.
 [2] 宋亦旭. 正交轮式移动机器人轨迹跟踪控制研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2002.
 (SONG Yixu. *Study on trajectory tracking control of mobile robot with orthogonal wheel assemblies* [D]. Beijing: Graduate School, Chinese Academy of Sciences, 2002.)
 [3] 刘英卓. 拟人机器人交互作用力的研究[J]. 南通工学院学报,

2003, 2(1):27 - 31.

(LIU Yingzhuo. Study on the interaction force of a humanoid robot [J]. *J of Nantong Institute of Technology*, 2003, 2(1):27 - 31.)

[4] CHANG Yeongchan, CHEN Borsen. A nonlinear adaptive tracking control design in robotic systems via neural networks [J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 1997, 5(1):13 - 29.
 [5] NARENDRA K S, ANNASWAMY A M. A new adaptive law for robust adaption without persistent excitation [J]. *IEEE Trans on Automatol Control*, 1987, 32(2):134 - 145.
 [6] 韩建达. 基于加速度反馈的机器人鲁棒控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1997.
 (HAN Jianda. *Robust control for robot manipulators based on joint acceleration feedback* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1997.)

作者简介:

刘英卓 (1972 —), 男, 中国科学院沈阳自动化所机器人重点研究室博士, 主要研究方向: 仿人机器人, 机器人动力学, 机器人协调和控制, E-mail: liuyingzhuo@sohu.com;

王越超 (1960 —), 男, 博士生导师, 中国科学院沈阳自动化所所长, 研究领域: 纳米技术, 多机器人技术, E-mail: ycwang@sia.ac.cn;

席宁 (1961 —), 男, 博士生导师, 美国密歇根大学教授, 中国科学院沈阳自动化所特聘研究员, 研究领域: 纳米机器人技术, 多机器人技术, E-mail: xin@egr.msu.edu.