

机器人轨迹纠偏控制方法研究

景奉水¹, 杨超^{1,2}, 杨国栋¹, 谭民¹

(1. 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为减小机器人在执行轨迹跟踪任务过程中末端产生的位姿误差, 在建立机器人轨迹纠偏系统模型的基础上, 提出了一种积分型纠偏控制器实现方案. 该方案直接在机器人的关节空间上对误差进行补偿. 基于前述模型和一系列假设, 首先从数学上证明了比例-积分纠偏控制器能够使纠偏误差以负指数收敛, 进而说明积分型纠偏控制器的有效性. 实验结果表明: 通过设置合适的参数, 在初始轨迹最大偏差为 8 mm 的情况下, 纠偏控制后偏差均方根值小于 0.07 mm, 最大值小于 0.4 mm.

关键词: 轨迹跟踪; 轨迹纠偏; 纠偏控制; 运动规划; 机器人

中图分类号: TP242.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2017)-03-0292-06

Robot Trajectory Rectification Control Methods

JING Fengshui¹, YANG Chao^{1,2}, YANG Guodong¹, TAN Min¹

(1. State key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

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

Abstract: To reduce the pose error of the robot end during trajectory tracking, an implementation of the integral-type rectification controller is proposed based on the robot trajectory rectification model. In the proposed method, the error is compensated directly in the joint space of the robot. Based on the aforementioned model and a series of assumptions, it is proved mathematically that the rectification error converges with a negative exponent by adopting the proportional-integral rectification controller, which demonstrates the effectiveness of the integral-type rectification controller. The experiment results show that in the case of the initial trajectory deviation of 8 mm, the RMS (root mean square) value and the maximum value of the tracking deviation are reduced to less than 0.07 mm and 0.4 mm respectively through setting appropriate parameters for the rectification controller.

Keywords: trajectory tracking; trajectory rectification; rectification control; motion planning; robot

1 引言 (Introduction)

机器人轨迹纠偏控制是指机器人在执行轨迹跟踪任务时实时调节其末端位姿, 减小轨迹跟踪误差的过程. 其主要特点是: (1) 跟踪轨迹的路径偏离目标轨迹的路径; (2) 跟踪轨迹的路径偏离目标轨迹的路径的量值相比路径自身的几何尺度要小得多.

常见的机器人轨迹纠偏控制的例子包括焊缝跟踪和天文轨迹跟踪等. 在机器人焊接过程中, 受各种因素的影响, 例如同批次工件在加工、装夹过程中的尺寸和位置变化, 焊接过程中工件的受力和散热条件的变化等, 示教焊接路径与实际焊缝之间会存在偏差. 通过轨迹纠偏可减小这一偏差, 提高焊接质量^[1-3]. 地面射电望远镜在天文观测中要跟踪射电信号的位置和指向随时间变化的轨迹, 但

是由于风振、温变等干扰因素的影响, 跟踪轨迹常常偏离目标轨迹, 也要通过纠偏控制来提高观测精度^[4].

机器人轨迹纠偏控制的方案有 2 类. 一类是宏-微控制方式, 即在原有机器人末端增加一个微动装置^[5-9]. 由于这种方式中机器人运动控制与微动控制是解耦的, 所以控制较为简单. 但缺点是增加了成本, 同时也增加了额外的载荷和系统复杂性, 使机器人稳定性降低, 容易出现抖动等问题^[8-9]. 另外一类是不增加额外装置, 直接利用机器人的关节补偿功能来实现机器人末端位姿的微小调节. 这种方式的好处是不需要为机器人增加额外的装置. 一些国外工业机器人, 如日本安川公司的 Motoman UP6 型机器人, 提供了电压模拟量输入接口, 以实

时控制机器人末端执行器沿笛卡儿空间的 x 、 y 和 z 方向的位置纠偏量, 就是属于这一类. 有些学者正是利用机器人的这一功能, 实现了机器人的焊缝跟踪实验^[2,10]. 但是这种笛卡儿空间位置纠偏的原理和方法是不公开的^[10].

另外有些学者利用轨迹完全重规划的方法进行轨迹纠偏^[11-12], 这类方法需要完全获得机器人末端的位姿并进行逆运动学实时计算. 但要在大范围精确获得机器人末端的位姿是极其困难的, 而实时计算串联型机器人的逆运动学也是一件有挑战性的事情, 这种方式目前难以实际应用.

基于以上研究现状, 本文提出了一种利用关节补偿功能的机器人轨迹纠偏系统模型和纠偏控制方法. 这种方法克服了轨迹完全重规划方法的一些弱点, 不需要实时获得机器人末端的位姿, 也不需要进行逆运动学实时计算, 仅靠轨迹的偏差信息就可以实现轨迹纠偏控制.

2 纠偏原理 (Rectification principles)

2.1 机器人轨迹纠偏系统模型

图 1 给出了一种基于雅可比矩阵的机器人纠偏系统模型. 其中虚线框内部分表示的是常规的无纠偏功能的关节型机器人的控制系统. $\mathbf{x}_C(t) \in \text{SE}(3)$ ^[13] 为机器人在通过示教或者离线仿真得到的作动器编程轨迹上在 t 时刻的位姿; $\boldsymbol{\theta}(t)$ 为在 t 时刻对应 $\mathbf{x}_C(t)$ 的关节位置, $\boldsymbol{\theta}(t) \in \mathfrak{R}^n$, n 为机器人的关节数; $\boldsymbol{\theta}_C(t)$ 为在 t 时刻输入到机器人关节控制器的位置命令值, 对于无纠偏功能的机器人控制系统来说, $\boldsymbol{\theta}_C(t) = \boldsymbol{\theta}(t)$.

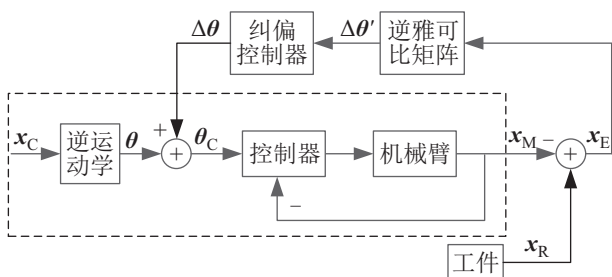


图 1 机器人轨迹纠偏系统模型

Fig.1 The model of trajectory rectification system for robots

设 $\mathbf{x}_R(t) \in \text{SE}(3)$ 为机器人末端工具在参考轨迹上在 t 时刻的位姿, $\mathbf{x}_M(t) \in \text{SE}(3)$ 为机器人末端工具在通过传感器获得的实际轨迹上在 t 时刻的位姿, $\mathbf{x}_E(t) = \mathbf{x}_R(t) - \mathbf{x}_M(t)$ 为机器人末端工具在参考轨迹上与在实际轨迹上在 t 时刻的位姿之差, 称为 **纠偏误差**. $\mathbf{x}_E(t) \in \text{SE}(3)$, 因其位于 $\text{SE}(3)$ 的有界区域

上, 而这一有界区域又可以同胚映射到 6 维线性空间 \mathfrak{R}^6 内, 所以也可以在 \mathfrak{R}^6 上表示 $\mathbf{x}_E(t)$, 即 $\mathbf{x}_E(t) \in \mathfrak{R}^6$.

定义在任务空间的纠偏误差通过与机器人逆雅可比矩阵相乘可以近似得到对应的关节偏差 $\Delta\boldsymbol{\theta}'(t)$, 其原理如下:

根据 2.2 节的条件 3, 在纠偏工作空间内, 机器人的逆雅可比矩阵 $\mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta}) \in \mathfrak{R}^{6 \times 6}$ 一定存在. 由逆雅可比矩阵的定义^[13] 可知

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}(t) = \mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta}) \cdot \mathbf{v}_x(t) \quad (1)$$

其中, $\dot{\boldsymbol{\theta}}(t) \in \mathfrak{R}^6$ 为在关节位置 $\boldsymbol{\theta}(t)$ 处的时间导数, $\mathbf{v}_x(t) \in \mathfrak{R}^6$ 为对应的机器人末端工具位姿 $\mathbf{x}(t) \in \mathfrak{R}^6$ 的时间导数. 设 δt 为系统测量时间间隔, 当其足够短时, 可得

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}(t) \approx \frac{\delta\boldsymbol{\theta}(t)}{\delta t} \text{ 和 } \mathbf{v}_x(t) \approx \frac{\delta\mathbf{x}(t)}{\delta t}$$

其中, $\delta\boldsymbol{\theta}(t) \in \mathfrak{R}^6$ 为在 $\boldsymbol{\theta}(t)$ 处 δt 时间段内的变量, $\delta\mathbf{x}(t) \in \mathfrak{R}^6$ 为对应时间段内的机器人末端工具位姿变量. 将其代入式 (1) 并消去两边的 δt , 可得

$$\delta\boldsymbol{\theta}(t) \approx \mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta}) \cdot \delta\mathbf{x}(t) \quad (2)$$

注意到式中 $\mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta})$ 在 $\boldsymbol{\theta}(t)$ 邻域近似为常量, 用 $\mathbf{x}_E(t)$ 代替 $\delta\mathbf{x}(t)$, 相应地用 $\Delta\boldsymbol{\theta}'(t)$ 代替 $\delta\boldsymbol{\theta}(t)$, 就可得到

$$\Delta\boldsymbol{\theta}'(t) \approx \mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta}) \cdot \mathbf{x}_E(t) \quad (3)$$

下节将证明为达到轨迹纠偏目的, 关节偏差不能直接与 $\boldsymbol{\theta}(t)$ 相加, 而是需要通过图 1 所示的纠偏控制器生成关节调整量 $\Delta\boldsymbol{\theta}(t)$, 再与 $\boldsymbol{\theta}(t)$ 相加, 最终生成机器人控制器的命令值 $\boldsymbol{\theta}_C(t)$.

以上各量均为时间变量 t 的函数, 为简化表示, 在不引起混淆的情况下, 各符号在图 1 及下文中省略了时间变量 t .

2.2 比例-积分纠偏控制器

为了说明 2.1 节提出的机器人轨迹纠偏系统模型的有效性, 本节给出其纠偏控制器的一种具体实现形式——比例-积分控制器, 并从理论上证明其轨迹纠偏误差的收敛性.

如图 2 所示, \mathbf{x}_R 为机器人的作动器需要完成的参考轨迹, \mathbf{x}_C 为机器人示教或者离线仿真得到的作动器编程轨迹, $\mathbf{x}_{RC} = \mathbf{x}_R - \mathbf{x}_C$ 为参考轨迹与编程轨迹之差, 称为 **轨迹偏差**, 可以在 \mathfrak{R}^6 上表示 \mathbf{x}_{RC} , 即 $\mathbf{x}_{RC} \in \mathfrak{R}^6$. 其对时间的导数为 $\dot{\mathbf{x}}_{RC}$.

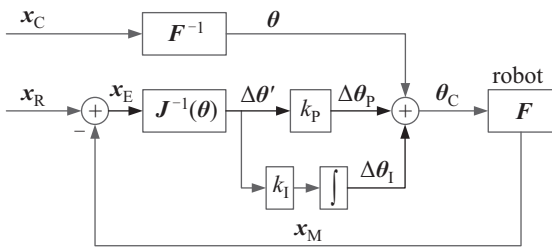


图 2 机器人轨迹纠偏系统的理想模型

Fig.2 The ideal model of the trajectory rectification system for robots

设机器人在轨迹纠偏时满足以下条件:

条件 1: 机器人做低速运动, 忽略机器人动力学和运动控制系统的动态特性.

条件 2: 有传感器可以获得机器人的纠偏误差 x_E .

条件 3: 在机器人关节空间内部存在一个连续的区域 Θ , $\Theta \subset \mathbb{R}^6$, 通过正运动学同机器人工作空间内的一个连续的区域 X ($X \subset \mathbb{R}^6$) 建立一一映射关系. Θ 称为 **纠偏配置空间**, X 称为 **纠偏工作空间**. 在轨迹纠偏时机器人关节始终处于 Θ 内, 相应的末端工具处于 X 内.

满足条件 3 的 Θ 到 X 的正运动学用 F 表示:

$$F: \Theta \rightarrow X$$

F 在 θ 处的偏导数用 $J(\theta)$ 表示, 即为机器人的雅可比矩阵.

相应的 X 到 Θ 的逆运动学用 F^{-1} 表示:

$$F^{-1}: X \rightarrow \Theta$$

F^{-1} 在 θ 处的偏导数用 $J^{-1}(\theta)$ 表示, 即为机器人的逆雅可比矩阵.

注: 条件 1 在诸如机器人弧焊、涂胶等对路径精度要求高, 而速度要求不高的作业中近似满足. 条件 2 要求获得机器人纠偏误差 x_E , 理论上 x_E 是一个 6 维变量, 但实际上我们常常只关注或只能获得其中某几个维度偏差, 这时只需将其他维度纠偏误差置 0 即可. 条件 3 要求纠偏工作空间和纠偏配置空间一一映射, 而多数机器人的逆运动学存在多解问题; 但是实际作业中, 尤其是对路径精度要求高的作业中, 要根据关节值连续原则选取唯一解, 因此也是符合实际情况的.

在图 2 中, 用比例-积分控制器替代图 1 的轨迹纠偏控制器, 并用 k_p 表示比例控制系数, 用 k_i 表示积分控制系数. $\Delta\theta_p$ 表示在关节空间上的比例控制增量, $\Delta\theta_i$ 表示积分控制增量, 它们的和 $\Delta\theta$

作为关节空间上的纠偏量与编程轨迹对应的关节值 θ 累加后得到 θ_C . 根据条件 1, 忽略机器人动力学和运动控制系统的动态特性, 即关节值可直接转换成机器人末端的工具的位姿值, 图 1 就简化成了图 2 表示的比例-积分轨迹纠偏控制理想模型.

定理 1: 对图 2 所示的机器人轨迹纠偏系统, 采用比例-积分控制进行轨迹纠偏控制时, 纠偏误差与轨迹偏差的时间导数正相关, 且轨迹偏差为常数时, 纠偏误差以负指数收敛到 0.

证明:

$$\because x_M = F(\theta_C) = F(\theta + \Delta\theta_p + \Delta\theta_i) \quad (4)$$

$$\therefore x_E = x_R - F(\theta + \Delta\theta_p + \Delta\theta_i) \quad (5)$$

将 $F(\theta + \Delta\theta_p + \Delta\theta_i)$ 在 θ 处作泰勒展开, 并忽略 2 次以上的高阶项, 得到

$$F(\theta + \Delta\theta_p + \Delta\theta_i) = F(\theta) + F'(\theta) \cdot (\Delta\theta_p + \Delta\theta_i) \quad (6)$$

由于

$$\theta = F^{-1}(x_C)$$

$$\Delta\theta_p = k_p \cdot J^{-1}(\theta) \cdot x_E$$

$$\Delta\theta_i = k_i \cdot J^{-1}(\theta) \cdot \int x_E dt$$

$$F'(\theta) = J(\theta)$$

代入式 (6) 并整理后得

$$F(\theta + \Delta\theta_p + \Delta\theta_i) = x_C + k_p \cdot x_E + k_i \cdot \int x_E dt \quad (7)$$

将式 (7) 代入式 (5), 得

$$(1 + k_p)x_E = (x_R - x_C) - k_i \cdot \int x_E dt \quad (8)$$

将 $x_{RC} = x_R - x_C$ 代入式 (8) 得

$$(1 + k_p)x_E = x_{RC} - k_i \cdot \int x_E dt \quad (9)$$

对式 (9) 两边取时间导数, 得

$$(1 + k_p)\dot{x}_E = \dot{x}_{RC} - k_i \cdot x_E \quad (10)$$

令 $r = \dot{x}_{RC}$, 代入式 (10) 得

$$(1 + k_p)\dot{x}_E = r - k_i \cdot x_E \quad (11)$$

当 r 为常量时, 对式 (11) 积分得

$$x_E = \frac{r}{k_i} + C \cdot e^{-\frac{k_i}{1+k_p}t} \quad (12)$$

式中 C 为积分常量.

从式 (12) 中容易看出纠偏误差与轨迹偏差对时间的导数正相关. 特别当轨迹偏差 x_{RC} 为常量时, 其导数 r 等于 0, 纠偏误差以负指数收敛到 0:

$$x_E = C \cdot e^{-\frac{k_i}{1+k_p}t} \quad (13)$$

证毕.

推论 (积分纠偏控制定理): 对图 2 所示的机器人轨迹纠偏系统, 当采用积分控制进行轨迹纠偏时, 纠偏误差与轨迹偏差的时间导数正相关, 且轨迹偏差为常数时, 纠偏误差以负指数收敛到 0.

当 $k_p = 0$ 时, 式 (12) 和式 (13) 依次变为

$$\mathbf{x}_E = \frac{\mathbf{r}}{k_I} + \mathbf{C} \cdot e^{-k_I t} \quad (14)$$

$$\mathbf{x}_E = \mathbf{C} \cdot e^{-k_I t} \quad (15)$$

去掉比例控制项, 仅有积分控制项时, 不会影响比例-积分纠偏控制定理的结论. 相反, $k_I = 0$ 时仅有比例控制, 特别是 $k_p = 1$ 时, 即仅将由轨迹偏差与逆雅可比矩阵相乘获得的关节偏差 $\Delta\theta'(t)$ 与关节值相加时, 并不能使轨迹偏差收敛.

3 试验研究 (Experimental Study)

3.1 试验系统

为了验证 2.2 节比例-积分轨迹纠偏系统的有效性和定理 1 的正确性, 建立了图 3 所示的机器人轨迹纠偏实验系统.

在图 3 的实验系统中, 选用了国产埃夫特公司的 ER10L-C10 型机械臂. 其原配控制器不支持纠偏控制功能, 为此开发了基于 PC 的机器人控制器 ARC-I, 关节位置伺服频率为 250 Hz, 并实现了图 2 所示的比例-积分轨迹纠偏控制功能. 为了能精确测量轨迹纠偏误差 \mathbf{x}_E , 选用了“平板搭接焊缝 + META Vision Systems 焊缝传感器”构成的轨迹偏差检测方案. META Vision Systems 焊缝传感器具有 0.1 mm 的检测精度和约 25 Hz 的偏差检测速率.



图 3 轨迹纠偏控制实验系统

Fig.3 Experimental system for trajectory rectification

如图 4 所示, 焊缝形状为平面直线焊缝, 有效轨迹跟踪长度 L 为 500 mm, 红色的虚线为焊缝中心线, 绿色实心直线为示教轨迹所通过的路径, 它们在轨迹的起始点和终点分别在垂直焊缝走向的方向偏离了 D_1 和 D_2 .

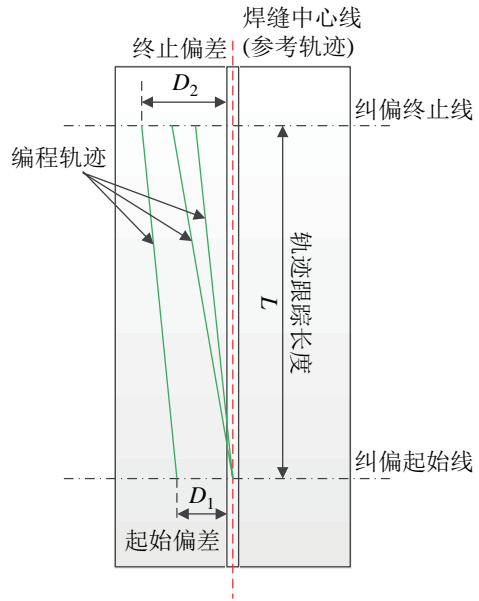


图 4 纠偏测试轨迹的通过路径

Fig.4 Paths of testing trajectories for rectification control

3.2 试验步骤与结果

(1) 关闭试验系统的轨迹纠偏功能. 操作示教器, 依次移动焊缝传感器到图 4 所示的焊件上绿色直线的起点和终点, 用示教器记录这两点对应的机械臂各关节位置, 并从焊缝传感器控制台上读出相应的 D_1 和 D_2 值.

(2) 编程使焊缝传感器做过步骤 (1) 中所记录两点的直线运动并设置运动速度 v .

(3) 按下再现按钮, 使机器人做步骤 (2) 中编程的直线运动, 记录未纠偏时的轨迹偏差 \mathbf{x}_{RC} 值. 需要注意的是, 由于焊件加工的原因和焊缝传感器的测量误差, 在图 5 中, 焊缝原始偏差 \mathbf{x}_{RC} 的测量值并不是一条严格的直线, 并伴有明显的测量噪声.

(4) 设置 k_p, k_I 值, 打开系统的轨迹纠偏功能, 按下再现按钮, 使机器人做步骤 (2) 中编程的直线运动, 记录纠偏误差 \mathbf{x}_E 的值.

通过改变 D_1, D_2, v, k_p 和 k_I 等参数, 可以得到不同的 \mathbf{x}_E 值.

图 5 所示的一组试验数据对应的参数是: $L = 500 \text{ mm}, D_1 = 0.39 \text{ mm}, D_2 = -4.5 \text{ mm}, v = 5 \text{ mm/s}, k_p = 0$ 和 $k_I = 0.1$. 其最大纠偏误差发生在焊缝的起始点处, 为 0.39 mm, 与 D_1 一致, 纠偏误差的均方根 (RMS, 与纠偏误差的标准差近似相等) 为 0.047 mm.

设置 $L = 500 \text{ mm}, D_1 = 0 \text{ mm}$ (Meta 焊缝传感器可做焊缝偏差零位设置), $D_2 = -8 \text{ mm}; v$ 分别取 5 mm/s 和 10 mm/s, k_p 分别取 -0.2、0 和 0.2, k_I 分别取 0.1、0.2 和 0.4. 对每系列参数分别测试并

重复3次,共得到 3×18 组测试数据.计算每组测试数据的轨迹纠偏误差 x_E 的均方根值和最大绝对值并求3次的平均值,所得结果如表1~4所示.

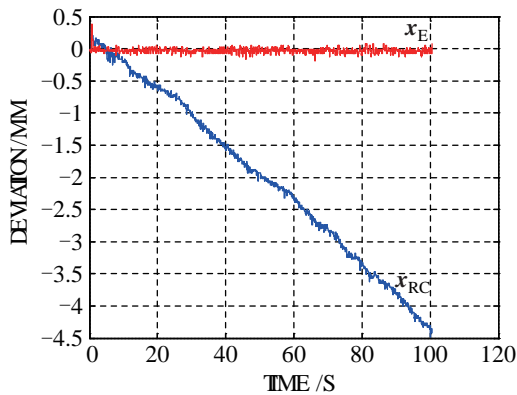


图5 轨迹偏差 x_{RC} 和轨迹纠偏误差 x_E

Fig.5 x_{RC} deviations of original trajectories and x_E deviations after rectification control

表1和表2分别列出了当 $v = 5 \text{ mm/s}$ 和 $v = 10 \text{ mm/s}$ 时, k_P 依次取 $-0.2, 0$ 和 0.2 , k_I 依次取 $0.1, 0.2$ 和 0.4 时得到的轨迹纠偏误差 x_E 的均方根值(单位为mm).可以看出,随着速度增大,同一系列参数对应的轨迹纠偏误差 x_E 的均方根值也显著增大.根据式(12)或式(14),随着机器人末端的速度增大,纠偏时间缩短,因 D_1 和 D_2 不变,所以轨迹偏差的时间导数 r 增大, x_E 值增大.实验结果与定理1结论一致.

表1 当 $v = 5 \text{ mm/s}$ 时 x_E 的RMS(单位: mm)

Tab.1 RMS of x_E when $v = 5 \text{ mm/s}$ (unit: mm)

$k_I \backslash k_P$	-0.2	0	0.2
0.1	0.0568	0.0565	0.0564
0.2	0.0562	0.0548	0.0550
0.4	0.1546	0.1480	0.1523

表2 当 $v = 10 \text{ mm/s}$ 时 x_E 的RMS(单位: mm)

Tab.2 RMS of x_E when $v = 10 \text{ mm/s}$ (unit: mm)

$k_I \backslash k_P$	-0.2	0	0.2
0.1	0.0889	0.0889	0.0886
0.2	0.0670	0.0670	0.0643
0.4	0.1389	0.1326	0.1340

从表1和2看出, k_I 值的变化对 x_E 值有显著影响,而 k_P 值在0值附近变化时,其对 x_E 值的影响可以忽略,这与式(12)~(15)一致.尽管式(12)~(15)表明, k_I 的增大有利于 x_E 的减小,但在实际系统中,由于存在未建模的测量噪声和系统动态

特性,这些特性会随着 k_I 的增大而引起系统的不稳定,反而会增大 x_E ,从而制约 k_I 的最大取值.

表3和表4列出了当 $v = 5 \text{ mm/s}$ 和 $v = 10 \text{ mm/s}$ 时, k_P 分别取 $-0.2, 0$ 和 0.2 , k_I 分别取 $0.1, 0.2$ 和 0.4 时得到的轨迹纠偏误差 x_E 的最大绝对值(单位为mm),可以看出 x_E 的最大绝对值是其均方根值的3倍之多.根据统计学的 3σ 原则,这个误差里包含着较大的系统误差因素,初步判断与试验系统的动态特性相关.

表3 当 $v = 5 \text{ mm/s}$ 时 x_E 的最大绝对值(单位: mm)

Tab.3 Maximum absolute value of x_E at $v = 5 \text{ mm/s}$ (unit: mm)

$k_I \backslash k_P$	-0.2	0	0.2
0.1	0.3276	0.3371	0.3747
0.2	0.3701	0.3830	0.3951
0.4	0.4693	0.4820	0.4529

表4 当 $v = 10 \text{ mm/s}$ 时 x_E 的最大绝对值(单位: mm)

Tab.4 Maximum absolute value of x_E at $v = 10 \text{ mm/s}$ (unit: mm)

$k_I \backslash k_P$	-0.2	0	0.2
0.1	0.3270	0.3271	0.3076
0.2	0.3075	0.3076	0.2979
0.4	0.4626	0.5595	0.4432

4 结论 (Conclusion)

本文提出了一种基于雅可比矩阵的机器人轨迹纠偏控制系统模型,说明了其原理.证明了当纠偏控制器为比例-积分或者积分控制器时纠偏误差的最终大小取决于原始轨迹偏差的时间导数而不是其绝对偏差量,当导数为0时纠偏误差收敛到0.最后,试验结果证明了定理1提出的基于雅可比矩阵的积分纠偏控制器的有效性,同时也验证了纠偏误差与轨迹偏差的时间导数正相关的结论.

试验结果表明,在直线焊缝跟踪速度为 5 mm/s 和 10 mm/s 时,选取合适的积分参数,用本文方法都获得了跟踪误差均方根小于 0.07 mm 、最大误差小于 0.4 mm 的满意结果.同已有的方法相比,本文方法的跟踪误差均方根较优.例如,文[12]记载的直线轨迹纠偏误差的标准差(若误差的均值为0,则等同于误差均方根)为 0.5 mm ,其跟踪速度为 2 mm/s ;但其最大跟踪误差没有说明,根据统计学的 3σ 原则,可推算出其最大偏差约为 1.5 mm .文[2]的直线轨迹纠偏误差的最大值为 0.27 mm ,其跟踪速度为 3 mm/s ;但其跟踪误差的均方根没有

说明, 根据统计学的 3σ 原则, 可推算出其跟踪误差均方根约为 0.09 mm.

不同于 Motoman UP6 等国外一些工业机器人只具备位置纠偏功能, 本文提出的机器人轨迹纠偏控制系统模型和方法, 在原理上除了可以实现位置纠偏外, 也可以进行姿态纠偏控制. 接下来会对其他构型机器人, 如类似“FAST 馈源支撑系统”这样的轨迹速度较慢的非典型机器人^[4,9], 进行试验研究, 并在本文提出的机器人轨迹纠偏控制系统模型基础上, 探索积分控制器及其他类型纠偏控制器的有效性.

参考文献 (References)

- [1] Muhammad J, Altun H, Abo-Serie E. Welding seam profiling techniques based on active vision sensing for intelligent robotic welding[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 88(1-4): 127-145.
- [2] Xu Y L, Yu H W, Zhong J Y, et al. Real-time seam tracking control technology during welding robot GTAW process based on passive vision sensor[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(8): 1654-1662.
- [3] Chen X Z, Chen S B. The autonomous detection and guiding of start welding position for arc welding robot[J]. *Industrial Robot*, 2010, 37(1): 70-78.
- [4] 南仁东. 500 m 球反射面射电望远镜 FAST [J]. *中国科学: G 辑*, 2005, 35(5): 449-466.
Nan R D. Five-hundred-meter aperture spherical telescope[J]. *Science in China: Series G*, 2005, 35(5): 449-466.
- [5] 杨平, 徐德, 李原. 基于宏微机器人的焊缝跟踪研究 [J]. *机器人*, 2008, 30(6): 503-507, 515.
Yang P, Xu D, Li Y. Weld seam tracking based on macro-micro robot[J]. *Robot*, 2008, 30(6): 503-507, 515.
- [6] 李海鹏, 邢登鹏, 张正涛, 等. 宏微结合的多机械手微装配机器人系统 [J]. *机器人*, 2015, 37(1): 35-42.
Li H P, Xing D P, Zhang Z T, et al. Micro-assembly robot system with multiple manipulators based on macro-micro motion mechanism[J]. *Robot*, 2015, 37(1): 35-42.
- [7] 高延峰, 张华, 彭俊裴, 等. 轮式移动焊接机器人弯曲焊缝跟踪控制 [J]. *机器人*, 2007, 29(5): 439-442, 450.
Gao Y F, Zhang H, Peng J P, et al. Curved seam tracking control of a wheeled welding mobile robot[J]. *Robot*, 2007, 29(5): 439-442, 450.
- [8] Ren G X, Lu Q H, Hu N, et al. On vibration control with Stewart parallel mechanism[J]. *Mechatronics*, 2004, 14(1): 1-13.
- [9] He F G, Jing F S, Yang G D, et al. Implementation and experimental study on the control system of the Stewart platform model of FAST[C]//25th Chinese Control and Decision Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 2851-2855.
- [10] Shen H Y, Lin T, Chen S B, et al. Real-time seam tracking technology of welding robot with visual sensing[J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2010, 59(3-4): 283-298.
- [11] Xu D, Tan M, Zhao X G, et al. Seam tracking and visual control for robotic arc welding based on structured light stereovision[J]. *International Journal of Automation and Computing*, 2004, 1(1): 63-75.
- [12] Manorathna R P, Phairatt P, Ogun P, et al. Feature extraction and tracking of a weld joint for adaptive robotic welding[C]//13th International Conference on Control, Automation, Robotics & Vision. Piscataway, USA: IEEE, 2014: 1368-1372.
- [13] Murray R M, Li Z X, Sastry S S. A mathematical introduction to robotic manipulation[M]. Boca Raton, USA: CRC Press, 1994.

作者简介:

- 景奉水 (1969-), 男, 博士, 研究员. 研究领域: 机器人, 机器人视觉, 智能控制.
- 杨超 (1989-), 男, 硕士生. 研究领域: 机器人视觉, 机器人控制.
- 杨国栋 (1984-), 男, 博士, 副研究员. 研究领域: 机器人控制, 机器人视觉, 智能控制.