

文章编号: 1001-0920(2006)04-0405-05

曲线焊缝跟踪的视觉伺服协调控制

王麟琨, 徐 德, 李 原, 谭 民
(中国科学院 自动化研究所, 北京 100080)

摘 要: 为实现工业机器人自动跟踪曲线焊缝, 提出了协调焊枪运动和视觉跟踪的视觉伺服控制方法, 建立了特征点的数学模型, 并在此基础上确定机器人运动的旋转轴, 设计了一种双层结构的模糊视觉伺服控制器, 通过动态确定控制量有效范围来保证图像特征存在于视场中, 为准确确定有效范围, 设计了带模型动态补偿的 Kalman 滤波器, 曲线焊缝的自动跟踪实验验证了所提方法的有效性。

关键词: 焊接机器人; 结构光视觉; 曲线焊缝跟踪; 视觉伺服控制

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Harmonious Visual Servoing Control for Tracking Weld Seams Shaped Curve

WANG Lin-kun, XU De, LI Yuan, TAN Min

(Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China. Correspondent: WANG Lin-kun, E-mail: wanglinkunr@163.com)

Abstract: A visual servoing control method which harmonizes the torch motion with visual tracking is proposed for robot tracking weld seams shaped curve. Firstly, a mathematical model for feature points is established, and then rotation axis is computed. A fuzzy visual servoing controller with two-layers structure is designed to keep image features among vision field by computing valid range of control outputs. In order to get precise valid range of control output, a state estimator based on Kalman filter with dynamic model compensation is designed. The proposed method is verified by tracking experiments.

Key words: Welding robot; Structured light vision; Tracking weld seams shaped curve; Visual servoing control

1 引 言

焊接是工业机器人最主要的应用领域之一, 其工作方式以示教为主, 效率低、缺乏灵活性, 且不适用复杂工件^[1]。焊缝自动跟踪可以提高焊接机器人的智能程度, 由于视觉传感器具有获取信息量大, 非接触测量等优点, 近年来, 基于视觉传感器的焊缝跟踪获得了比较广泛的应用, 并已取得令人满意的跟踪精度^[2]。对于曲线焊缝, 采用传统的基于示教的方法进行跟踪困难较大, 所以研究曲线焊缝的视觉跟踪在实际生产中具有重要意义。针对曲线焊缝的视觉跟踪也开展了很多的研究, 并取得了一些研究

成果^[3~5]。对于六自由度机器人跟踪曲线焊缝, 需要完成两个任务, 一是要保证焊枪以高的精度跟踪焊缝, 二是要保证跟踪过程中获得连续、稳定的视觉信息, 即保证图像特征始终存在于摄像机视场内。当前针对曲线焊缝视觉跟踪的研究, 是在假设可以得到稳定的视觉信息前提下, 对如何保证图像特征始终存在于摄像机的有效视场中和如何协调两个任务考虑较少。

本文通过协调焊枪运动与图像特征运动, 动态确定控制量有效范围来实现具有较强鲁棒性的曲线焊缝视觉跟踪。首先建立图像特征与机器人运动的数学模型, 并在此基础上确定旋转轴, 然后设计了双

收稿日期: 2005-03-15; 修回日期: 2005-09-02

基金项目: 国家 863 计划基金项目(2002AA 422160); 国家 973 计划基金项目(2002CB 312200)。

作者简介: 王麟琨(1974—), 男, 黑龙江鹤岗人, 博士生, 从事机器人视觉控制的研究; 谭民(1962—), 男, 广东新会人, 研究员, 博士生导师, 从事系统可靠性理论及其应用、故障诊断与容错技术等研究。

层结构的模糊视觉伺服控制器, 在建立数学模型基础上, 设计了带有模型动态补偿的 Kalman 滤波器, 对图像特征点进行准确预测, 并动态确定控制量有效范围. 最后通过跟踪实验验证了方法的有效性.

2 机器人运动与特征点坐标变化的数学分析

2.1 特征点相对于机器人运动的数学模型

根据结构光三维测量的原理, 特征点可以看作基于工具坐标系下的结构光平面与曲线焊缝交点的三维坐标. 实际上焊线为一空间曲线, 为了简化模型, 可在局部采用直线近似, 直线的斜率为空间曲线的切线.

设 $X_k = (x_k, y_k, z_k)^T$ 为特征点在工具坐标系下的坐标, 直线方程为

$$(x - x_0)/m = (y - y_0)/n = (z - z_0)/k,$$

令 $L_k = (m, n, k)^T$, $P_k = (p_x, p_y, p_z)$ 为空间直线上某点的坐标. 结构光的平面方程为 $ax + by + cz = 1$, 令 $N = (a, b, c)^T$, 则特征点坐标可以表示为

$$X_k = (N^T L_k)^{-1} (1 - N^T P_k) L_k + P_k \quad (1)$$

相对于工具坐标系进行平移 T_k 和旋转 R_k 操作后, 得到新的状态变量为

$$X_{k+1} = (N^T (R_k L_k))^{-1} (1 - N^T (R_k P_k) + N^T T_k) R_k L_k + R_k P_k + T_k \quad (2)$$

其中: $Torch = [Torch_x \ Torch_y \ Torch_z]^T$ 为焊枪末端点在坐标系下的坐标,

$$\Delta Torch = [\Delta Torch_x \ \Delta Torch_y \ \Delta Torch_z]$$

为焊枪末端点在当前工具坐标系下的相对运动, I 为单位矩阵

$$c_k = (N^T L_k)^{-1} (1 - N^T P_k), \quad (3)$$

$$c_{k+1} = (N^T (R_k^{-1} L_k))^{-1} (1 - N^T (R_k^{-1} P_k) + N^T R_k^{-1} T_k). \quad (4)$$

整理可得

$$X_{k+1} = R_k^{-1} X_k + B_k U_k, \quad (5)$$

$$Y_{k+1} = X_{k+1}. \quad (6)$$

其中

$$B = R_k^{-1}, U_k = (c_{k+1} - c_k) L_k - T_k$$

2.2 确定旋转轴

图 1 所示为曲线焊缝跟踪示意图, 理想的曲线焊缝跟踪应为焊枪向前运动 $\Delta Torch$, 通过结构光视觉得到的图像特征点也相应地在焊缝方向上运动 $\Delta Feature$. 焊枪和摄像机的位置相对于机器人末端是固定的, 需分析如何确定机器人的运动来满足跟踪要求.

根据旋量理论^[6], 任何旋转运动都可等价于绕空间某一个旋转轴旋转一定的角度, 如果旋转轴可

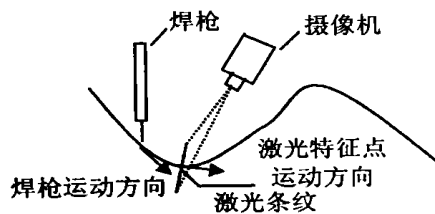


图 1 曲线焊缝跟踪示意图

以得到, 则求解机器人旋转运动控制量等价于如何确定旋转角度.

设 $P = (p_x, p_y, p_z)$ 为结构光平面上某点的坐标, 结构光的平面方程为

$$a(x - p_x) + b(y - p_y) + c(z - p_z) = 0 \quad (7)$$

令 $N = (a, b, c)^T$, 则在当前工具坐标系下结构光平面方程可表示为

$$N^T (X_k - P) = 0 \quad (8)$$

其中 X_k 为特征点在工具坐标系下的坐标. 如果相对于当前末端坐标系运动 R_k 和 T_k , 得到新的特征点 X_{k+1} , 在已知旋转运动的前提下, 可通过平移运动来保证焊枪的运动位置. 平移运动与旋转运动的关系为

$$(I - R) Torch + \Delta Torch = T. \quad (9)$$

将式(9)代入式(8), 可得

$$(R_k N)^T (X_{k+1} - R_k P -$$

$$(I - R_k) Torch - \Delta Torch) = 0 \quad (10)$$

令 $X_{k+1} = X_k + \Delta Feature$, 将式(8)代入式(10)可得

$$N^T (R_k^{-1} X_k + R_k^{-1} \Delta Feature - X_k + (I - R_k^{-1}) Torch - R_k^{-1} \Delta Torch) = 0 \quad (11)$$

其中 N 为常数向量. 若使上式成立, 则有

$$(X_k - Torch + \Delta Feature) - R_k (X_k - Torch + \Delta Torch) = 0 \quad (12)$$

设 $F = X_k - Torch$, 则有

$$F + \Delta Feature - \Delta Torch = R_k F. \quad (13)$$

旋转矩阵为正交矩阵不改变向量的模长, 则运动量满足如下的约束:

$$F = F + \Delta Feature - \Delta Torch.$$

根据旋量理论^[6], 任意一个旋转矩阵 R 可表示为

$$R = e^{\hat{\omega}\theta} = I + \hat{\omega} \sin \theta + \hat{\omega}^2 (1 - \cos \theta), \quad (14)$$

$$\omega = (F) \otimes (F + \Delta Feature - \Delta Torch).$$

其中: ω 为旋转轴, θ 为旋转角度, $\omega = [a_1 \ a_2 \ a_3]^T$, \otimes 为叉乘算子.

3 模糊视觉伺服控制器的设计

对于如图 1 所示的曲线焊缝视觉跟踪, 需协调焊枪运动和视觉跟踪. 采用的策略是: 将机器人的运动分解为旋转运动和平移运动, 通过旋转运动实现

视觉跟踪的连续, 平移运动保证焊枪的运动位置, 设计双层结构模糊视觉伺服控制器协调两个任务. 由于跟踪过程难以建立一个有效的数学模型, 故采用模糊控制策略来实现以上控制目标. 为了动态确定控制量有效范围, 设计带有模型不确定补偿的 Kalman 滤波器对状态进行准确预测, 并在此基础上准确计算控制量有效范围.

图 2 为视觉伺服控制器的控制图, 整个视觉伺服控制器主要由分层模糊控制器、状态估计器和末端运动量计算 3 个部分组成. 分层模糊控制器结合状态估计器, 根据当前图像特征的位置计算一个合适的旋转角度. 末端运动量计算首先计算旋转轴, 然后根据旋转角度确定旋转矩阵和平移量.

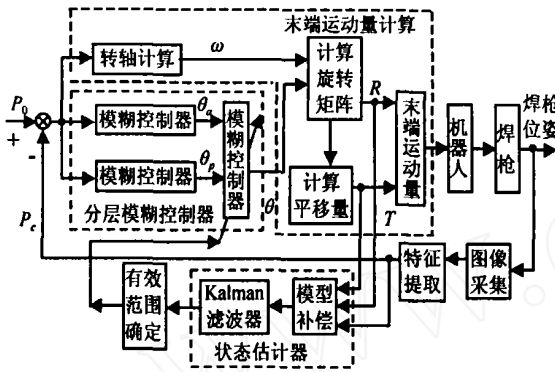


图 2 视觉伺服控制器框图

3.1 模糊控制器的基本结构

在曲线焊缝视觉跟踪过程中, 控制的目的是将特征点的像素坐标控制在以理想像素坐标为中心的一个矩形区域内, 其次要保证激光条纹与焊缝成一个合适的角度以得到比较理想的图像, 同时要兼顾跟踪过程中运动的平滑. 模糊控制器控制机器人在两个目标间进行协调. 由于上面两个目标具有相对的独立性, 采用一种分层模糊控制结构. 下层结构根据每个目标计算控制量的模糊输出, 上层结构负责协调两个目标, 得出合适的控制量. 下层结构由两部分组成: 调节像素位置的规则集 R_p 和调节激光条纹与焊缝夹角的规则集 R_a . 特征点理想的像素坐标为 P_0 , 当前特征点的像素坐标为 P_c , 取当前特征点相对于理想坐标的偏差 e 及偏差变化 Δe 作为 R_p 规则集的输入, 机器人旋转角度 θ 作为输出. 激光条纹与焊缝所成夹角 α 作为规则集 R_a 的输入, 机器人旋转角度 θ 作为输出. 其中 e 模糊集中采用 5 个模糊化量级, Δe 模糊集中采用 3 个模糊化量级, α 模糊集中采用 5 个模糊化量级, θ 和 θ 在输出模糊集中采用 5 个模糊化量级. 所有输入输出语言变量的隶属度函数均定义在 $[-1, 1]$ 区间内. 输入的模糊归一化等级分别设定为 $\{e\} = \{-1, -0.7, 0,$

$0.7, 1\}$, $\{\theta\} = \{-1, 0, 1\}$. 上层结构的规则集 R_i 的输入量为 θ 和 θ , 输出量为 θ . θ 与 θ 和 θ 具有相同的模糊化量级和模糊归一化等级, 即

$$\{\theta, \theta, \theta\} = \{-1, -0.5, 0, 0.5, 1\}.$$

模糊控制器使用的控制规则包括: 调节像素位置的规则集 R_p , 上层结构的规则集 R_i , 具体模糊规则略. 输入偏差 e 和 Δe 的隶属函数采用三角形隶属度函数, 输入角度 α 的隶属函数采用梯形隶属度函数, 采用最大隶属度法解模糊. 输入偏差 e 的论域为 $[-|P_{max} - P_0|, |P_{max} - P_0|]$, P_{max} 由计算得到. 输入偏差变化 Δe 的论域 $[E_{max}, E_{min}]$ 和角度 α 的论域 $[\alpha_{min}, \alpha_{max}]$ 可以通过实验设定, 输出角度 θ 的论域在跟踪过程中动态确定.

3.2 动态确定模糊控制器控制量有效范围

3.2.1 状态估计器的设计

对于准确线性模型, 采用 Kalman 滤波器进行状态预测, 一般可以得到满意的结果. 但如果所建立的模型存在偏差, 需要进行处理以减弱模型不确定的不利影响^[7,8]. 在视觉伺服控制系统中, 存在摄像机和激光平面的标定误差、曲线拟合所带来的偏差和不可避免的图像噪声、图像处理的误差等. 这些误差和噪声的存在会产生模型偏差. 对式(5), 式(6)进行分析可知, 主要的模型不确定性来自 U_k . 通过曲线拟合所产生的 $\Delta Torch$ 和 L_k 必然存在误差, 这将给状态模型带来时变的不确定性. 基于上面的分析, 设计了对模型不确定性进行补偿的状态估计器. 先对时变的模型不确定进行估计, 将估计补偿到模型中, 然后采用 Kalman 滤波器进行准确的状态预测. 设 $M u_k$ 为模型不确定值, 可以得到如下表达式:

$$\hat{M u}_k = X_{k+1} - \hat{R}_k^{-1} \hat{X}_k - B_k \hat{U}_k \quad (15)$$

设 $U_k = \Delta Torch_k + t_k L_k$, $t_k = c_{k+1} - c_k$, 则有

$$\hat{M u}_k = B_k (U_k - \hat{U}_k) = B_k (\Delta Torch_k - \Delta Torch_k + t_k L_k - \hat{t}_k L_k). \quad (16)$$

其中 $\Delta Torch_k$ 和 L_k 为通过曲线拟合获得的方向向量. 由式(3), 式(4)可知拟合的误差对 c_{k+1}, c_k 有影响, 鉴于 $Torch, P_k, N$ 的值比较准确, 以及

$$1 - N^T (\hat{R}_k^{-1} P_k) + N^T ((R^{-1} - I) Torch) \gg N^T \hat{R}_k^{-1} \Delta Torch,$$

由于 N^T 为常数向量, 可以认为拟合误差对 c_{k+1}, c_k 的分母项 $N^T (\hat{R}_k^{-1} L_k)$ 和 $N^T L_k$ 产生影响. 在实验过程中 t_k 的波动最为剧烈, 对模型的影响最大, 可以做出如下假设: 模型的不确定由 t_k 的波动造成, 将其他对模型不确定的影响因素和状态噪声统一归为均值为零的高斯噪声. 式(16)简化为

$$\hat{M u}_k = B_k (t_k L_k - \hat{t}_k L_k). \quad (17)$$

得到如下递推公式:

$$M u_{k+1} = B_{k+1} B_k^{-1} M u_k + B_{k+1} (\hat{t}_{k+1} \hat{L}_{k+1} - \hat{t}_k \hat{L}_k) - B_{k+1} (\hat{t}_{k+1} \hat{L}_{k+1} - \hat{t}_k \hat{L}_k). \quad (18)$$

由于理想的 t_k, L_k 为慢时变参数, 可以将上式化简为

$$M u_{k+1} - \tilde{M} u_{k+1} = B_{k+1} B_k^{-1} M u_k - B_{k+1} (\hat{t}_{k+1} \hat{L}_{k+1} - \hat{t}_k \hat{L}_k). \quad (19)$$

对模型不确定进行补偿后, 采用 Kalman 滤波进行状态预测, 则有

$$\hat{X}_{k+1|k} = R_k \hat{X}_{k|k} + B_k U_k + \tilde{M} u_k, \quad (20)$$

其他 Kalman 滤波器的递推公式见文献[9]

3.2.2 动态确定控制量有效范围

根据当前的运动状态以及图像信息, 在数学模型的基础上求出机器人下一时刻可行的运动范围, 以保证视觉跟踪的鲁棒性. 在求解控制量范围时, 需要对求解公式进行合理的化简, 求出显式解.

在 2.2 节中已经确定了旋转轴, 因此输出控制量有效范围的确定归结为旋转角度的求取. 设 DP_{k+1} 为总的噪声补偿值, 包含模型补偿值和 Kalman 观测补偿.

$$DP_{k+1} = M u_{k+1} + K_{k+1} (Y_k - \hat{X}_{k|k}). \quad (21)$$

设 P^* 为理想像素坐标, ϵ 为矩形边长, T_R, T_t 为变换矩阵, $T_R X_k + T_t = P_k$, 其中 P_k 为对应 X_k 的像素坐标, 并将式(9) 带入式(5), 其中 $\tilde{X}_{k+1} = X_{k+1} + Torch$, 则有如下不等式成立:

$$T_R (R_k^{-1} \tilde{X}_k - R_k^{-1} \Delta Torch + (c_{k+1} - c_k) R_k^{-1} L_k - DP_{k+1}) - T_R Torch + T_t - P^* < \frac{\epsilon}{2}. \quad (22)$$

令 $m = [\epsilon/2 \quad \epsilon/2]^T$, 则有

$$-m + T_R Torch + P^* - T_t + T_R DP_{k+1} < T_R R_k^{-1} (\tilde{X}_k - \Delta Torch + (c_{k+1} - c_k) L_k) < m + T_R Torch + P^* - T_t + T_R DP_{k+1}. \quad (23)$$

将式(14) 带入式(19), 可得

$$\begin{aligned} & [1 - N^T P_k + N^T \Delta Torch + 2 \sin \frac{\theta}{2} N^T (-\hat{\omega} \cos \frac{\theta}{2} + \hat{\omega} \sin \frac{\theta}{2}) (P_k - Torch - \Delta Torch)]^T / [N^T L_k + 2 \sin \frac{\theta}{2} N^T (-\hat{\omega} \cos \frac{\theta}{2} + \hat{\omega} \sin \frac{\theta}{2} L_k)] - (1 - N^T P_k) / N^T L_k = c_{k+1} - c_k \end{aligned} \quad (24)$$

因为

$$P_k - Torch - \Delta Torch \gg L_k \gg |1 - N^T P_k + N^T \Delta Torch| \gg |N^T L_k|$$

和 $c_{k+1} - c_k$ 是旋转角度 θ 的慢时变单调函数, 所以用

$$c_{k+1} - c_k = (c_{k+1} - c_k) \theta \approx C_k$$

近似逼近真实值

设 $u_k = C_k L_k - \Delta Torch$, 其中 ω 为单位向量, 则有 $\hat{\omega}^2 (1 - \cos \theta) - \hat{\omega} \sin \theta$ 近似为 $\hat{\omega} \sin \theta$, 可得

$$\hat{\omega}^* = \begin{bmatrix} - (a_3^2 + a_2^2) & a_3 & - a_2 \\ - a_3 & - (a_1^2 + a_3^2) & a_1 \\ a_2 & - a_1 & - (a_1^2 + a_2^2) \end{bmatrix}.$$

设

$$\begin{aligned} & T_R Torch + P^* - T_t + T_R DP_{k+1} + T_R (\tilde{X}_k + u_k) = q_k, \\ & T_R \hat{\omega}^* (\tilde{X}_k + u_k) = q_0 k, \end{aligned}$$

鉴于在跟踪过程中像素坐标 y 轴分量变化很小, 则可得 θ 的一个可行的取值范围为

$$\begin{aligned} & (-m + q_k)_1 / (q_0 k)_1 < \\ & \sin \theta < (m + q_k)_1 / (q_0 k)_1. \end{aligned}$$

4 实验与结果

实验系统由上位计算机、机器人本地控制器、Yaskawa UP6 机器人本体、摄像机、激光器、电焊机、送丝机、焊枪、CO₂ 气瓶等构成. 由上位计算机进行图像特征提取, 由机器人本地控制器控制机器人运动. 摄像机、激光伺服控制器和焊枪均安装于机器人的末端, 激光束在焊缝上形成的条纹在焊点前方, 距离焊枪尖约 25 mm. 采集的图像幅度为 768 × 576 像素. 实验中所用的数据都是在实际焊缝跟踪中采集得到的. 实验结果表明, 采用所提方法机器人可以较好地在线实时测量并跟踪焊缝.

图 3 和图 4 验证了带有模型不确定补偿的状态预测方法的有效性. 图 3 为直接根据数学模型计算出的坐标值与实际观测值之间的偏差. 图 4 为带有噪声观测器的采用 Kalman 滤波器得到的状态估计值与实际观测值之间的偏差. 由图 3 可以看出直接采用模型计算方法得到的状态与测量值差距很大. 对图 3 和图 4 进行对比可以发现, 采用模型动态补偿

的状态预测比直接采用模型计算进行状态估计的估计误差波动幅值明显减少.

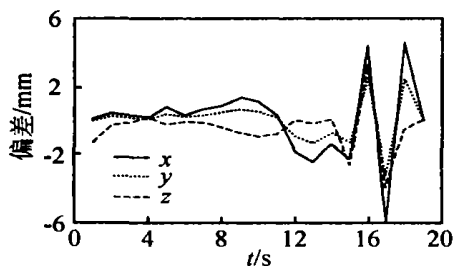


图 3 采用模型计算值与实际测量值的偏差

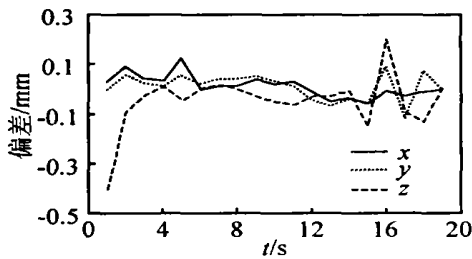


图 4 带有模型补偿的 Kalman 状态估计值与实际观测值之间的偏差

图 5 为跟踪过程中动态确定的旋转角度有效范围。设置的像素坐标变化的有效范围为 x 轴 [200, 568], y 轴 [200, 476]。求出的有效旋转角度的上下限与实际量测值的最大差值相比小 0.6° 。通过下述方法进行实际量测: 记录当前机器人的绝对位置, 试探一个角度, 计算机器人的运动量并下发量测运动后的像素位置是否达到设定范围的边缘, 如果没有达到或超出, 返回原位置重新试探。图 6 为图像特征的像素坐标变化情况。图中 y 轴像素坐标变化很小, 这是由于通过选择合适的旋转轴使得特征点的深度信息变化很小。图中 x 轴像素坐标的变化体现了控制策略, 当像素坐标靠近安全范围的中心时, 增加旋转的角度; 当接近安全范围的边界时, 平移运动或适当反向旋转, 将像素坐标控制在一个安全范围内。

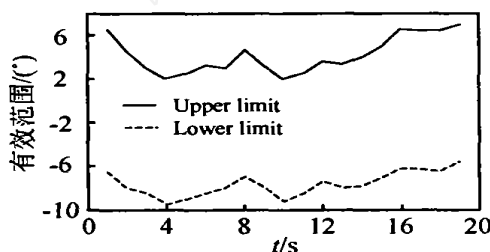


图 5 动态确定的旋转角度有效范围

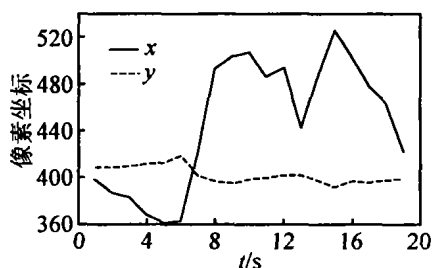


图 6 跟踪过程中的像素变化

5 结 论

本文提出了协调焊枪运动和视觉跟踪的视觉伺服控制方法, 以实现跟踪曲线焊缝。实验和仿真验证了方法的有效性, 可以得到如下结论:

- 1) 视觉伺服协调控制可将视觉跟踪和焊枪的调整结合起来, 有效跟踪曲线焊缝;
- 2) 在预测特征点坐标过程中采用模型补偿结合 Kalman 滤波器可以取得比较好的预测效果;
- 3) 模糊控制器的控制变量论域的动态确定可以起到提高视觉伺服鲁棒性的作用。

尽管本文方法已经基本实现了曲线焊缝的自动视觉跟踪, 但仍存在一些问题, 例如图像处理的抗干扰能力等, 需要在实际的应用中加以解决。

参考文献 (References)

- [1] Bolmsjö G, Olsson M, Cederberg P. Robotic Arc Welding-trends and Developments for Higher Autonomy[J]. *Industrial Robot*, 2002, 29(2): 98-104.
- [2] Wilson M. The Role of Seam Tracking in Robotic Welding and Bonding[J]. *Industrial Robot*, 2002, 29(2): 132-137.
- [3] 王伟, 邹奇仕, 朱六妹, 等. 视觉传感焊缝跟踪技术的发展状况及实施方案探讨[J]. *电焊机*, 2002, 32(5): 1-8. (Wang W, Zou Q S, Zhu L M, et al. The Development State and Implementing Method of Seam Tracking Systems with Optical Sensor [J]. *Electric Welding Machine*, 2002, 32(5): 1-8.)
- [4] 席文明, 郑梅生, 颜景平. 视觉引导下的机器人跟踪复杂焊缝的研究[J]. *东南大学学报*, 2000, 3(2): 79-83. (Xi W M, Zheng M S, Yan J P. Industrial Robot Tracking Complex Seam by Vision [J]. *J of Southeast University*, 2000, 3(2): 79-83.)
- [5] Yu J Y, Na S J. Study on Vision Sensors for Seam Tracking of Height-varying Weldment Part I: Mathematical Model[J]. *Mechatronics*, 1997, 7(7): 599-612.
- [6] Richard M, Li Z X, Shankar S. *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation* [M]. New York: CRC Press, 1994: 15-25.
- [7] Lee S H, Kim Y H, Baek S E. Discrete-time Robust Tracking Control Using a State Space Disturbance Observer [A]. *Proc of the 2000 American Control Conf* [C]. Chicago: IEEE Press, 2000: 4194-4198.
- [8] Kwon S J, Wan K C. A Discrete-time Design and Analysis of Perturbation Observer [A]. *Proc of the 2002 American Control Conf* [C]. Anchorage: IEEE Press, 2002: 2693-2698.
- [9] Kalman R E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems [J]. *Trans of the ASME - J of Basic Engineering*, 1960, 28: 35-45.