

## 基于宏微机器人的焊缝跟踪研究

杨平<sup>1,2</sup>, 徐德<sup>1</sup>, 李原<sup>1</sup>

(1. 中国科学院自动化研究所复杂系统与智能科学实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 提出了一种基于宏微运动机器人的焊缝跟踪方法. 首先, 通过若干点的简单示教获得焊缝位置信息, 并通过拟合建立焊缝模型. 在该模型的基础上, 对机器人的宏动进行运动规划. 采用激光结构光视觉测量焊缝坐标, 并根据焊缝图像偏差控制机器人的微动. 结合机器人的宏动规划运动和微动自动调整, 实现大范围、高精度的焊缝跟踪. 利用宏微运动平台进行了焊缝跟踪实验, 实验结果验证了所提出方法的有效性.

**关键词:** 焊缝建模; 焊缝跟踪; 宏微运动; 运动规划; 协调运动; 机器人

**中图分类号:** TP24

**文献标识码:** B

## Weld Seam Tracking Based on Macro-Micro Robot

YANG Ping<sup>1,2</sup>, XU De<sup>1</sup>, LI Yuan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Complex Systems and Intelligent Science, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A new method based on macro-micro robot for weld seam tracking is presented. The positions of several teaching points on the weld seam are obtained via a simple teaching method, and the welding seam model is set up via fitting. Then the macro motion of the robot is planned according to the model. The coordinate of the weld seam is measured with a laser structured-light vision sensor, and the image error of the weld seam is employed to control the micro motion of the robot. With the combination of the planning macro motion and the adjusting micro motion, the welding seam tracking with high accuracy in large working range can be realized. A series of experiments are conducted with a macro-micro motion platform, and the experimental results demonstrate the validity of the proposed method.

**Keywords:** weld seam modelling; weld seam tracking; macro-micro motion; motion planning; coordinated movement; robot

### 1 前言 (Introduction)

在大型智能焊接设备中, 焊缝的准确、快速跟踪是实现焊接机器人自动化、智能化的关键<sup>[1,2]</sup>. 当前, 大部分焊接机器人属于示教型, 往往需要在焊接前对焊接工件进行精确定位. 通常, 大型焊接工件具有质量大、体积大的特点, 对其精确定位需要耗费大量的人力物力. 焊接机器人常用的示教和单一驱动策略, 难以实现大型工件的大范围、高精度焊缝跟踪. 因此, 针对大型工件焊缝跟踪的大范围、高精度特点, 进一步研究焊接机器人的运动与控制方法具有重要意义.

宏微运动机器人的概念是在 20 世纪 80 年代中期提出的, 其研究一直备受关注. 按照 Khatib<sup>[3]</sup> 提出的观点, 宏微运动机器人是指在一个大的机械手

末端串联一个小的机械手. 大的机械手称为宏机械手 (macro manipulator); 小的机械手拥有更多的自由度, 称为微机械手 (micro manipulator). 一般情况下, 通过宏机械手实现机器人的大范围运动, 通过微机械手实现机器人的高速、高精度的运动. 宏机械手、微机械手构成宏微机器人系统, 协同完成机器人高性能的作业. 宏微运动机器人具有冗余的自由度, 能够降低系统有效惯量, 扩展系统频带, 实现高速高精度的轨迹跟踪<sup>[3~7]</sup>.

本文提出的基于宏微运动的焊缝跟踪方法利用简单粗略示教, 结合宏动规划运动和微动调节运动完成焊缝的大范围、高精度跟踪. 与简单地采用十字滑块进行焊缝跟踪的方法相比, 宏微运动的跟踪方法中机器人具有更多的自由度, 能够实现较复杂

的控制算法，可以解决移动范围和跟踪精度之间的矛盾。该方法利用宏动规划运动可扩大工作范围，利用微动调节运动可实现高精度跟踪，从而在扩大机器人的工作范围的同时提高焊缝跟踪的精度。该方法利用宏微运动机器人的协调运动，不需要对工件进行精确的定位，就能够完成大范围、高精度的焊缝跟踪任务，从而大大降低工件定位成本、提高生产效率。

## 2 宏微运动实验平台 (Macro-micro motion experiment platform)

宏微运动实验平台由运动平台执行机构、视觉传感器、控制柜、控制计算机等构成，其示意图如图 1(a) 所示。其中，执行机构由宏动和微动两组运动单元构成，每组运动单元由正交安装的两个直线运动轴组成。微动单元安装于宏动单元上，随宏动单元一起运动。在微动单元的末端，安装焊枪和结构光视觉传感器。利用结构光视觉传感器构成微动单元的位置闭环。宏动单元完成整个机器人末端的大范围移动，而微动单元实现焊枪位姿的高精度调节。宏动单元两个轴的行程均为 600 mm，微动单元两个轴的行程均为 200 mm，4 个轴均采用交流

伺服电机驱动。微动单元的末端安装焊枪和视觉传感器，如图 1(b) 所示。视觉系统由激光器、摄像头、图像采集卡等组成。激光器安装在摄像机前方，打出的激光条纹投射到焊缝表面，反射的光线进入摄像机成像。通过摄像机的标定技术，可以利用焊缝图像得出焊缝的位置信息。激光器和摄像头的相对位置固定，随着微动单元末端一起移动，构成 Eye-In-Hand (EIH) 视觉系统。

宏微运动实验平台的控制结构如图 2 所示。图中，主控制器根据给定的控制目标（焊缝跟踪误差、焊缝图像坐标等）与视觉反馈形成的误差，分别对宏动轴和微动轴输出不同的目标控制量。焊接前，宏动轴实现示教功能，完成焊缝的建模。在焊缝跟踪时，宏动轴完成规划运动，微动轴实现跟踪的自动调节。

## 3 焊缝建模 (Weld seam modelling)

首先，利用宏动单元的大范围移动实现焊缝的位置信息采集，并将位置信息转化到焊接机器人的笛卡儿空间，作为焊缝建模的数据输入。对焊缝使用多项式或 B 样条拟合建模，作为焊缝跟踪时宏动单元路径规划的依据。

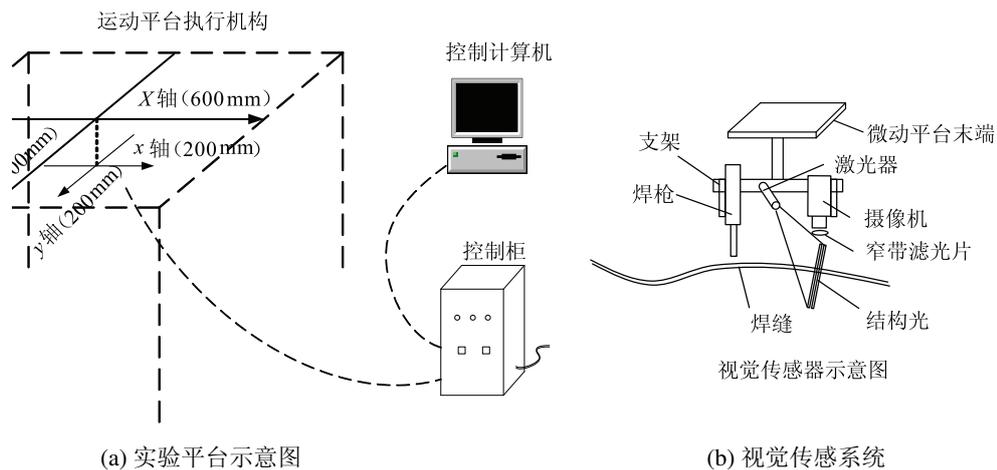


图 1 宏微运动平台

Fig.1 Macro-micro motion experiment platform

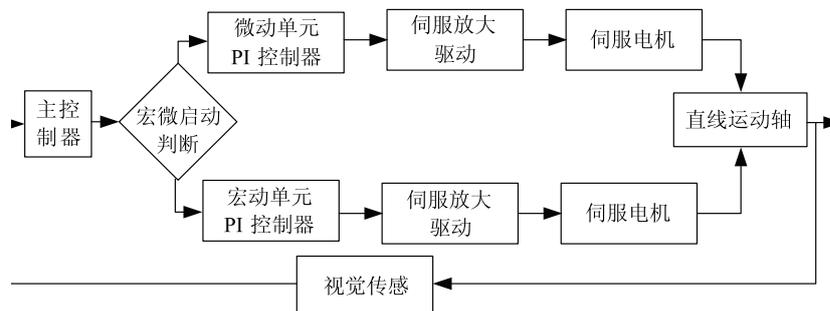


图 2 宏微运动实验平台控制结构图

Fig.2 Control structure of the macro-micro motion experiment platform

焊缝建模分为获取焊缝位置信息和建立模型两个阶段。其中，获取焊缝位置信息主要包括采集图像、提取特征点和坐标系转换等过程。在图像采集过程中，保持微动单元相对于宏动单元静止，使宏动单元做大范围移动，进行特征点示教。示教过程中，需要保证摄像机能够采集到有效的数据点。如果焊缝为直线型，采集的位置特征点数可以较少；如果焊缝为复杂曲线型，需要在某些关键点采集较多的数据点，以便建立准确的焊缝模型。

在激光结构光视觉系统中，摄像机采集激光器投射到焊缝表面的纵向条纹。利用图像处理算法得到焊缝特征点图像坐标<sup>[8~11]</sup>，然后转换为机器人的末端笛卡儿空间坐标<sup>[12]</sup>。可以证明<sup>[12]</sup>：对于二维平面焊缝，在保持激光器与摄像机的相对位姿不变、摄像机与焊缝平面的距离不变时，摄像机采集的结构光条纹的图像纵坐标不变。假设焊缝特征点的图像坐标为 $(u, v)$ ，采集图像特征点时宏动机构的坐标为 $(X_1, Y_1)$ ，微动机构相对于宏动机构的坐标为 $(X_2, Y_2)$ ，则焊缝特征点在宏动单元末端的二维笛卡儿坐标为：

$$\begin{cases} x = X_1 + X_2 + \frac{u - u_0}{m} \\ y = Y_1 + Y_2 + \frac{v - v_0}{n} \end{cases} \quad (1)$$

其中， $(u_0, v_0)$ 为定义的图像特征点初始中心坐标； $(m, n)$ 为图像坐标两相邻像素间隔对应的笛卡儿空间坐标间距，其值通过实验方法确定； $(x, y)$ 为焊缝特征点在宏动单元末端的笛卡儿坐标。

焊缝建模的数学表达式根据焊缝类型选择。对于简单的直线或者折线焊缝，直接使用一次多项式并采用最小二乘法拟合即可；对于复杂的曲线，通常使用三次 B 样条拟合方法<sup>[13,14]</sup>。

#### 4 焊缝跟踪 (Weld seam tracking)

本文采用以宏动为主、微动为辅的宏微运动控制策略进行焊缝跟踪，即宏动单元按照规划的运动量和运动速度移动，微动单元根据视觉系统的实时位置信息自动调节，保证跟踪精度。当微动单元偏离中位较远时，控制宏微单元进行协调运动，使微动单元回到中位。焊缝跟踪包括宏动规划、微动自动调整、协调运动三个方面。

##### 4.1 宏动规划

在笛卡儿空间对宏动单元的末端位姿进行运动规划，同时对宏动单元的关节空间进行规划。运动规划的内容包括运动轨迹选择和运动位置插值<sup>[14]</sup>。将焊缝模型作为宏动单元末端位姿的轨迹曲线，经

过规划得到的位置点用于宏动单元的关节控制。宏微运动实验平台的宏动规划数学表达式如下：

$$\begin{cases} X_1 = x \\ Y_1 = y = f(x) \end{cases} \quad (2)$$

其中， $X_1$ 为宏动轴横坐标， $Y_1$ 为宏动轴纵坐标， $y = f(x)$ 为焊缝模型表达式。

##### 4.2 微动自动调整

微动单元安装在宏动单元的末端。在焊缝跟踪初始位置，微动单元处于焊缝中心位置附近。利用微动单元响应速度快、移动范围相对较小的特点，对其设计闭环控制律。在宏微运动实验平台上，对微动部分采用基于图像的位置控制方法，其控制器使用 PID 算法。像素偏差可表征当前跟踪曲线与建模曲线偏差，所以以像素偏差作为 PID 控制器的输入。PID 控制器的输出为微动单元的调整量。微动单元的控制框图如图 3 所示。

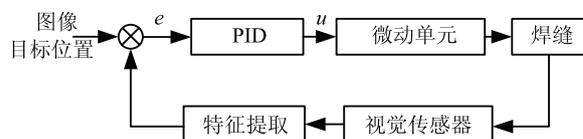


图 3 微动机器人控制框图

Fig.3 Framework of the micro robot control system

##### 4.3 协调运动

宏动单元的规划运动和微动单元的自动调整是分别进行的，可进行解耦控制，控制律容易实现。但是当焊件固定精度较低、偏离正常位置较大时，或者宏动单元运动受到约束时，焊缝跟踪过程中微动单元有可能偏离中位较远，超出微动单元的自动调整范围。此时，应该进行宏动单元和微动单元的协调运动，在保证焊接单元末端焊缝跟踪的连续性和平稳性的前提下，使微动单元回到中位。

对宏动单元实施矫正运动控制，其控制输出增量为：

$$\begin{cases} X'_1 = X_1 + \frac{D_x}{N}, & D_x > \sigma_x \\ Y'_1 = Y_1 + \frac{D_y}{N}, & D_y > \sigma_y \end{cases} \quad (3)$$

其中， $X_1, Y_1$ 为宏动单元的原规划输出量， $D_x, D_y$ 为微动单元偏离中位的距离， $\sigma_x, \sigma_y$ 为控制阈值， $N$ 为协调运动的总调整次数， $X'_1, Y'_1$ 为宏动单元控制输出增量。

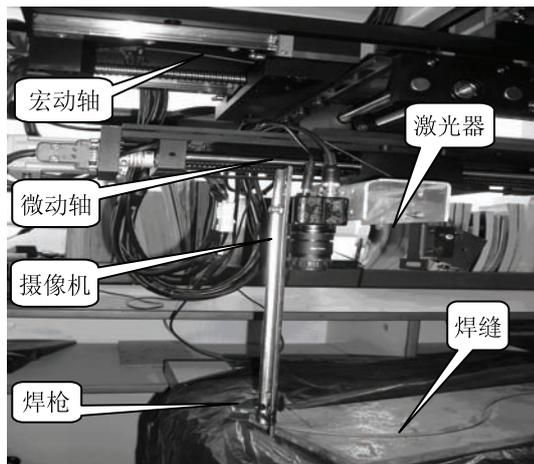
对于微动单元，采用反方向调节策略。其两个方向的输出控制量表达式为：

$$\begin{cases} X'_2 = X_2 - \frac{D_x}{N}, & D_x > \sigma_x \\ Y'_2 = Y_2 - \frac{D_y}{N}, & D_y > \sigma_y \end{cases} \quad (4)$$

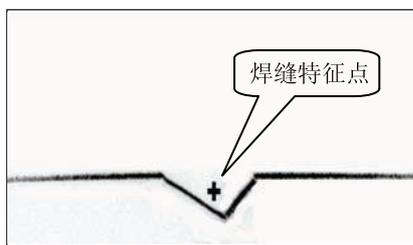
其中,  $X_2$ 、 $Y_2$  为微动单元的原控制输出增量,  $X'_2$ 、 $Y'_2$  为微动单元的控制输出增量.

### 5 实验与结果 (Experiment and results)

焊缝跟踪宏微运动平台如图 4(a) 所示, 结构光图像与特征点提取结果如图 4(b) 所示. 利用该宏微运动实验平台, 分别针对折线焊缝和 S 形曲线焊缝进行了粗略示教与建模实验和基于宏微运动的焊缝跟踪实验.

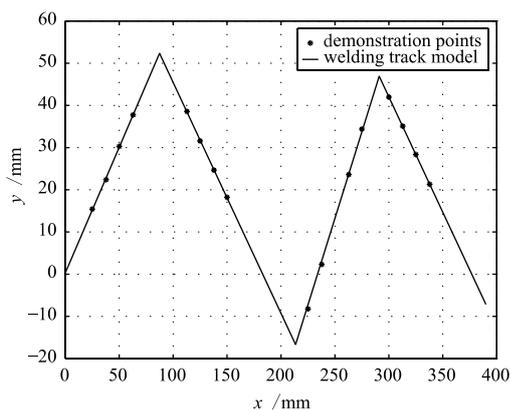


(a) 平台照片

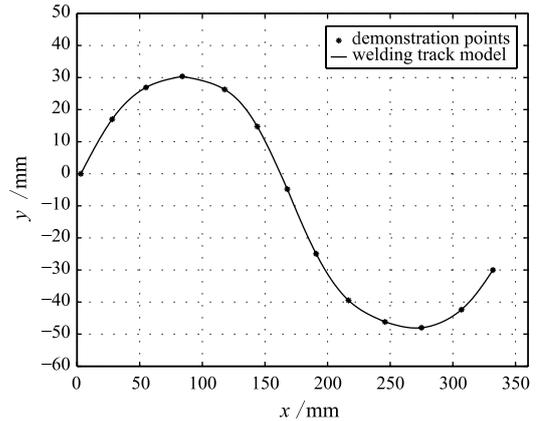


(b) 结构光图像与特征点提取结果

图 4 宏微运动实验平台和结构光图像特征点提取结果  
Fig.4 Macro-micro motion experiment platform and feature extraction of the structured light image



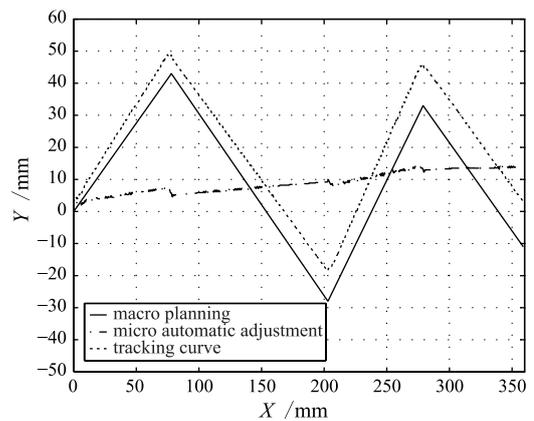
(a) 折线型焊缝建模



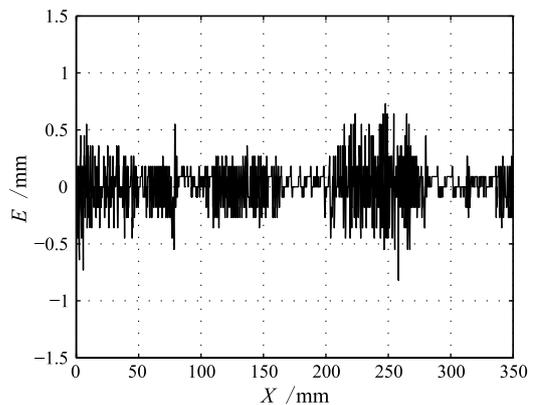
(b) S 型曲线焊缝建模

图 5 焊缝建模  
Fig.5 Weld seam modelling

焊缝粗略示教与建模实验的结果见图 5, 其中的“\*”表示焊缝位置特征示教点. 图 5(a) 为折线焊缝的建模结果, 图 5(b) 为 S 形曲线焊缝的建模结果. 折线建模采用直线拟合方法获得多段线段, 通过计算相邻直线段的交点获得锯齿形焊缝的控制点. S 形曲线焊缝采用 B 样条四点插值法进行拟合. 由图 5 可知, 通过建模可以完整地描述焊缝.

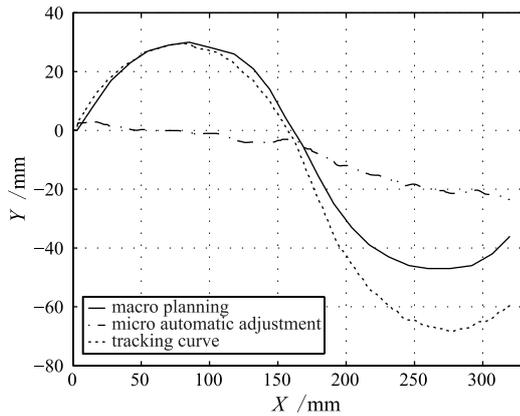


(a) 跟踪曲线及机器人关节曲线

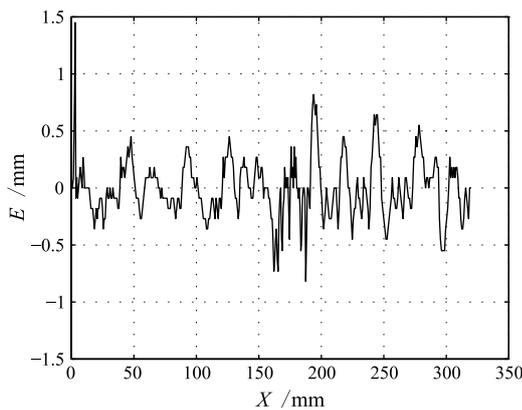


(b) 折线焊缝跟踪误差

图 6 折线焊缝跟踪实验  
Fig.6 Zigzag weld seam tracking



(a) 跟踪曲线及机器人关节曲线



(b) S形焊缝跟踪误差

图7 S形曲线焊缝跟踪实验

Fig.7 S-shaped weld seam tracking

图6和图7分别为基于宏微运动的折线焊缝和S形曲线焊缝的跟踪实验结果.折线焊缝通过对焊接机器人的关节进行直线插补,完成运动规划;S形曲线焊缝将示教焊缝位置特征点作为B样条型值点,计算B样条插值点坐标,作为规划控制点.实验中,焊件实际位置稍微偏离原建模位置.图6(a)和图7(a)为宏动规划曲线、微动调节曲线和末端实际跟踪曲线.从图中可以看出,两宏动轴进行了大范围的移动,微动轴在小范围内进行快速调节.图6(b)和图7(b)为焊缝跟踪误差曲线.由图可知,跟踪误差 $E$ 保持在 $\pm 0.5$  mm范围内.以上两个实验表明,基于宏微运动的焊缝跟踪能够实现焊缝的大范围、较高精度的跟踪.

如果提高微动轴的控制分辨率,利用智能控制算法提高系统响应特性和控制效果,同时减少视觉测量误差,系统的跟踪精度能够得到进一步的提高.

## 6 结论 (Conclusion)

本文提出了一种基于宏微运动的焊接机器人焊

缝跟踪方法.首先,利用宏动单元进行简单示教采集焊缝特征点信息,利用拟合方法对焊缝建模,作为焊缝跟踪的宏动路径规划依据.然后,宏动单元根据焊缝模型进行规划运动,实现焊枪的大范围移动;微动单元根据视觉传感器的信息自动调节焊枪位姿,实现高精度的焊缝跟踪.通过宏微运动单元的协调控制,保证微动单元的位置处于可调节范围内.

基于宏微运动实验平台,对折线焊缝及S形焊缝的建模与跟踪进行了实验.实验结果验证了本文方法的有效性.

## 参考文献 (References)

- [1] 吴林, 陈善本. 智能化焊接技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.  
Wu Lin, Chen Shan-ben. Intelligent Technologies for Welding[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000.
- [2] Bolmsjo G, Olsson M, Cederberg P. Robotic arc welding – Trends and developments for higher autonomy[J]. Industrial Robot, 2002, 29(2): 98~104.
- [3] Khatib O. Reduced effective inertia in macro-/mini-manipulator systems[A]. Proceedings of the Fifth International Symposium on Robotics Research[C]. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1990. 279~284.
- [4] Sharon A, Hogan N, Hardt D E. High bandwidth force regulation and inertia reduction using a macro/micro manipulator system[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1988. 126~132.
- [5] Salisbury J K, Abramowitz J D. Design and control of a redundant mechanism for small motion[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1985. 323~328.
- [6] Yoshikawa T, Hosoda K, Doi T, *et al.* Quasi-static trajectory tracking control of flexible manipulator by macro-micro manipulator system[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1993. 210~215.
- [7] Yim W S, Singh S N. Trajectory control of flexible manipulator using macro-micro manipulator system[A]. Proceedings of the 34th IEEE Conference on Decision and Control[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1995. 2841~2846.
- [8] 祝世平, 强锡富. 工件特征点三维坐标视觉测量方法综述 [J]. 光学精密工程, 2000, 8(2): 192~197.  
Zhu Shi-ping, Qiang Xi-fu. Analyses of 3-D coordinate vision measuring methods with feature points on workpiece[J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(2): 192~197.
- [9] Xu D, Jiang Z M, Wang L K, *et al.* Features extraction for structured light image of welding seam with arc and splash disturbance[A]. Proceedings of the International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004. 1559~1563.

- [9] Xu Y C, Zong G H, Bi S S, *et al.* Initial development of a flapping propelled unmanned underwater vehicle[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007. 524~529.
- [10] Heine C E. Mechanics of Flapping Fin Locomotion in the Cownose Ray, *Rhinoptera Bonasus* (Elasmobranchii: Myliobatidae)[D]. North Carolina, USA: Duke University, 1992.
- [11] Chopra M G. Large amplitude lunate-tail theory of fish locomotion[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1976, 74(1): 161~182.
- [12] Triantafyllou M S, Techet A H, Hover F S. Review of experimental work in biomimetic foils[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2004, 29(3): 585~594.
- [13] 梁建宏. 水下航行体仿生推进机理研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2007.  
Liang Jian-hong. Propulsive Mechanism of Bionic Undersea Vehicle[D]. Beijing: Beihang University, 2007.
- [14] 胡广书. 数字信号处理——理论、算法与实现 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.  
Hu Guang-shu. Digital Signal Processing – Theory, Arithmetic and Realization[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.
- [15] 张代兵. 波动鳍仿生水下推进器及其控制方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.  
Zhang Dai-bing. Research on the Underwater Bionic Undulatory-fin Propulsor and Its Control Method[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.
- [16] 从爽, 李泽湘. 实用运动控制技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.  
Cong Shuang, Li Ze-xiang. Practical Technology of Motion Control [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.

#### 作者简介:

杨少波 (1975-), 男, 博士生. 研究领域: 机械工程.

韩小云 (1971-), 男, 副教授. 研究领域: 力学, 机械工程.

(上接第 507 页)

- [10] Xu D, Wang L K, Tan M. Image processing and visual control method for arc welding robot[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004. 727~732.
- [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] 马颂德, 张正友. 计算机视觉——计算理论与算法基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.  
Ma Song-de, Zhang Zheng-you. Computer Vision: Fundamentals of Computational Theory and Algorithms[M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [13] 王仁宏. 数值逼近 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.  
Wang Ren-hong. Numerical Approximation[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.
- [14] 谭民, 徐德, 侯增广, 等. 先进机器人控制 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.  
Tan Min, Xu De, Hou Zeng-guang, *et al.* Advanced Robot Control[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007.

#### 作者简介:

杨平 (1983-), 男, 博士生. 研究领域: 智能焊接, 图像处理, 运动控制.

徐德 (1965-), 男, 博士, 研究员. 研究领域: 机器人控制, 智能控制, 计算机控制技术.

李原 (1977-), 男, 博士生. 研究领域: 焊接机器人, 图像处理, 模式识别等.