

图像处理在自动焊接中的应用和展望

陈彦宾 李俐群 陈凤东 陈杰

(现代焊接生产技术国家重点实验室, 15001, 哈尔滨,)

摘要: 图像处理技术在自动焊接领域的应用已引起国内外学者的广泛重视。通过图像传感技术获取焊接熔池直观丰富的图像信息,使用高效的图像处理算法,提取焊接熔池的特征信息,用以实现自动焊接过程质量实时传感与控制。本文综合论述了图像处理技术在自动焊接中的应用原理、数字图像的采集方法、数字图像的特征信息定义、广义数字图像处理技术及其对自动化焊接理论研究和实践应用的推动作用。通过总结图像处理技术的研究和应用现状,综合分析了图像处理技术在现代焊接技术中发展和应用的前景。

关键词: 图像处理 视觉传感 自动化焊接

中图分类号: TG665

现代焊接技术的自动化水平日益提高,焊接质量控制显得尤为重要。在自动化焊接中,焊接信息传感技术是焊接过程质量实时传感与控制的技术难点^[1]。国内外学者针对焊接过程中存在的声、光、电、热、磁等诸多物理和化学现象,采用各种传感技术如声学传感、光学传感、温度场测定、熔池振荡信息等来监测焊接过程质量^[2-5],但是由于焊接过程具有多参数、高精度及时变性的特点,传统的传感方法尚未能取得令人满意的结果,难以实现焊接质量实时传感与闭环控制。近年来,随着计算机视觉技术的发展,利用机器视觉直接观测焊接熔池,通过图像处理获取熔池的特征信息,建立焊接过程质量实时传感与控制系统,已成为重要的研究方向^[6-16]。

利用机器视觉直接观测焊接熔池具有明显的优点,采集的数字图像表象直观,信息丰富,且数字化的图像数据,可以实时传输到计算机高速缓存内,进行实时处理,提取特征信息,并作出在线判断,使得实现焊接过程质量的实时传感与控制成为可能。图1所示为焊接过程图像传感与控制系统结构^[17]。

在自动化焊接过程中,图像传感技术多用于焊缝跟踪^[18-19]、焊接过程稳定性监测^[20-21]和熔深控制^[22-23]等,而熔透控制以其难以直接监测的特点,更注重熔池信息的捕获。通过建立焊接熔池图像特征信息与熔深之间的映射关系,实现熔深预测和控制。图像传感技术以其独特的优势,成为自动化焊接中质量控制关注的焦点。

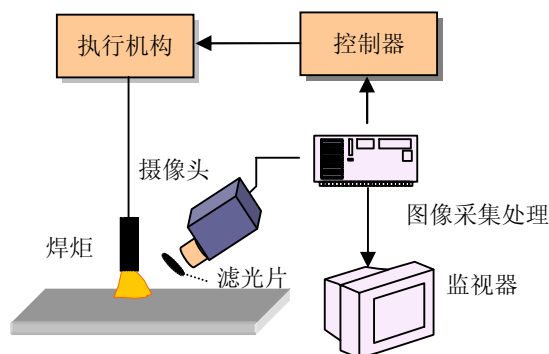


图1 焊接过程图像传感与控制系统

Fig. 1 System of image sensing and controlling in welding process

1 焊接图像摄取方法

从国内外大量文献来看^[24-27], 利用机器视觉采集焊接熔池图像的方法主要分为主动式直接视觉传感和被动式直接视觉传感两大类。焊接图像通常由 CCD 摄取。被动式直接视觉传感是利用焊接过程中的结构光进行成像。被动式直接视觉传感存在强光干扰的问题, 即在焊接过程中, 激光等离子体或电弧的辐射光强度都远远超过焊接熔池辐射光强, 并且也超出了 CCD 传感器的响应上限, 如不采取适当的滤光措施, 则所有的 CCD 感光单元都会达到电饱和, 熔池内部的图像信息会被电弧光淹没。激光焊接中, 通常采用中性减光的办法解决强光干扰的问题; 在电弧焊接中, 对于短路电弧焊和脉冲电弧焊, 可在短路期间或基值电流期间获取图像数据, 或者在在摄像机前通入部分保护气, 减少烟雾和飞溅的影响; TIG/MIG/MAG 焊时弧光在 600nm~700nm 波段内相对光强最弱最稳定, 选用这一波段内的干涉滤光片和耐热玻璃可有效地排除弧光及红外干扰。

主动式直接视觉传感利用窄带复合滤光系统滤除非连续光谱的电弧强光, 并采用高强脉冲激光或具有图像增强器的高频闪光灯作为辅助光源, 可有效地抑制弧光获得清晰图像。图 2 是主动式激光频闪视觉传感系统示意图^[28]。脉冲激光平均功率为 7mW, 在一个脉冲周期内激光脉冲持续时间为 3ms, 峰值功率可达 50kw, 激光波长为 337nm。摄像机成像的光路系统中加有与激光波长相匹配的窄带光学滤光器, 摄像机的快门与激光脉冲同步, 因此熔池在摄像机上成像时激光就能有效地抑制弧光的干扰, 同时也抑制了其它波长的干扰, 进一步提高了图像的信噪比。

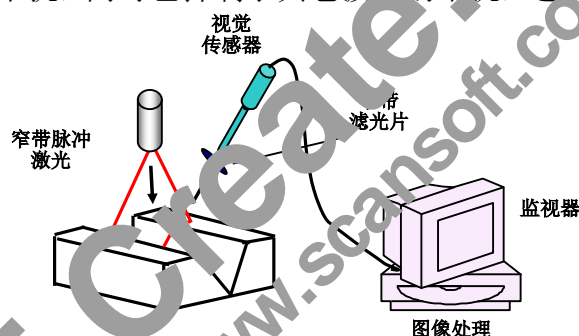


图 2 激光频闪视觉传感系统

Fig.2 Laser frequent flash vision sensing system

2 焊接图像特征量定义与提取

焊接熔池特征信息与焊接质量存在必然联系, 在焊接熔透控制中, 熔池图像特征量的定义与提取对于焊接熔深的预测起着决定性的作用。通常定义熔池半长、最大熔宽、熔池后部面积以及后拖角等, 作为焊接熔池的特征量^[29-30], 如图 3 所示。在图像处理过程中提取这些几何参数作为自动控制和质量预测的输入信息。

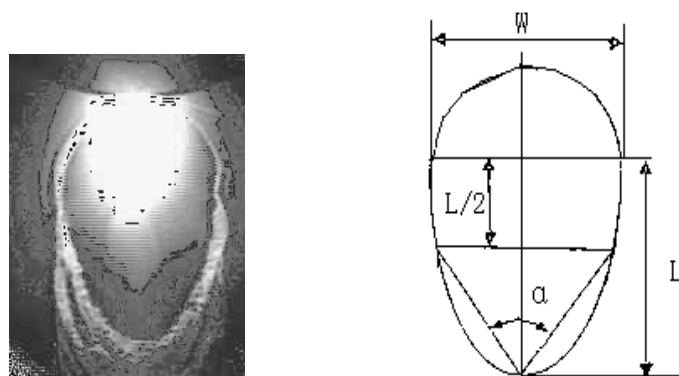


图 3 熔池形状及其几何参数的定义

Fig.3 The shape of molten pool and the definition of geometry parameter

在不同的焊接方法及不同的应用场合中，研究者会关注不同的图像特征量。

在等离子弧焊熔透控制中^[31-32]，图像特征信息要求能够作为工件熔透的判据。图 4 是采用主动式直接视觉传感技术得到的工件立焊时的正面穿孔熔池图像及图像处理的结果^[33]。研究者利用高度变形的穿孔熔池液态金属比表面对电弧焰心的反光更强的特点成功的提取到清晰的穿孔的熔池图像，对填丝和未填丝条件下穿孔熔池图像的特点及其成因进行定性分析。根据穿孔熔池图像的特点设计了 α -剪裁均值中值型滤波、基于方向算子和局部统计特性的图像增强、可视小孔边缘提取和可视小孔几何尺寸计算等图像处理方法。结果表明，小孔直径能很好反映焊缝熔深情况。

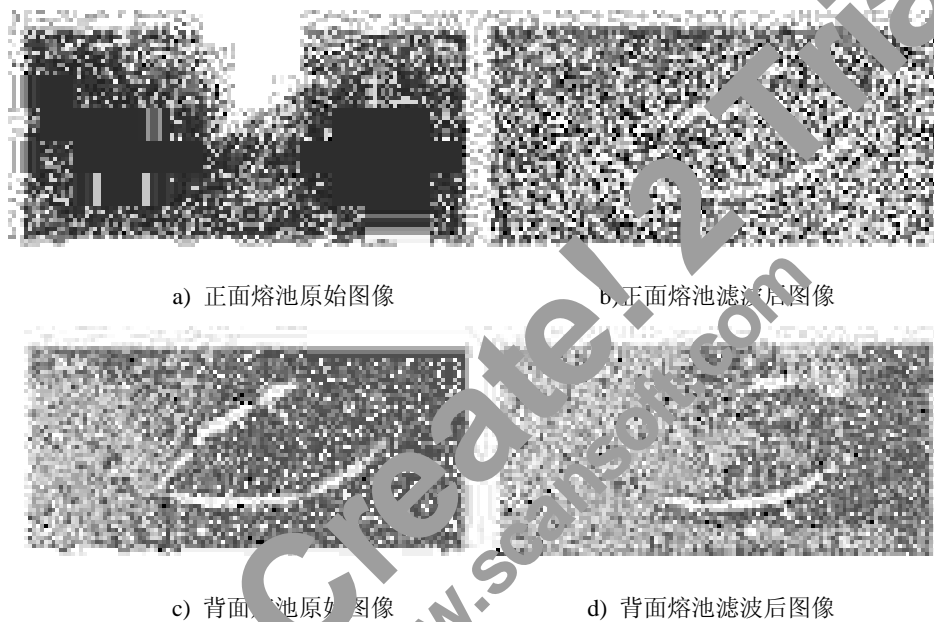


图 4 穿孔熔池图像

Fig. 4 The image of molten pool

- a) Origin image of the front face of molten pool
- b) Filtered image of front face of molten pool
- c) Origin image of the front face of molten pool
- d) Filtered image of front face of molten pool

在 TIG 自动焊接领域中^[34-35]，为进行 TIG 焊熔深及熔透控制，研究者采用被动式直接视觉传感技术，获取 TIG 自动焊熔池剥离带的色彩特征信息，建立数学模型，利用 Surface Evolver 有限元软件进行模拟，并用数值分析的方法确定熔池正面特征量（熔化半径及剥离带宽度）与熔深的函数关系。图 5 是反应特征量的图像。

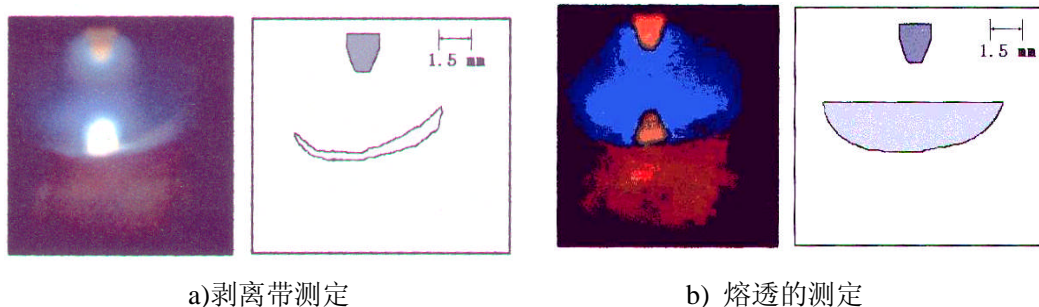


图 5 剥离带熔透测定

Fig.5 Full penetration determination using decollating belt
a) Determination of decollating belt b) Determination of full penetration

“锁孔效应”是激光焊的典型特征^[36-39]，在激光焊接中，通过图像处理技术提取熔池的最大熔宽和熔池锁孔信息，可以建立熔宽、锁孔与熔深的数学模型，模拟熔池在焊接过程中的形状，进而达到预测熔深，监测质量的目的。在这个领域，德国 Joerg Beerisek 教授^[39-40]利用 CMOS 摄像机对激光焊接过程中锁孔的不稳定性进行了在线研究，观察锁孔图像信息并模拟出激光焊接在焊透与未焊透时熔池的图像，如图 6 所示。利用图像信息可以检测出激光焊接过程中的缺陷，对缺陷位置进行标示与分类，以便后续处理。

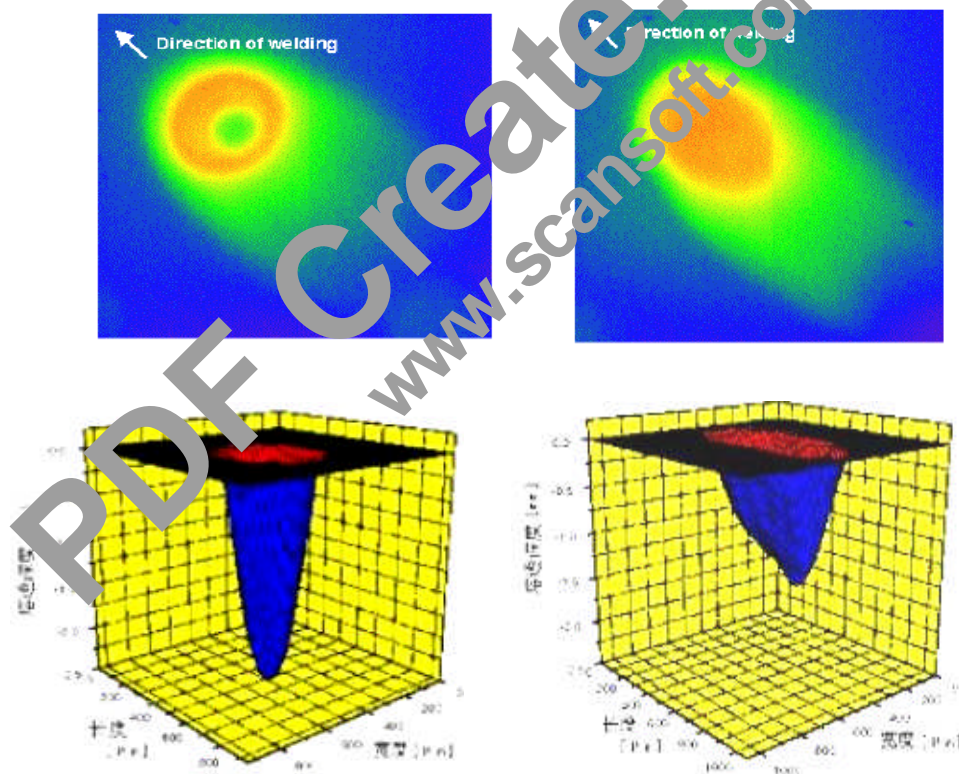
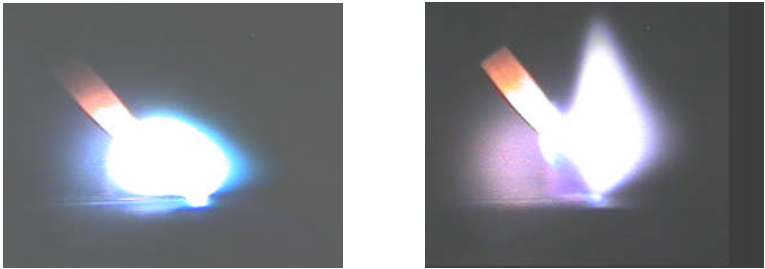


图 6 焊透与未焊透时熔池的图像与模拟结果

Fig.6 Molten pool images of full penetration and partial penetration and the simulation results

除了熔透控制和熔深检预测外，图像传感技术也常用于监测焊接过程的稳定性，如在激光-TIG 复合热源的研究中，通过 CCD 观察复合电弧的动态行为（如

图 7 所示), 来监测焊接过程的稳定性, 并可利用图像处理的方法得到电弧的弧根尺寸, 为激光-TIG 复合热源的理论和数值模拟计算提供直接的证据^[41]。



a) G 稳定稳定焊接过程 b)不稳定焊接过程

图 7 激光-TIG 复合电弧图像

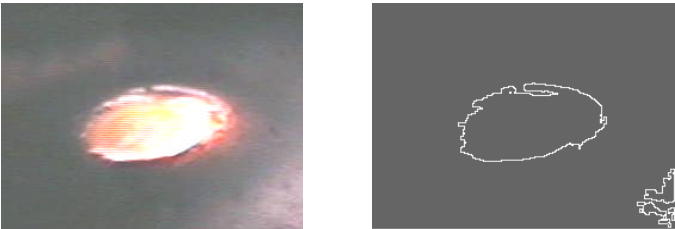
Fig 7 Arc images of laser-TIG hybrid welding processing

a) Stable welding processing b) Unstable welding processing

有些科技工作者还将图像处理用于水下湿法焊接^[42]。通过复合滤光技术和水下 CCD 摄像系统, 采集出了药芯焊丝水下湿法焊接电弧区域的图像, 用中值滤波和梯度算子的电弧区域图像边缘检测方法, 有效地区分了电弧燃烧区域和电弧气泡区域。

3 焊接图像处理方法

纵观上述, 采用机器视觉的方法为焊接过程质量传感和控制找到可行之路^[43-46]。然而, 在实际的焊接过程总是存在声、光、电、热、磁及烟尘杂物等诸多的干扰因素, 采用 CCD 摄取原始数字图像可能会因为噪声干扰而使得图像特征量难以提取, 造成传感失效。所以必须对采集的数字图像进行预处理, 以解决这个问题。广义的图像处理可分为图像预处理、图像识别和图像理解三步。图像预处理的目的是减小由于摄像中各种条件的限制而产生的不足和随机干扰噪声, 使输出图像有较高的信噪比; 图像识别技术根据从图像抽取的统计特性或结构信息, 把图像分成预定的类别, 借助快速傅立叶变换、小波变换、概率统计等数学工具进行图像分割和边缘提取, 进而对图像进行分析、特征提取。图 7 是采集到的激光焊接熔池图像, 使用小波算子对图像进行处理得到的边缘信息图像; 图像理解不仅描述图像本身, 而且描述和解释图像所代表的景物, 以便对图像代表的内容作出判断, 图像理解除了需要复杂的图像处理以外, 还需要具有关于焊接过程成像的物理规律知识以及与焊接内容有关的知识。



a)激光熔池原始图像 b)熔池边缘特信息

图 8 激光焊接熔池图像

Fig.8 Image of molten pool for laser welding

a) Origin image of molten pool b) Edge information of molten pool

广义的图像处理中,图像识别是关键步骤,它使用一定的数学算法对数字图像的矩阵进行运算,数字图像的矩阵运算量是十分大的,要实现焊接质量的实时传感和控制,图像处理速度是不得不考虑的一个问题,需求高效的图像处理算法。使用快速傅立叶变换、小波变换等数学工具进行图像分割和边缘提取^[47],可以降低图像处理算法得总体复杂性,使得焊接过程的实时性增强;在焊缝视觉跟踪过程中,采用合适尺度的小波变换可获得清晰的焊缝边缘,简化硬件设备。

4 图像处理在焊接中应用的展望

把图像处理技术应用到现代焊接技术中,将会推动焊接过程质量实时传感与控制的发展和成熟,使得焊接过程通过闭环反馈控制而实现完全自动化,保证焊接质量,提高焊接生产效率。

图像传感的方法也使得研究者能够观察到其他传感方法所不能观察到的被强光所淹没的丰富直观的信息,这为焊接现象的描述及内在规律的解析提供了极佳的条件和直接的证据,这必然会推动焊接理论和实践的发展。

现代工业正朝着信息化和智能化方向发展,现代焊接技术也必然要实现智能化。数字图像技术作为智能控制中关键技术之一,在焊接过程中发挥的作用将会越来越大,将为焊接智能化生产作出贡献。

参考文献:

1. 王其隆. 弧焊过程质量实施传感与控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.12
2. Wang Huijun et al. Image sensing of the keyhole puddle from the front side of workpiece in VPPAW of aluminum alloys. China Welding, 1997,6(2) P136-146.
3. Zhang, Y M. Real-time sensing of sag geometry during GTA welding. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 2000, 122 (2) P151-160.
4. Akihiro et al. Control of TIG Arc with Scanning CO2 Laser beam. 溶解学会论文集, 2000(4) P534-539.
5. 何景山等. 埋弧焊图像法焊缝自动跟踪传感系统. 焊接, 1999(9) P16-19.
6. Smith, J.S.; Ludas, W. Vision based systems for controlling the arc welding operation and inspecting the weld bead profile Welding Research Abroad v46 n11 Nov 2000 Welding Research Council New York NY USA P10-22.
7. Bauchpiess, Adolfo; Absi Alfaro, Sadek C.; Dobrzanski, Leszek. A. Predictive sensor guided robotic manipulators in automated welding cells Journal of Materials Processing Technology v109 n1-2 Feb 2001 Elsevier Science S.A. Lausanne Switzerland P13-19.
8. Bo, You; Galopin, Michel. Development of a novel robotic wrist F/T sensor and its implement on the grinding operation Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering International Conference on Sensors and Control Techniques (ICSC 2000) Jun 19-Jun 21 2000 v4077 2000 Wuhan, China, P 486-491.

9. Fujimoto, Kozo; Tominaga, Koji; Nakata, Shuji. Imaging method with separated fields of vision for high accurate visual sensing. . Quarterly Journal of the Japan Welding Society v18 n4 2000 Japan Welding Soc Tokyo Japan P549-554.
10. Min Young Kim; Kuk-Won Ko; Hyung Suck Cho; Jae-Hoon Kim. Visual sensing and recognition of welding environment for intelligent shipyard welding robots Intelligent Robots and Systems, 2000. Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on , Volume: 3 , 2000 P2159 -2165 .
11. Shibata, N; Hirai, A; Takano, Y; Ishimaru, Y Development of groove recognition algorithm with visual sensor. Practical development of visual sensor for welding robot. I Welding International (UK), 13, (10), 1761-769, 1999.
12. Shibata, N.; Hirai, A.; Takano, Y.; Ishimaru, Y. Development of groove recognition algorithm with visual sensor. Practical development of visual sensor for welding robot (1st report) Welding Research Abroad v46 n6 Jun-Jul 2000 Welding Research Council New York NY USA P9-17.
13. Jeng, J.Y.; Mau, T.F.; Leu, S.M. Gap inspection and alignment using a vision technique for laser butt joint welding International Journal of Advanced Manufacturing Technology v16 n3 2000 Springer-Verlag London Ltd. London Engl P212-216.
14. Fujimoto, Kozo; Tominaga, Koji; Nakata, Shuji Imaging method with separated fields of vision for high accurate visual sensing. Quarterly Journal of the Japan Welding Society v18 n4 2000 Japan Welding P549-554 .
15. Bauchspies, Adolfo; Absi, Rafik; Gadek, C.; Dobrzanski, Leszek A. Predictive sensor guided robotic manipulators in automated welding cells Journal of Materials Processing Technology v109 n1-2 Feb 2001 Elsevier Science S.A. Lausanne Switzerland. P13-19.
16. Bill Lucas et.al. Creating an Electronic Eye on Automated Arc Welding. Welding & Metal Fabrication, 2000(4) P6-13.
17. 李克海等. 脉冲 TIG 焊熔池几何参数的计算机视觉监测. 焊管, 2000(11) P29-32.
18. Huang, Minsheng; Gao, Xiangdong; Yu, Shiwei. Study on an intelligent weld beam tracking system. Chinese Journal of Mechanical Engineering v35 n6 Dec 1999 P34-37.
19. 高向东等. 基于视觉传感的焊缝跟踪控制系统. 焊接技术, 2000(1) P1-3.
20. Holbert, RK; Richardson, RW; Farson, DF; Albright, CE. Image-based penetration monitoring of CO₂ laser beam welding. Welding Journal (USA), vol. 79, no. 4, P89s-96s, Apr. 2000.
21. Wang Jiachun. et.al. Effects of Output Waveforms on Penetration for Nd:YAG Laser Welding. China Welding, 2000(5) P65-75.
22. Zheng, B.; Wang, H.J.; Wang, Q.I.; Kovacevic, R. Control for weld penetration in VPPAW of aluminum alloys using the front weld pool image signal Welding Journal (Miami, Fla) v79 n12 Dec 2000 American Welding Soc Miami FL USA P363-s-371-s .

23. Zheng, B.; Wang, H.J.; Wang, Q.I.; Kovacevic, R. Control for weld penetration in VPPAW of aluminum alloys using the front weld pool image signal *Welding Journal* (Miami, Fla) v79 n12 Dec 2000 American Welding P 363-s-371-s.
24. 李克海等. TIG 焊正面熔池图像的视觉传感. *焊管*, 2000(9) P17-20.
25. OBeersiek, J. On-line monitoring of keyhole instabilities during laser beam Laser Institute of America, *Laser Materials Processing*; Volume 87, Part 2 (USA), D49-D58, Nov. 1999.
26. Wildmann, D; Halschka, M; Schwarz, J. Novel methods for online high-accuracy quality control of laser welded blanks and tubes Laser Institute of America, *Laser Materials Processing*. Volume 89 (USA), E62-E71, Oct. 2000.
27. Kannatey-Asibu, E Jr; Tsai, FR. Modeling of conduction mode laser welding process for feedback control *Journal of Manufacturing Science and Engineering* (USA), vol. 122, no. 3, P 420-328, Aug. 2000.
28. Zhang, Y M. R Real-time sensing of sag geometry during GTA welding. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Transactions of the 2000, 119 (2) P151-160.
29. 李克海等. 脉冲 TIG 焊熔池几何参数的计算机视觉监测. *焊管*, 2000(11) P29-32.
30. 赵冬斌等. 填丝脉冲 GTAW 熔池形状定义和图像处理. *焊接学报*, 2001(4) P5-8.
31. 刘桑等. 水下湿法焊接电弧图像的边缘检测技术. *电焊机*, 2000(4) P14-16.
32. 王秀媛等. 小波分析在焊缝检测图像处理中的应用. *电焊机*, 2000(5) P27-29.
33. 王惠钧. 图像传感变极性等离子弧焊焊缝稳定成型闭环控制, 哈尔滨工业大学博士论文, 2000.
34. Jinhe, Lu; Decai, Yang; Ruijing, Lu; Wanqian, Hu Determining isothermal line of laser welding plasma by computerizing RGB tricolor method *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* *Proceedings of the 1999 International Conference on Industrial Lasers (IL '99)* Oct 22-Oct 27 1999 v3862 1999.
35. 何景山. 脉冲 TIG 焊熔深及熔透的彩色图像法传感, 哈尔滨工业大学博士论文, 2001.
36. Toru et.al. Factors of Keyhole Bottom Separation in ND:YAG Laser Welding with Two Beams Combined at Surface of Workpiece. *溶解学会论文集*, 1999 (2) P209-215.
37. Jeng, JY; Mau, TF; Leu, SM Gap inspection and alignment using a vision technique for laser butt joint welding *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (UK), vol. 16, no. 3, P212-216, 2000.
38. Kannatey-Asibu, E Jr; Tsai, FR. Modeling of conduction mode laser welding process for feedback control *Journal of Manufacturing Science and Engineering* (USA), vol. 122, no. 3, P 420-328, Aug. 2000.

39. Beersiek, J On-line monitoring of keyhole instabilities during laser beam welding Laser Institute of America, Laser Materials Processing; Volume 87, Part 2 (USA), D49-D58, Nov. 1999.
40. Joerg Beersiek On-line Monitoring of Keyhole Instabilities During Laser Beam Welding. Welding Monitor PD 2000, 1999(2) P1-4.
41. He Jingshan. et al. Mathematical Simulation of Three Dimensional Liquid Surface Shape for Non-penetrated Weld Pool. China Welding. 2001(1) P24-32.
42. Ogawa, Y. Image processing for wet welding in turbid condition Underwater Technology, 2000. UT 00. Proceedings of the 2000 International Symposium on , 2000 P 457 –462
43. 王秀媛等. 小波分析在焊缝检测图像处理中的应用. 电焊机, 2000(5) P27-29.
44. 王秀媛等. 基于图像分割的图像处理法在焊缝识别中的应用. 电焊机, 2000(10) P32~34.
45. 吴林等. 铝合金焊缝图像的焊接区域提取与缺陷尺寸形状保真. 焊接学报, 2001(4) P1-8.
46. Liu, Zhonghua; Wang, Qilong; Zhu, Jiaqi Keyhole image processing of variable polarity plasma arc welding based on wavelet transform Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition) 14 n1 Mar 2001 Chin Mech Eng Soc Beijing China P62-66.
47. Zhonghua, Liu; Qilong, Wang Edge detection and automatic threshold based on wavelet transform in the VPPW keyhole image processing Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society) 35th IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy Oct 08-Oct 12 2000 v2 2000 Rome, Italy, IEEE P 1048-1053.

Application and Prospect of Image proceeding in welding

Chen Yabin, Li Liquan, Chen Fengdong ChenJjie

State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin, 150001

Abstract: Modern welding process tends towards auto-welding and asks for efficient quality monitoring measurement. Much studying work has been done in this area. The application of image processing in welding can help us control the process and quality by monitoring the location and status of the dynamic welding molten pool and also make it possible to inspect the flaw of welding without scathing the workpiece. The digital image processing technique using in welding is proved to be superiority and become much attention-getting inside and outside China. By using machine vision we can get digital images with direct and rich image information of welding molten pool and plasma, and transfer them into computer cache at the same time. The digital images can be manipulated in real time using efficient image manipulation algorithm to distill the characteristic information. Then we can use the

characteristic information as controlling signal of execute unit and realize welding quality controlling automation. This paper demonstrates the applied status of image processing in welding including the method and principle of image mutograph, the definition of the melting pool characteristics and the technique of digital image processing by referring to a lot of relative papers in order to prospect the technique of digital image in auto-welding and promote the advance of auto-welding.

Keywords: image processing visual sensing auto-welding.

作者简介：陈彦宾，副教授，1962年生，博士，主要从事激光加工技术、激光焊接过程在线检测及控制、激光焊接过程数值模拟研究，发表论文 30 余篇。

Contact: chenyb@hit.edu.cn

Tel: 0451-6418645, 0451-6415374

PDF Create! 2 Trial
www.scansoft.com