

基于 ACT 匹配的 GMA 增材制造熔池形貌三维重建

尹紫秋, 熊俊

(西南交通大学 材料先进技术教育部重点实验室 成都 610036)

摘 要: 基于双棱镜折射原理, 设计了单摄像机虚拟双目视觉传感系统, 系统达到亚像素精度. 标定了左右虚拟摄像机内外参数及其关系, 完成了图像对的极线校正. 进一步优化了自适应权重 Census 变换立体匹配算法 (ACT, adaptive Census transform), 求取了校正图像对亚像素精度视差. 三角测量法重建了标准圆柱体部分表面形貌. 结果表明, 标准件宽度误差优于 3.17%, 高度误差优于 5.83%. 以熔化极气体保护电弧 (GMA, gas metal arc) 增材制造熔池图像对为例, 采用优化的 ACT 匹配算法求取了熔池图像对亚像素精度视差, 基于三角测量法获取了熔池表面三维形貌.

关键词: GMA 增材制造; 熔池形貌; 三维重建; 自适应 Census 变换

中图分类号: TG 442, TG 115.28

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.2019400010

0 序 言

GMA 增材制造具有堆积效率高、制造成本低等优点, 在航空航天、国防工业等领域应用广泛^[1-3]. GMA 增材制造过程存在众多扰动因素, 诸如: 熔滴过渡方式、堆积层散热速率、层间温度、保护气体流量等, 难以保证堆积过程中熔池尺寸均匀一致. 因此, 亟需对 GMA 增材制造过程开展在线检测.

目前, 国内外学者大多采用电参数传感、红外传感、单目视觉传感等方法^[4-6]对电弧填丝增材制造成形过程进行检测. 相较于其它传感方法, 视觉传感有着直观、信息量丰富等显著优点. 然而, 单目视觉传感仅能获取电弧增材制造熔池单一方向上的平面信息. 同时, 单目视觉传感器到堆积层熔池表面距离的波动, 使得传感器标定失效^[7]. 文献^[8]利用被动视觉传感器监测焊枪到堆积层熔池表面距离, 实时修正 GMA 增材制造熔池宽度视觉传感器的标定系数, 但该系统组成过于复杂. 传统双目立体视觉传感系统虽然可以恢复目标物体的三维形貌, 但是难以保持两摄像机的同步采集. 为此, 文中基于双棱镜的折射原理, 设计单摄像机虚拟双目视觉传感系统, 重建 GMA 增材制造熔池表面三维形貌, 实现熔池形貌的在线监测.

1 虚拟双目视觉传感系统设计

传统的双目视觉传感系统, 采用两个单独的摄像机, 从不同角度检测目标物体, 检测过程中难以保证两摄像机相对位置固定, 提升成本并增加了系统的复杂程度. 为此, 设计了基于双棱镜的单摄像机虚拟双目视觉传感系统, 如图 1 所示, 利用双棱镜两个斜面的折射, 在图像平面上得到空间点 X_p 的两个投影点 m_l, m_r , 使得单摄像机获得立体图像对, 实现了左右虚拟摄像机的平行配置.

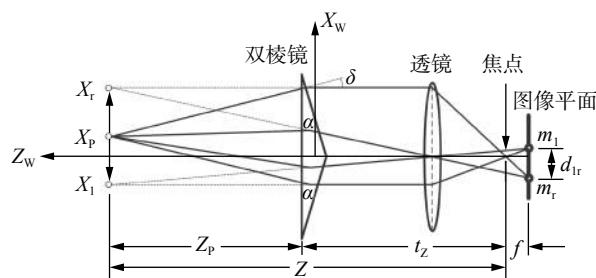


图 1 基于双棱镜的虚拟双目视觉传感系统

Fig. 1 Virtual binocular vision system based on biprism

设计的虚拟双目视觉传感系统具体参数如下: 电荷耦合 (CCD, charge coupled device) 摄像机为北京大恒图像提供的水星系列 MER-125-30UM-L 工业摄像机, 像素焦距 $\alpha_u = 6\,667$, 摄像机镜头为 M2514-MP2 镜头, 焦距为 25 mm, 双棱镜材质为 K9 玻璃, 双棱镜边角 $\alpha = 7^\circ$, 折射偏角 $\delta = 3.623^\circ$, 双棱镜底面尺寸为 30 mm × 30 mm, 双棱镜底面到增材制造

熔池表面距离 $Z_p = 152$ mm, 摄像机镜头焦点到双棱镜底面距离 $t_z = 48$ mm. 熔池表面到摄像机焦点距离 Z 对成像点 m_l, m_r 像素距离 d_{lr} 求偏导得

$$\frac{\partial Z}{\partial d_{lr}} = \frac{Z^2}{2\alpha_u \cdot t_z \cdot \tan \delta} = 0.97 < 1 \quad (1)$$

由式 (1) 可知, 设计的虚拟双目视觉传感系统达到亚像素精度.

2 三维重建算法

基于虚拟双目视觉的三维重建算法, 通过摄像机标定求解左右虚拟摄像机内外参数及其位置关系, 完成图像对的极线校正使左右投影点位于同一水平线上, 利用立体匹配求取图像对视差, 即求取左右投影点图像坐标的偏差, 最后基于三角测量法计算空间点三维坐标.

2.1 传感系统标定及极线校正

采用平面模板标定法^[9], 标定左右虚拟摄像机内外参数、左右虚拟摄像机相对位置关系. 坐标为 (X_w, Y_w, Z_w) 的空间三维点投影到图像平面, 其坐标为 (u, v) , 两坐标转换关系为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [R \quad t] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = K [R \quad t] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $[\alpha, \beta]$ 为摄像机像素焦距; γ 为畸变系数; $[u_0, v_0]$ 为主点坐标; K 称为摄像机内参数; R 为旋转矩阵; t 为平移向量; $[R, t]$ 称为摄像机外参数.

左右摄像机相对位置与左右摄像机外参数关系为

$$\begin{cases} R_{RL} = R_r R_l^{-1} \\ t_{RL} = t_r - R_r R_l^{-1} t_l \end{cases} \quad (3)$$

式中: R_{RL} 为左右摄像机相对旋转矩阵; t_{RL} 为左右摄像机相对平移向量; $[R_l, t_l], [R_r, t_r]$ 分别为左右摄像机外参数.

采用透射投影极线校正算法^[10], 求取左右图像透射投影变换矩阵, 基于双线性插值变换, 分别将左右透射投影变换矩阵作用于左右图像, 完成极线

校正. 经极线校正的投影点满足基本方程为

$$m_r^T K_r^{-T} [t_{RL}]_x R_{RL} K_l^T m_l = 0 \quad (4)$$

式中: m_l, m_r 为空间点在左右图像平面上的投影点; K_l, K_r 分别为左右摄像机内参数.

2.2 自适应权重 Census 变换立体匹配算法

基于左右投影点在一定邻域范围内具有颜色相似的特点, 局部立体匹配算法以邻域匹配代价为相似标准, 求取视差值, 具有计算简便、复杂度低、硬件实现容易等优点. 相较于其它局部立体匹配算法, Census 变换立体匹配算法以中心像素点与其邻域像素点的关系, 替代中心像素点灰度值, 增强了立体匹配的鲁棒性, 改善了匹配精度.

传统 Census 变换立体匹配算法, 以中心像素点 p 与一定邻域窗口 ω_G 映射形成的比特流为 p 点的 Census 变换码, 以左右图像 Census 变换码为基础, 利用汉明距离计算匹配代价, 通过聚合窗口匹配代价求取总匹配代价. 匹配代价越小, 则左右图像的相似度越高. 在一定搜索范围 $d_{\min} \leq d \leq d_{\max}$ 内, 取最小匹配代价对应的视差值为中心像素点视差.

传统 Census 变换立体匹配算法, 过度依赖中心像素点 p 的灰度值, 对噪声敏感度高. 如果中心像素点 p 的灰度值受外界干扰, Census 变换码极易出现明显变化, 使得匹配精度降低. 在 Census 变换时, 仅比较了中心像素点 p 与邻域像素点 q 灰度值的大小, 忽略了灰度值之间的深度差异, 在深度不连续区域易出现误匹配.

ACT 立体匹配算法通过比较中心像素点灰度值 $I(x, y)$ 与其十字灰度均值 $I_a(x, y)$ 的相对大小, 确定 Census 变换时的中心点灰度值 $I_l(x, y)$, 设定比较阈值 T_a , 即

$$I_a(x, y) = (I(x-1, y) + I(x+1, y) + I(x, y-1) + I(x, y+1))/4 \quad (5)$$

$$I_l(x, y) = \begin{cases} I(x, y), & |I(x, y) - I_a(x, y)| \leq T_a \\ I_a(x, y), & |I(x, y) - I_a(x, y)| > T_a \end{cases} \quad (6)$$

在进行比特流的计算时, 根据邻域像素点 q 与中心像素点 p 灰度值深度差异, 为 Census 变换赋予不同的权重, 将比特流的计算改进为

$$\text{str}(x, y) = \bigotimes_{i=-l}^l \bigotimes_{j=-r}^r \text{sign}(I(x+i, y+j) - I_l(x, y)) \cdot C \cdot \exp\left(-\frac{|I(x+i, y+j) - I_l(x, y)|}{\gamma_c}\right) \quad (7)$$

式中: \bigotimes 为位串联符; l, r 分别为 Census 变换窗口 ω_G 高度和宽度的一半; C 为常数因子; γ_c 为色差因子; sign 为符号函数.

鉴于比特流的形式得以改进, 采用绝对距离代替传统 Census 变换立体匹配算法中的汉明距离, 计算匹配代价为

$$\text{Cost}(x, y, d) = \sum_{a=-n}^n \sum_{b=-m}^m |str_l(x+a, y+b) - str_r(x+d+a, y+b)| \quad (8)$$

为提高深度连续区域与深度不连续区域匹配精度, ACT 立体匹配算法在计算匹配代价时, 采用自适应窗口. 定义临近点梯度值为

$$G(p) = \frac{\max\{|I(p) - I(p_1)|, |I(p) - I(p_2)|\}}{\min\{|I(p) - I(p_1)|, |I(p) - I(p_2)|\}} \quad (9)$$

式中: $I(p_1)$, $I(p_2)$ 分别为紧邻中心像素点 p 的左右两像素点灰度值.

比较 $G(p)$ 与设定阈值 T_g 以确定聚合窗口大小. 如果梯度值 $G(p)$ 小于阈值 T_g , 则选用较大聚合窗口 ω_b ; 反之, 则选用较小聚合窗口 ω_s .

2.3 ACT 立体匹配算法优化

ACT 立体匹配算法求得的视差值为像素精度视差. 对离散视差值所对应的匹配代价值, 进行二次拟合, 求取亚像素精度视差 d_{opt} . 为简化计算, 仅利用像素精度视差 d_0 , $d_0 - 1$, $d_0 + 1$ 及其对应的匹配代价值, 计算亚像素精度视差为

$$d_{opt} = d_0 + \frac{\text{Cost}(d_0 - 1) - \text{Cost}(d_0 + 1)}{\text{Cost}(d_0 - 1) + \text{Cost}(d_0 + 1) - 2\text{Cost}(d_0)} \quad (10)$$

图像对的左右视差图存在一定对应关系, 采用左右一致校验算法, 对求取的视差值进行精化, 删除不满足左右一致校验的点, 校验公式为

$$|d_l(x, y) + d_r(x + d_l(x, y), y)| < 1 \quad (11)$$

2.4 空间点三维坐标计算

利用三角测量法计算空间点的三维坐标为

$$\begin{cases} X_w(x, y) = \frac{B \cdot F \cdot (x - u_{l0})}{\alpha_l \cdot d_{opt}(x, y)} \\ Y_w(x, y) = \frac{B \cdot F \cdot (y - v_{l0})}{\beta_l \cdot d_{opt}(x, y)} \\ Z_w(x, y) = \frac{B \cdot F}{d_{opt}(x, y)} \end{cases} \quad (12)$$

式中: (X_w, Y_w, Z_w) 为空间点三维坐标; $[\alpha_l, \beta_l]$ 为左摄像机像素焦距; $[u_{l0}, v_{l0}]$ 为左摄像机主点坐标; B 为左右虚拟摄像机光心距; F 为摄像机像素焦距.

利用空间三维点建立网格, 采用三角剖分法拟合得到曲面, 即为三维重建结果.

2.5 试验验证

在直径 12 mm 圆柱体表面粘贴黑白棋盘格, 采用虚拟双目视觉系统检测获取了标准圆柱体左右图像对, 如图 2a 所示. 基于三维重建算法, 采用 MATLAB 计算图像黑色区域圆柱体表面三维点云, GEOMAGIC 进行曲面拟合, 重建圆柱体表面三

维形貌, 如图 2b 所示, 三维重建算法参数如表 1 所示. 计算圆柱体表面三维形貌宽度的最大值为 12.38 mm, 相对误差为 3.17%; 圆柱体表面高度的最大值为 6.35 mm, 相对误差为 5.83%.

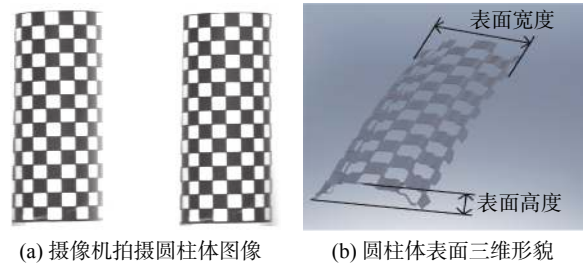


图 2 圆柱体三维重建

Fig. 2 Three-dimensional reconstruction of a cylinder

表 1 三维重建参数

| ω_G | ω_b | ω_s | C | γ_c | T_a | T_g |
|------------|------------|------------|-----|------------|-------|-------|
| 9×9 | 31×31 | 25×25 | 64 | 16 | 18 | 3 |

3 GMA 增材制造熔池形貌三维重建

以 GMA 电弧为热源, 成形设备为松下 PANASONIC 焊机, 填充丝材为直径 1.2 mm 的 H08Mn2Si, 基板材质为 Q235B 低碳钢, 基板尺寸为 200 mm × 120 mm × 10 mm. 堆积层长度为 150 mm, 每堆积完一层, 焊枪升高 1.6 mm, 待当前堆积层表面温度降至 120 °C 以下, 开始堆积下一层, 共堆积六层, 相邻层间堆积方向相同. 堆积电流为 130 A, 电弧电压为 21 V, 行走速度为 4 mm/s, 保护气体成分为 95%Ar + 5%CO₂, 气流量为 18 L/min. 成形的多层单道薄壁件如图 3 所示.



图 3 薄壁件成形形貌

Fig. 3 Forming appearance of a thin-walled part

在虚拟双目视觉传感系统 CCD 摄像机镜头前安装波长 685 nm 的滤光片以及透光度 5% 的减光片, 检测堆积层熔池, 采集的熔池图像对如图 4a 所示. 对熔池图像对进行极线矫正, 阈值法提取液态熔池区域, 采用高斯平滑滤波去除熔池图像噪声

点, 基于优化的 ACT 立体匹配算法求取了熔池图像对亚像素精度视差, 如图 4b 所示, 采用三角测量

法重建了 GMA 增材制造熔池表面形貌, 如图 4c 所示, 熔池表面最大宽度为 9.09 mm.



图 4 GMA 增材制造熔池形貌三维重建

Fig. 4 Three-dimensional reconstruction of molten pool in GMA-based additive manufacturing

4 结 论

(1) 基于双棱镜折射原理, 设计了基于单摄像机的虚拟双目视觉传感系统, 使单 CCD 摄像机获得了立体图像对.

(2) 采用平面模板标定法求解了左右虚拟摄像机内外参数及相对位置关系, 基于投射投影极线校正算法完成了图像对的极线校正. 对 ACT 立体匹配算法进行优化, 求取了图像亚像素精度视差, 利用左右一致检验删除图像误匹配点. 重建了标准圆柱体表面部分形貌, 其宽度误差优于 3.17%, 高度误差优于 5.83%.

(3) 以 GMA 增材制造熔池图像对为例, 阈值法提取了液态熔池区域, 基于优化的 ACT 立体匹配算法求取了熔池图像对亚像素精度视差, 重建了熔池表面三维形貌, 实现了熔池形貌的在线检测.

参考文献:

- [1] Williams S W, Martina F, Addison A C, *et al.* Wire+arc additive manufacturing[J]. *Materials Science and Technology*, 2016, 32(7): 641 – 647.
- [2] Ding D H, Pan Z X, Cuiuri D, *et al.* Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 81(1–4): 465 – 481.
- [3] 柏久阳, 王计辉, 林三宝, 等. 铝合金电弧增材制造焊道宽度尺寸预测 [J]. *焊接学报*, 2015, 36(9): 87 – 90.
Bai Jiuyang, Wang Jihui, Lin Sanbao, *et al.* Width prediction of

aluminium alloy weld additively manufactured by TIG arc[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2015, 36(9): 87 – 90.

- [4] Nilsiam Y, Haselhuhn A, Wijnen B, *et al.* Integrated voltage—current monitoring and control of gas metal arc weld magnetic ball-jointed open source 3-D printer[J]. *Machines*, 2015, 3(4): 339 – 351.
- [5] Spencer J D, Dickens P M, Wykes C M. Rapid prototyping of metal parts by three-dimensional welding[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 1998, 212(3): 175 – 182.
- [6] Wang H J, Jiang W H, Ouyang J H, *et al.* Rapid prototyping of 4043 Al-alloy parts by VP-GTAW[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 148(1): 93 – 102.
- [7] Xiong J, Zhang G J, Qiu Z L, *et al.* Vision-sensing and bead width control of a single-bead multi-layer part: material and energy savings in GMAW-based rapid manufacturing[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 41(1): 82 – 88.
- [8] 熊 俊. 多层单道 GMA 增材制造成形特性及熔敷尺寸控制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [9] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330 – 1334.
- [10] Fusiello A, Trucco E, Verri A. A compact algorithm for rectification of stereo pairs[J]. *Machine Vision and Applications*, 2000, 12(1): 16 – 22.

第一作者简介: 尹紫秋, 男, 1993 年出生, 硕士. 主要研究方向为电弧增材制造在线检测. Email: humghy@163.com

通信作者简介: 熊 俊, 男, 博士, 副教授, 博士研究生导师. Email: xiongjun@home.swjtu.edu.cn