

基于数码体视显微镜的微小物体三维重建

刘 奕¹, 郁 梅^{1*}, 崔 力¹, 王一刚^{1,2}, 范胜利^{1,2}

(1. 宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211; 2. 浙江大学宁波理工学院 信息分院, 浙江 宁波 315010)

摘要: 将显微双目系统看作一个整体, 提出了基于极线校正的体视显微镜三维重建方法. 根据平行双目成像原理建立简化的三维重建模型, 实现了对实验物体的三维坐标恢复. 首先, 采用近似欧式极线校正算法校正原始拍摄立体标定图像, 并只需标定2个三维重建参数; 然后用非局部代价聚合匹配算法匹配立体图像得到视差值; 最后根据立体成像几何法得到物体三维重建坐标. 实验结果表明: X 和 Y 方向测量误差为3%, Z 方向测量误差为3.2%~9.1%, 故在允许误差下可用于测量微小物体的三维尺寸.

关键词: 体视显微镜; 平行双目系统; 三维重建; 参数标定

中图分类号: TN911.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2015) 02-0042-06

基于显微镜分析广泛应用于工业、医学、生物学等方面并且发挥着举足轻重的作用, 如薄膜特性分析、外科手术和病毒分析^[1-3]. 利用显微镜对微小物体三维重建, 按显微镜相机成像的数量主要分单目三维重建和多目三维重建. 就单目三维重建, 由于不能够获取深度信息, 一般需要借助精密控制仪器来完成. 王娜等^[4]提出单目下移动精密垂直仪器使物体多层聚焦成像进行三维重建.

Gallo 等^[5]使用可竖直移动和旋转仪器控制单个显微镜头从多个角度以及多个深度来实现对微小文物的重建, 精度能达到0.04%. 然而, 这些单目三维重建方法对实验仪器操作要求较高, 在实际环境中实现难度大而且繁琐. 双目体视显微三维重建是目前的研究热点. Schreier 等^[6]提出在实际成像坐标转化为虚拟无畸变成像坐标上标定后进行三维坐标重建. Li 等^[7]使用精密垂直升降台在竖直方向多次移动标定网格板进行标定后, 再通过最小二乘法重建三维坐标, 最后对三维重建结果进行分析, 得出三维重建误差 Z 方向大于 X 、 Y 方向^[7]. 虽然这些方法都能够进行三维重建且取得较好结果, 但是它们都需要多种精密仪器来实现. Wang 等^[8]提出了弱视差的概念, 建立了独特的光

路结构进行三维重建. 其重建结果比较精确, 但其三维重建参数标定模型很复杂, 而且也需要多个精密仪器共同参与实验. 此外, 也有通过可变光源控制光照强度来对物体进行三维重建. Li 等^[9]使用传统光学显微镜和可控光照提出了一种显微光度立体的方法对物体进行三维重建和测量, 该方法对光源的要求较高.

针对数码体视显微下微小物体的三维重建在相机标定时对每个相机进行复杂繁琐的相机参数标定以及复杂的三维重建模型问题, 笔者根据平行双目成像原理建立了简化的三维重建模型. 首先将非平行图像对极线校正到平行图像对, 然后标定三维重建参数, 最后结合匹配的视差图对实验物体进行三维重建.

1 基于体视显微镜三维重建方法

我们提出的三维重建方法如图1所示. 它不同于一般的显微图像三维重建过程, 需要使用多个精密仪器对每个相机标定相机参数, 再对匹配点对进行三维重建. 我们的方法是直接对实际显微双目系统整体考虑, 让显微双目相机成像处于平行双目成像系统下, 建立简化的三维重建模型对

收稿日期: 2014-03-31.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(61271270); 浙江省自然科学基金(Y1101240); 宁波市自然科学基金(2011A610197, 2011A610200).

第一作者: 刘奕(1990-), 男, 湖南株洲人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 数字音视频技术. E-mail: lewis081@126.com

*通信作者: 郁梅(1968-), 女, 江苏无锡人, 博士/教授, 主要研究方向: 视频通信及图像处理. E-mail: yumei@nbu.edu.cn

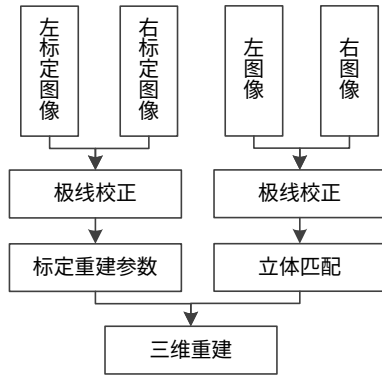


图1 本方法原理

物体进行三维重建。首先使用极线校正算法对原始拍摄的标定图像对进行极线校正, 形成平行双目系统下拍摄的图像对, 再通过实验只需标定2个三维重建参数; 然后对任意拍摄体视显微镜图像对, 通过上一步极线校正算法得到的单应性矩阵进行极线校正; 再使用立体匹配算法求取极线校正后图像对的视差图; 最后采用立体成像几何法对微小物体进行三维重建。

1.1 极线校正

数码体视显微镜理想成像是基于平行双目成像系统^[10], 左、右相机可以采用基于小孔成像原理, 如图2所示。图2中 O_{cl} 、 O_{cr} 分别是左右相机的光心, 通过光心垂直成像面的虚线是光轴, 光轴与相机成像面的交点是主点; b 为基线距离; f 为相机镜头焦距; 世界坐标系 $OXYZ$, Y 轴垂直屏幕指向内部。实际空间中任意一点 $P(X,Y,Z)$ 在左、右相机成像面上分别对应点 $P_l(x_l, y_l)$ 和点 $P_r(x_r, y_r)$ 。

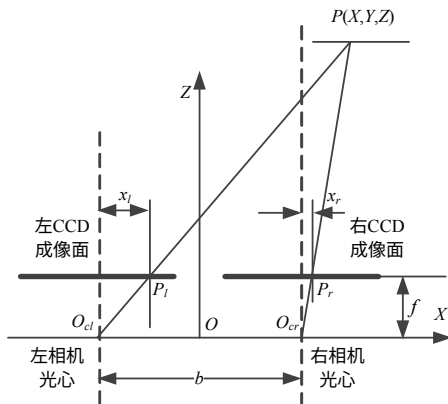


图2 平行双目成像系统

实际中显微镜内部装置安装与理想平行双目系统存在误差, 而且平行光路微小偏移造成显微

放大成像后产生较大的偏移, 表现出同一空间点在立体图像不处于同一竖直坐标, 导致立体匹配消耗大量的时间并且不易进行三维重建。我们将显微双目作为整体, 使用极线校正算法^[11]将左右图像对校正到极线平行, 即同一空间点在图像对上处于同一竖直坐标。极线校正后的图像对等效于平行双目成像系统拍摄的图像对。

1.2 三维重建以及三维重建的参数标定

根据图2平行双目成像系统, 由相似三角形关系可以推出:

$$\begin{cases} x_l / f = (X + b/2) / Z, \\ x_r / f = (X - b/2) / Z, \\ y_r / f = y_l / f = Y / Z, \end{cases} \quad (1)$$

故可得:

$$\begin{cases} X = b(x_l + x_r) / (2d), \\ Y = b(y_l + y_r) / (2d), \\ Z = bf / d, \end{cases} \quad (2)$$

其中: $d = x_l - x_r$ 为视差。

显然, 为了求取空间点的三维坐标, 必须得到立体图像匹配点坐标 $P_l(x_l, y_l)$ 和 $P_r(x_r, y_r)$, 基线距离 b 以及焦距 f 和 b 的乘积。我们将 b 和 bf 作为三维重建参数。

对于不同深度的两点, 设其 Z 坐标为 Z_1 和 Z_2 , 由(2)式中第3个式子可以得到:

$$\Delta Z = Z_1 - Z_2 = bf \frac{d_2 - d_1}{d_2 d_1}. \quad (3)$$

由(3)式可知, 如果已知2个点的深度差 ΔZ 及这2个点的视差值 d_1 和 d_2 , 即可标定三维重建参数 b 与 f 的乘积。标定步骤为: 首先用速度快且鲁棒性优异的加速鲁棒特征(Speed Up Robust Feature, SURF)算法^[12]寻找标定立体图像对的特征点对, 该算法基于尺度空间理论使用一个 Hessian 矩阵来近似, 并使用积分图像大幅减少了运算; 然后用近似最邻近快速库(Fast Library for Approximate Nearest Neighbors, FLANN)算法^[13]匹配特征点对; 再用随机抽样一致(Random Sample Consensus, RANSAC)算法^[14]剔除误匹配点对; 最后根据正确的匹配点对, 对2个已知高度的标定物体分别求平均视差, 再结合已知实际高度求取参数 b 与 f 的乘积。

对于同一个平面上两点, 设其 X 坐标分别为 X_1 、 X_2 。同一个平面上所有像素点的视差是相同的,

用 d_1 表示, 由(2)式中第 1 个式子可以得到:

$$\Delta X = X_1 - X_2 = b \frac{x_{l1} + x_{r1} - x_{l2} + x_{r2}}{2d_1}, \quad (4)$$

同理可得:

$$\Delta Y = Y_1 - Y_2 = b \frac{y_{l1} + y_{r1} - y_{l2} + y_{r2}}{2d_1}, \quad (5)$$

故

$$\Delta D = \sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2} = b / (2d_1) \cdot \sqrt{(x_{l1} + x_{r1} - x_{l2} + x_{r2})^2 + (y_{l1} + y_{r1} - y_{l2} + y_{r2})^2}. \quad (6)$$

由(6)式物理意义可知, 如果已知同一平面两点的实际距离 ΔD , 而且这两点在左、右相机图像正确匹配, 即可标定三维重建参数 b . 此标定步骤采用手动点点和自动方法来得到立体图像对的匹配点对坐标. 先点左图已知长度的两点坐标; 然后根据此平面的视差来求取右图对应点坐标; 最后根据已知两点的长度和两点在立体图像的坐标求取参数 b .

1.3 立体匹配

立体匹配是寻找同一空间点在立体图像对应的成像点坐标. 根据三维重建公式((2)式), 视差对于三维重建起着至关重要的作用. 在立体图像极线校正后, 我们用非局部代价聚合匹配算法^[15]求取显微立体图像的视差图. 该算法基于最小生成树建立匹配代价函数和代价聚合, 再通过(Winner Take All, WTA)选取每个图像点匹配聚合代价值最小的视差作为匹配的初始视差值, 最后通过基于最小生成树的后处理方法得到精确的视差值.

2 实验与结果分析

2.1 实验装置

实验平台采用南京波长光电科技有限公司的 ZOOM460N 体视显微镜, 如图 3 所示. 图 3 中底部是体视显微镜下的载物台, 载物台上放置一块 PCB 板, 通过 2 条光路公用的物镜各自传送信息至顶部的 2 个目镜. 目镜直接通过转接口连接到由日本 Watec 公司生产的 2 个型号为 902B 摄像机, 再通过 USB 采样得到每帧 704×576 大小的图像. 另有上海三克激光公司加工的一块标准高度为 460 μm 金属薄片以及一张带有英文字母的名片, 如图 4 所示. 薄片表面有经激光加工的网格, 激光刻线

宽度为 50 μm , 网格每个正方形边长为 1 000 μm . 实验中用载物台的 2 个夹子稳稳夹住薄片, 防止薄片和名片之间产生间隙.

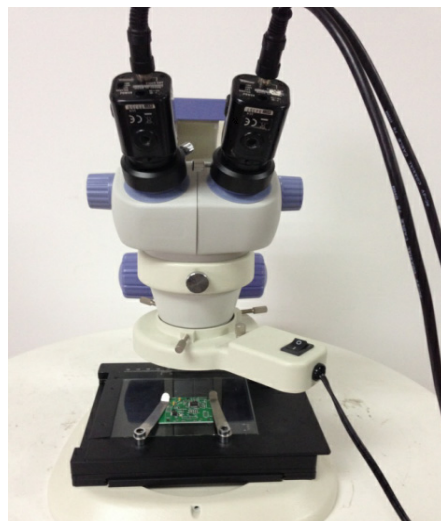


图 3 数码体视显微镜

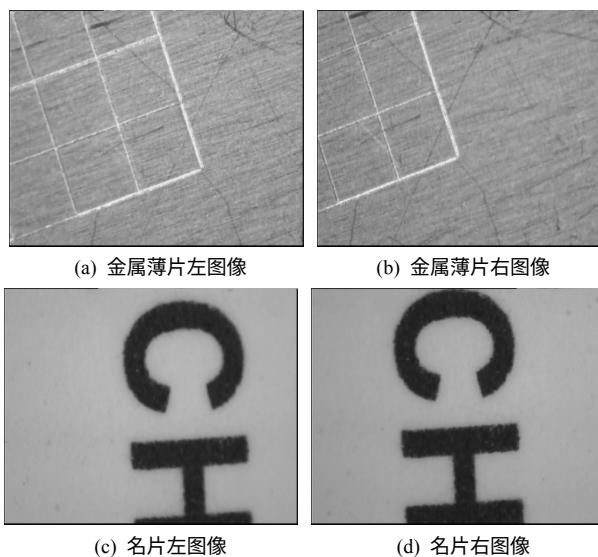


图 4 原始显微立体标定图像

2.2 标定图像对极线校正

从图 4 可以看出, 实际同一空间点经过显微相机成像存在竖直方向位移. 通过采用文献[11]的极线校正算法, 校正结果如图 5 所示. 从图 5 可以看出该算法精确地校正了立体图像, 极线校正后几乎没有竖直方向上的差异, 等效于建立了精确的平行双目成像系统.

2.3 三维重建的参数标定

立体图像正确匹配点对效果如图 6 所示, 得到图 6(a)立体图像平均视差 $d_2=57.309 6$, 图 6(b)立体

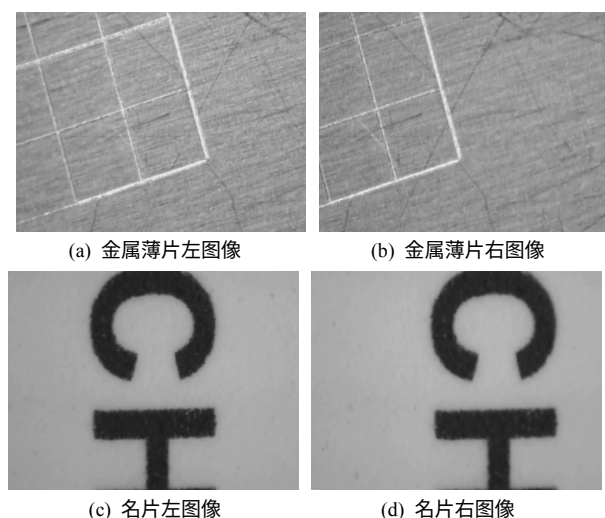


图5 极线校正后的显微立体标定图像

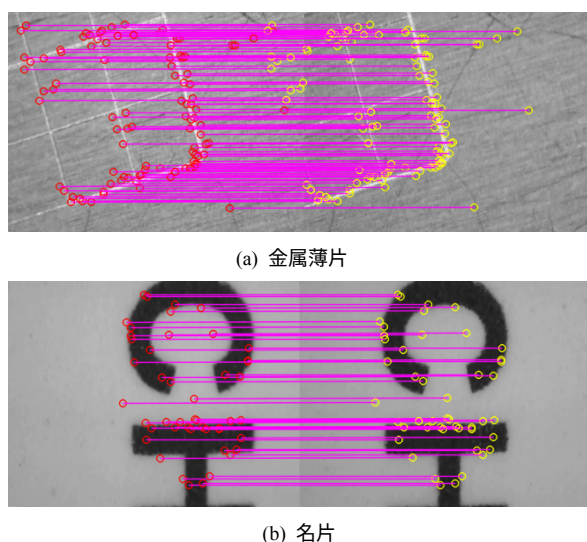


图6 2个平面立体图像的正确匹配点对

图像平均视差 $d_1=43.9505$, 单位为像素. 2个平面实际高度为 $460\text{ }\mu\text{m}$, 代入(3)式求得三维重建参数 $b=86\text{ }730.496\text{ }\mu\text{m}$.

实验得到已知长度匹配点对在立体图像的坐标, 结果见表1.

表1 正方形4个顶点立体图像坐标以及视差

	x_l	x_r	y_l	y_r	d
A_1	123	65.957	113	112.485	57.042
A_2	147	89.908	196	195.176	57.091
A_3	222	163.999	171	170.581	58.001
A_4	199	140.927	89	88.759	58.073

注: x_l 、 x_r 是左、右相机成像横坐标, y_l 、 y_r 是左、右相机成像纵坐标, d 是视差, $A_i(i=1,2,3,4)$ 是薄片表面上4点.

表1中数据单位都为像素. 为了减小误差, 选取了一个网格正方形的4个顶点组成4段等长的长度求平均. 将线段长度 $1\text{ }000\text{ }\mu\text{m}$ 和匹配点对的坐标点代入(6)式, 求得三维重建参数 $b=694.384\text{ }\mu\text{m}$.

2.4 立体匹配与三维重建

为了验证重建三维坐标在整个景深范围的正确性, 加入了2对有高度物体的显微立体图像, 立体图像中物体为焊接在电路板上的不同高度元件A和B, 经极线校正后的立体图像如图7所示.

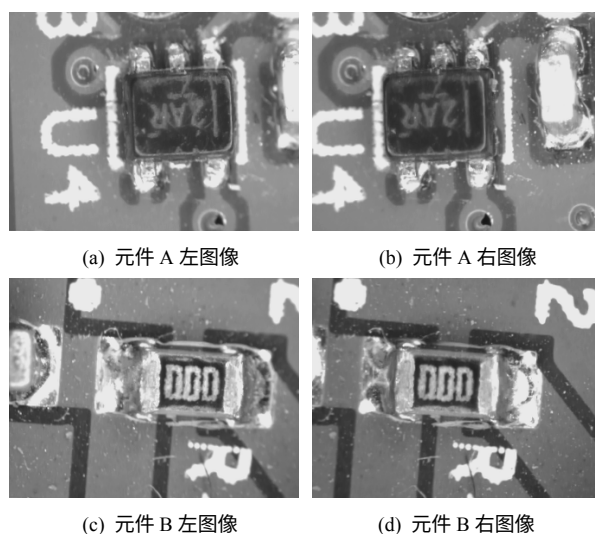


图7 贴片元件极线校正后的显微立体图像

图8是文献[15]匹配算法求得的匹配视差图. 图8(a)是图5(a)、(b)匹配得到的左视差图, 图8(b)是图5(c)、(d)匹配得到的左视差图, 图8(c)是图7(a)、(b)匹配得到的左视差图, 图8(d)是图7(c)、(d)匹配得到的左视差图.

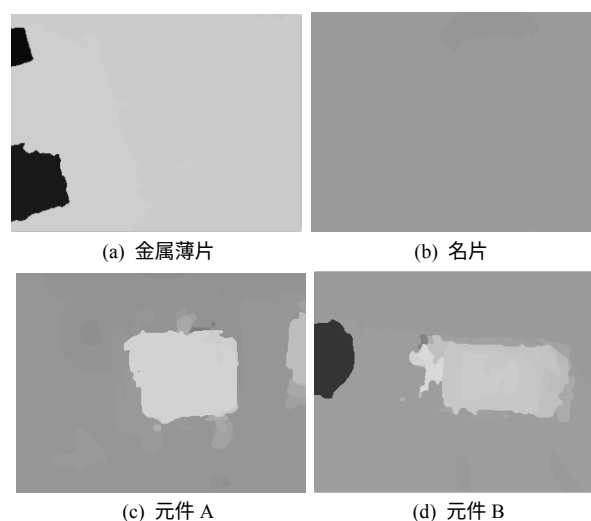


图8 4对显微立体图像左视差

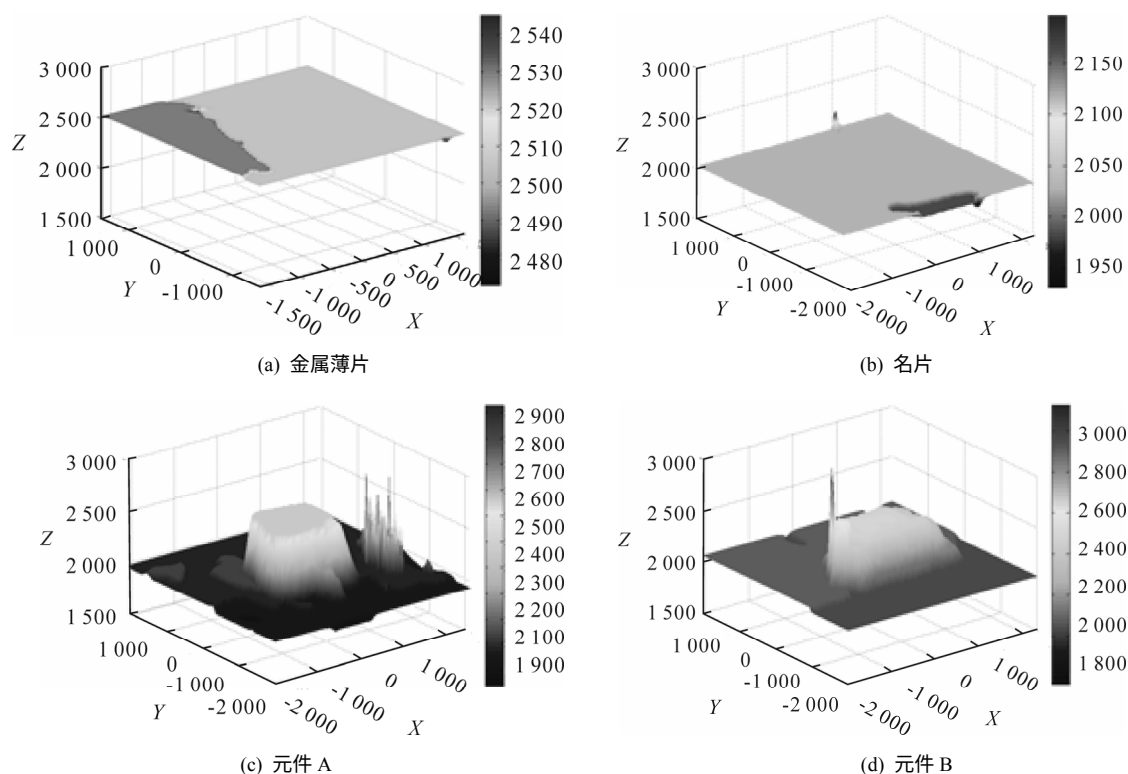


图9 4对显微立体图像三维重建效果

通过前面标定的三维重建参数以及后处理的匹配视差图,得到4对显微立体图像三维重建结果如图9所示.图9(a)是图5(a)、(b)的三维重建效果图;图9(b)是图5(c)、(d)的三维重建效果图;图9(c)是图7(a)、(b)的三维重建效果图,图9(d)是图7(c)、(d)的三维重建效果图.

2.5 结果分析

实验中图9(b)、(c)、(d)实际物体是同一倍率下拍摄,由图9(b)、(c)、(d)三维重建效果图可以看出,重建高度在 $2000\mu\text{m}$ 高度波动,这证明景深范围内清晰成像几乎处于同一最低高度,但是人为控制不能准确地判断从某个位置开始为清晰成像,因此产生如三维重建效果图的误差.三维重建实验中与成像面平行的平面,三维重建之后变成了非平面,如图9(a)、(b)、(c)、(d)所示,误差分别为30、60、80、 $40\mu\text{m}$.这些误差是由于立体匹配视差图的准确度达不到要求,同一高度平面物体得到不同的匹配视差值,造成最后三维重建高度有差异.经过计算,本实验条件下,相差一个整数视差级别,三维重建高度误差达到 $45\mu\text{m}$.

对于平面任意两点的距离,对图5(a)中网格线

段进行测量,实际长度是 $1000\mu\text{m}$,三维重建之后长度为 $1030\mu\text{m}$,误差为3%.对于有高度的物体,图9(a)、(b)实际高度为 $460\mu\text{m}$,三维重建高度为 $475\mu\text{m}$,误差为3.2%;图9(c)、(d)中凸起物体实际高度分别为 660 、 $480\mu\text{m}$,三维重建高度分别为 600 、 $450\mu\text{m}$,误差分别为9.10%和6.25%.

3 结论

本文提出方法的重要特征在于其三维重建过程简单易实现.根据平行双目成像原理,建立了适用于体视显微镜的简易三维重建模型,利用简单的标定物体标定三维重建参数,结合求出视差图进行三维重建.实验对体视显微下微小尺寸物体进行三维重建,并比较实际已知长度与本文算法测量得到的长度.实验结果表明, X 、 Y 方向误差为3%, Z 方向误差为3.2%~9.1%,该方法能在允许误差内对物体进行无接触测量.

参考文献:

- [1] Reingruber H, Zankel A, Mayrhofer C, et al. Quantitative characterization of microfiltration membranes by 3D reconstruction[J]. Journal of Membrane Science, 2011,

- 372(1):66-74.
- [2] Yagi T, Shinoura S, Umeda Y, et al. Surgical rationalization of living donor liver transplantation by abolition of hepatic artery reconstruction under a fixed microscope[J]. *Clinical Transplantation*, 2012, 26(6):877-883.
- [3] Cardone G, Yan X, Sinkovits R S, et al. Three-dimensional reconstruction of icosahedral particles from single micrographs in real time at the microscope[J]. *Journal of Structural Biology*, 2013, 183(3):329-341.
- [4] 王娜, 周权. 光学显微镜下微小物体的三维重构[J]. *光电工程*, 2010, 37(11):84-90.
- [5] Gallo A, Muzzupappa M, Bruno F. 3D reconstruction of small sized objects from a sequence of multi-focused images[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2014, 15(2):173-182.
- [6] Schreier H W, Garcia D, Sutton M A. Advances in light microscope stereo vision[J]. *Experimental Mechanics*, 2004, 44(3):278-288.
- [7] Li K, Wang Q, Wu J, et al. Calibration error for dual-camera digital image correlation at microscale[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(7):971-975.
- [8] Wang Y, Liu J. 3D shape reconstruction of microstructures via micro stereovision[C]//International Conference on Mechatronics and Automation, 2009:1861-1865.
- [9] Li Zhongwei, Li Y F. Microscopic photometric stereo: A dense microstructure 3D measurement method[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2011:6009-6014.
- [10] 高宏伟. 计算机双目立体视觉[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012:131.
- [11] Fusiello A, Irsara L. Quasi-euclidean epipolar rectification of uncalibrated images[J]. *Machine Vision and Applications*, 2011, 22(4):663-670.
- [12] Bay H, Tuytelaars T, Van Gool L. Surf: Speeded up robust features[M]. Berlin: Springer, 2006:404-417.
- [13] Muja M, Lowe D G. Fast approximate nearest neighbors with automatic algorithm configuration[C]//International Conference on Computer Vision Theory and Applications, 2009:331-340.
- [14] Fischler M A, Bolles R C. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. *Communications of the ACM*, 1981, 24(6):381-395.
- [15] Yang Q. A non-local cost aggregation method for stereo matching[C]//Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2012:1402-1409.

New Micro Object Reconstruction Method Based on Digital Stereo Microscope

LIU Yi¹, YU Mei^{1*}, CUI Li¹, WANG Yi-gang^{1,2}, FAN Sheng-li^{1,2}

(1.Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Department of Information, Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315010, China)

Abstract: Due to the difficult and cumbersome camera parameter calibration process in stereo microscopic image reconstruction and the vertical displacement in camera's imaging of the same object caused by small deviation of actual stereo microscope's parallel optic path, a new three-dimensional reconstruction method for stereo microscopic image is proposed in this paper, where epipolar rectification is used by regarding microscope binocular system as a whole. The proposed method uses three-dimensional reconstruction model to recover three-dimensional coordinates of test object with considering the characteristics of parallel binocular imaging principle. To obtain rectified stereo images and calibrate two three-dimension reconstruction parameters, Quasi-Euclidean epipolar rectification algorithm is utilized into original stereo image. Then, disparity map is obtained by using non-local cost aggregation matching algorithm on rectified stereo image. Finally, according to three-dimensional imaging geometry technique, the coordinates of three-dimension reconstruction are recovered. Experimental results show that for the proposed method, its measurement error in the directions X and Y is about 3% and while one in the direction Z is 3.2%-9.1%, which indicates that the proposed method can be used to measure three-dimensional size of micro object within tolerance error.

Key words: stereo microscope; parallel binocular system; three-dimensional reconstruction; parameter calibration

(责任编辑 史小丽)