

# 应用多相机三维数字图像相关实现口腔印模三维重构

董 帅<sup>1,2</sup> 戴云彤<sup>2</sup> 董萼良<sup>2,3</sup> 康 新<sup>1,4</sup> 何小元<sup>2</sup>

<sup>1</sup>南京理工大学理学院力学与工程科学系, 江苏, 南京 210094

<sup>2</sup>东南大学土木工程学院工程力学系, 江苏, 南京 210018

<sup>3</sup>东南大学江苏省工程力学分析重点实验室, 江苏, 南京 210018

<sup>4</sup>莆田学院机电工程学院机械工程系, 福建, 莆田 351100

**摘要** 基于三维数字图像相关(3D-DIC)方法,采用拼接技术对口腔印模的三维形貌进行了测量。针对具有复杂表面形貌的口腔印模,采用由四个水平布置的相机组成的两个3D-DIC测量子系统,对每个子系统测量得到的局部形貌进行拼接,进而得到口腔印模的整体形貌。与传统的双相机3D-DIC测量方法测量结果进行了比较。实验结果表明,采用本文方法能够较好地重构出复杂的口腔印模的三维形貌,为口腔印模的三维重建提供了一种新的途径,同时也为复杂表面物体的三维形貌测量提供了参考。

**关键词** 测量; 口腔印模; 三维数字图像相关; 拼接

中图分类号 TH74; V556.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0812006

## Three-Dimensional Reconstruction of Dental Impression Based on Multi-Camera Three-Dimensional Digital Image Correlation Method

Dong Shuai<sup>1,2</sup> Dai Yuntong<sup>2</sup> Dong Eliang<sup>2,3</sup> Kang Xin<sup>1,4</sup> He Xiaoyuan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanics and Engineering Science, School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

<sup>2</sup>Department of Engineering Mechanics, School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210018, China

<sup>3</sup>Jiangsu Key Laboratory of Engineering Mechanics, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210018, China

<sup>4</sup>Department of Mechanical Engineering, School of Mechanical & Electrical Engineering, Putian University, Putian, Fujian 351100, China

**Abstract** Based on three-dimensional digital image correlation (3D-DIC) method, the three-dimensional shape of dental impression is measured by mosaic technology. Due to the surface feature of the dental impression is complex, a four camera system is utilized for the measurement. The system is made up of two groups of 3D-DIC subsystems. The local profile is measured by each subsystem and the global morphology is acquired by mosaicking each local profile. Compared with the result of traditional two cameras 3D-DIC method, the proposed method gains a better 3D profile of the complex dental impression, which provides a new way to measure the 3D profile of dental impression, and it also provides reference to the 3D profile measurement of complex surface.

**Key words** measurement; dental impression; three-dimensional digital image correlation; mosaic

**OCIS codes** 120.6650; 100.6890; 100.2000

## 1 引 言

在口腔修复和正畸的治疗过程中,需由医护人员从患者口中取出印模并灌注成石膏模型。由于印模表

收稿日期: 2015-01-25; 收到修改稿日期: 2015-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(11172138)

作者简介: 董 帅(1990—),男,博士研究生,主要从事光测力学方面的研究。E-mail:sdong\_njust@163.com

导师简介: 康 新(1966—),女,博士,教授,主要从事光测力学方面的研究。E-mail:tokangxin@163.com(通信联系人)

面可能携带大量细菌、病毒、真菌等传染性致病微生物,为了防止在制作石膏模型过程中印模对石膏模型、制作者、以及打磨、抛光等医疗设备产生交叉感染,在取出口腔印模后需要对其进行消毒处理,而口腔印模的精确性易受温度、湿度的影响,其精确性又会影响到修复体的精准性,所以需要一种有效的手段来获取口腔印模的三维信息。

光学测量技术因其分辨率高、非接触、无破坏、数据获取速度快等优点而广泛应用于三维形貌测量<sup>[1-7]</sup>,很好地满足口腔印模三维形貌测量的精确性要求。前人的研究大多都是对于灌注好的石膏模型进行三维重建,对于口腔印模三维形貌测量研究的报道较少,但印模消毒以及制作过程中形貌改变将直接影响灌注的石膏模型精确度。武子靖等<sup>[5]</sup>采用栅线投影法对牙冠的三维形貌进行了测量,得到了较好的三维形貌,但是由于印模是一个凹陷型结构,采用栅线投影法对其测量时,可能存在部分栅线被遮挡,从而使得部分牙槽内的信息丢失,而不能较完全地恢复整个印模的形貌。曾一庭<sup>[6]</sup>基于立体视觉的原理对牙冠的模型进行了三维重建,但其对牙颌模型进行特征匹配时,直接采用自然纹理作为特征点进行相关匹配,其精度低于使用大量散斑特征点进行匹配时的精度。马超<sup>[7]</sup>设计了一套基于数字光栅投影方法直接测量口腔内部牙齿三维形貌的微测量系统,但其在实现多角度扫描数据拼接时需要进行手工拼接,会造成扫描曲面的小部分数据缺失,影响牙模的三维形貌恢复精确度。

本文采用的三维数字图像相关(3D-DIC)方法是进行三维形貌测量的较优选择,其在复杂环境中的工程测量已经有了成功的应用和较好的发展<sup>[8-10]</sup>。充分考虑到口腔印模表面曲率较大,且存在较多牙槽,相机的视场和景深等因素,采用了多个相机对口腔印模的三维形貌进行拼接。实验结果表明,采用3D-DIC进行拼接的方法可以较好地恢复口腔印模的三维形貌,为口腔印模三维形貌的测量提供了一种新的方法。

## 2 测量原理

### 2.1 三维数字图像相关

三维数字图像相关是基于双目视觉原理,利用立体匹配技术来实现被测物的三维形貌重建<sup>[11-12]</sup>,采用两个相机从不同角度同时对被测物进行拍摄。首先,利用双目立体视觉原理高精度标定相机,得到两个相机的内参和外参;然后,利用数字图像相关的匹配算法来获取两个相机分别拍摄到的散斑图中对应点的视差信息;最后,利用视差信息和标定信息来重建被测物体的三维形貌。

#### 2.1.1 双目视觉模型标定

左右两相机同时拍摄若干张不同姿态的棋盘格(或圆点)标定靶。然后采用非线性最小二乘优化算法(如Levenberg-Marquart算法)对左、右相机的内参以及相对位置和姿态进行全局优化。

#### 2.1.2 立体匹配技术

立体匹配技术就是要寻找被测物体表面某点在左、右相机所记录图片中的对应点,通常采用二阶形函数来对左、右相机中的变形图像子区进行匹配,即

$$u(x,y) = u_0 + u_x \Delta x + u_y \Delta y + \frac{1}{2} u_{xx} (\Delta x)^2 + u_{xy} \Delta x \Delta y + \frac{1}{2} u_{yy} (\Delta y)^2, \quad (1)$$

$$v(x,y) = v_0 + v_x \Delta x + v_y \Delta y + \frac{1}{2} v_{xx} (\Delta x)^2 + v_{xy} \Delta x \Delta y + \frac{1}{2} v_{yy} (\Delta y)^2, \quad (2)$$

式中  $u(x,y)$  和  $v(x,y)$  分别为变形后图像子区各点的水平位移和竖直位移,  $u_0$  和  $v_0$  分别为变形后图像子区中心点的水平位移和竖直位移,  $\Delta x$  和  $\Delta y$  分别为点  $(x,y)$  到图像子区中心点的水平距离和竖直距离,  $u_x, u_y, v_x, v_y$  分别为图像子区的一阶位移梯度,  $u_{xx}, u_{xy}, u_{yy}, v_{xx}, v_{xy}, v_{yy}$  分别为图像子区的二阶位移梯度。一般采用抗干扰能力较好的最小平方距离相关函数  $C$  来评价变形前后子区的相似程度<sup>[13]</sup>,并采用Newton-Raphson算法进行非线性优化求解。

$$C = \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M \left\{ \frac{f(x,y) - f_m}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x,y) - f_m]^2}} - \frac{g(x',y') - g_m}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x',y') - g_m]^2}} \right\}^2, \quad (3)$$

式中  $M$  为图像子区的半宽,  $f(x,y)$  和  $g(x',y')$  分别为参考图像和变形图像的子区灰度值,  $f_m$  和  $g_m$  分别为参

考图像和变形图像子区的灰度的平均值。

### 2.1.3 三维形貌测量

在对两个相机完成标定后,获得了它们的内外参数,便可以得到两相机各自的投影矩阵  $M_1$  和  $M_2$ ,从而建立图像坐标系和世界坐标系的关系,利用最小二乘法可求得空间点的三维坐标  $(x,y,z)$ ,而三维形貌实质上就是足够多的空间点直接构成或经曲面拟合后构成。

### 2.2 3D-DIC 拼接

3D-DIC在对物体进行测量时,如果被测物体过大、表面曲率过大或者表面形状较为复杂时(如圆柱体、球体、口腔印模等),双相机3D-DIC系统的测量视场不足以满足测量需求。具体以口腔印模的测量为例,由于在口腔上颚处印模存在大曲率,且存在较多牙槽,如图1所示,双相机3D-DIC测量系统可能存在以下问题:

- 1) 两相机的夹角过大,则可能导致印模的上颚突起部分遮挡部分散斑信息,也可能导致牙槽内部被遮挡部分过多,而不能完整地恢复印模的三维形貌;
- 2) 两相机夹角过小,离面的分辨率降低<sup>[11]</sup>,不能准确地恢复印模的三维形貌;
- 3) 镜头的景深有限,而印模在深度方向的尺寸较大,因而在远离测量中心部分易出现散焦的现象。

因此,需要采用两个以上的相机从不同位置拍摄,分别测量被测物的局部形貌,然后用3D-DIC算法计算局部坐标系之间的坐标变换关系,将局部形貌转换至同一坐标系下并拼接得到被测物全场三维形貌<sup>[14]</sup>。

拼接实验的一般过程如图2所示,由3D-DIC子系统1和子系统2分别对区域1和区域2进行测量得到两个区域的局部形貌,然后对交叠区域采用3D-DIC方法,可得到子系统2中的公共区域在子系统1中所对应的三维坐标,根据这些三维坐标可以得到子系统1和子系统2之间的坐标转换关系。然后根据已知的坐标转换关系,对子系统2所测得的三维数据进行坐标系变换,这样得到的交叠区域的三维坐标有两组,需要分别对其进行相应的处理<sup>[15]</sup>。

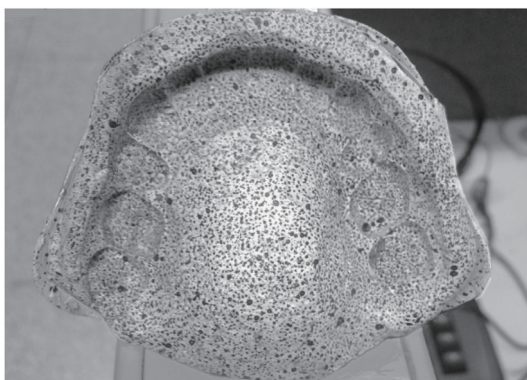


图1 口腔印模模型

Fig.1 Model of dental impression

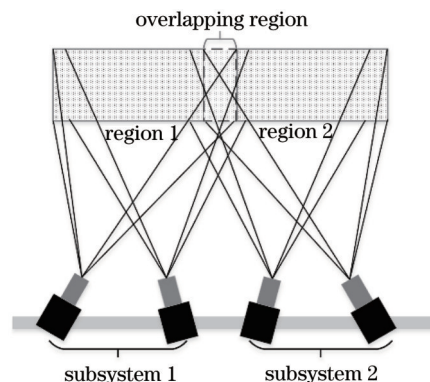


图2 基于3D-DIC形貌拼接原理图

Fig.2 Schematic diagram of profile mosaic based on 3D-DIC

## 3 三维重构实验

### 3.1 实验方案

口腔印模使用中号牙齿托盘的成人口腔真实印模(图1),印模上的散斑采用人工喷漆的方式制作:先将口腔印模表面均匀喷上白漆,再在白漆上随机喷涂黑漆,对于牙槽侧壁等黑漆较难附着区域采用黑色记号笔随机画点的方式来补充散斑。充分考虑到口腔印模的大曲率和多牙槽等特点,选择4个分辨率为2448 pixel × 2048 pixel的PointGrey工业相机RAS-50S5M-C,并配置焦距为25 mm的Kowa镜头,组成了两套3D-DIC的子系统,并采用同步信号触发装置控制这四台相机同步采集。图3为此测量系统在实验室的安装图,口腔印模通过连接磁性表座后固定在Newport光学防振平台上,四个相机通过转接头安装到带有刻度的碳纤维管上。为了比较双相机3D-DIC和四相机3D-DIC对口腔印模进行三维重构时的差别,实验分两步进行:1)使用双相机3D-DIC进行测量时,仅使用1、4相机测量。调节1、4相机的位置,使印模模型尽量充满每个相机的视场[图4(a)],完成散斑图像和标定图像的采集;2)使用四相机3D-DIC进行测量时,调节4个相机的位置,使每个子系统的有效测试区域达到模型的1/2以上[图4(b)]。需要注意的是,每两个相邻的相机都可

以视为一个立体视觉模型,因此对每组相邻的相机都需要单独标定。

实际测量时,为充分利用相机的分辨率,让试件尽可能充满视场,在每个镜头上增加了一个 5 mm 的截圈;为了减少环境光的照射对试件的影响,关闭了室内灯光,采用高亮直流发光二极管(LED)光源照明。

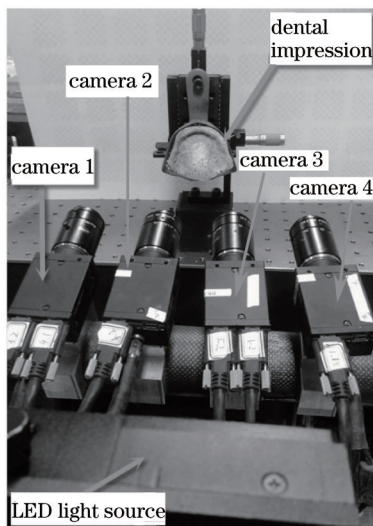


图 3 口腔印模三维形貌测量实验装置图

Fig.3 Experimental setup for 3D profile measurement of dental impression

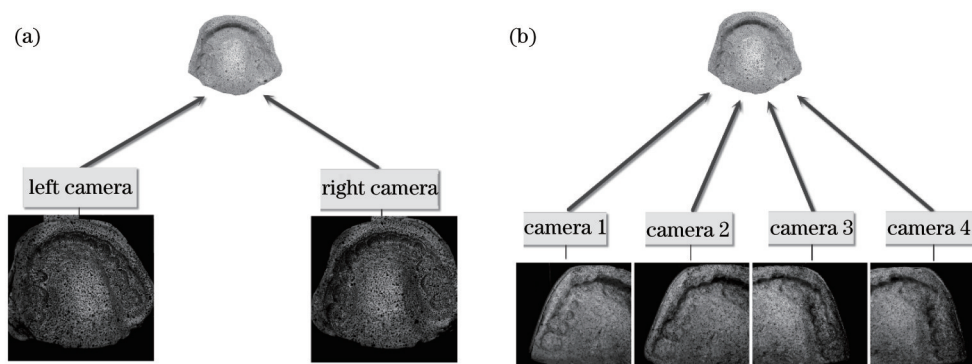


图 4 (a) 双相机测量视场示意图; (b) 四相机测量视场示意图

Fig.4 (a) Diagram of two cameras measurement field; (b) diagram of four cameras measurement field

### 3.2 实验结果分析

图 5 为采用双相机 3D-DIC 测量方法[图 4(a)]时计算所得到的口腔印模三维形貌图。在进行后处理时,根据散斑特征,选择 3D-DIC 的计算模板为 35 pixel,步长为 7 pixel。由图 5 和图 6 可以看出,由于印模形貌复

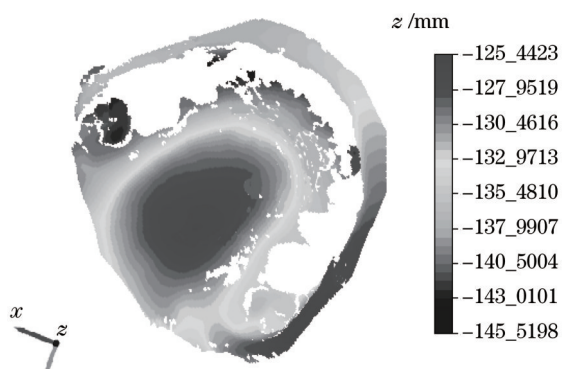


图 5 采用双相机 3D-DIC 计算得到的口腔印模形貌

Fig.5 Profile of dental impression calculated by two cameras 3D-DIC method

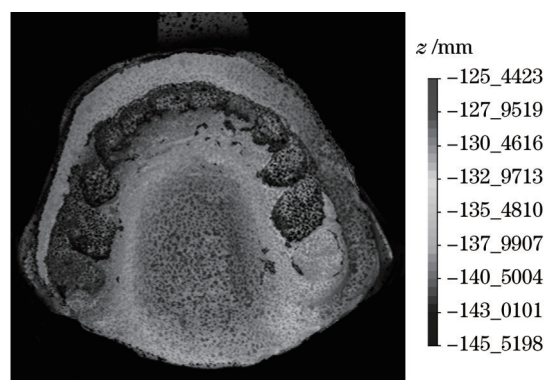


图 6 左相机显示双相机 3D-DIC 的计算结果

Fig.6 Profile result of left camera calculated by two cameras 3D-DIC method

杂、牙槽侧壁曲率过大以及镜头景深不够等原因,印模的三维形貌,尤其是牙槽的形貌不能较好地恢复,因而需要采用多相机拼接的方法来进行测量。

采用多相机拼接的3D-DIC[图4(b)]测量方法时,后处理时选择的模板、步长均和双相机3D-DIC的后处理参数相同。图7为由于子系统1和子系统2分别计算所得的局部模型拼接而成的整体口腔印模模型。从图7可以看出,除少部分牙槽的侧面处由于曲率过大使得其形貌无法恢复之外,其余部分形貌均恢复较好,证明了采用基于多相机拼接的3D-DIC方法对口腔印模形貌进行重构的可行性。牙槽侧壁等少部分地方由于曲率过大,呈现在各相机中的散斑信息太少,影响了相关匹配而不能将三维形貌重构出来,后续增加相机的数量能更好地重构出口腔印模的三维形貌。

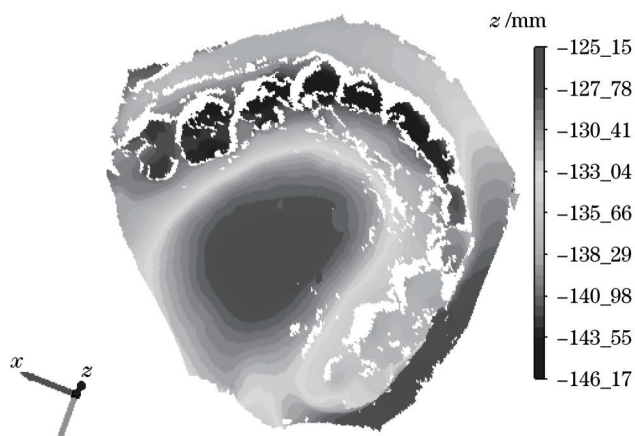


图7 采用四相机3D-DIC进行拼接后的口腔印模形貌

Fig.7 Profile of dental impression calculated by four cameras 3D-DIC method

## 4 结 论

基于三维数字图像相关方法,采用了双相机3D-DIC和四相机拼接的3D-DIC方法分别对口腔印模的形貌进行测量,实验结果表明四相机拼接的3D-DIC方法能有效地对口腔印模的三维模型进行恢复,为口腔印模的变形分析提供了一种有效的手段,同时也为复杂表面的三维形貌测量提供了一种测量方法。该方法是一种全场、无接触的测量方法,能简单方便地测量口腔印模的三维形貌。

## 参 考 文 献

- 1 Kang Xin, He Xiaoyuan. Two-step phase-shifting technique for phase measurement profilometry by grating projection[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(1): 75-79.  
康 新, 何小元. 两步相移实现投影栅相位测量轮廓术[J]. 光学学报, 2003, 23(1): 75-79.
- 2 Zeng Yanan, Wang Fei, Lei Hai, *et al.*. Surface profile measurement of microstructures based on dual-wavelength digital microscopic image-plane holography[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1009001.  
曾雅楠, 汪 飞, 雷 海, 等. 双波长数字显微像面全息术测量微结构表面形貌[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1009001.
- 3 Guo Tong, Li Feng, Ni Lianfeng, *et al.*. Microstructure surface topography measurement based on color images of white light interferometry[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0212003.  
郭 彤, 李 峰, 倪连峰, 等. 基于白光干涉彩色图像的微结构表面形貌测量[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0212003.
- 4 Kou Yunli, Li Enpu, Di Jianglei, *et al.*. Surface morphology measurement of tiny object based on dual-wavelength digital holography[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209010.  
寇云莉, 李恩普, 邸江磊, 等. 利用双波长数字全息术测量微小物体表面形貌[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209010.
- 5 Wu Zijing, Dong Eliang, Chen Yaozhong, *et al.*. Study on three-dimensional (3D) profile measure of the dental crowns based on grating projection[J]. Journal of Southeast University: Medical Science Edition, 2010, 29(5): 494-497.  
武子靖, 董粤良, 陈耀忠, 等. 基于栅线投影法对牙冠三维形貌的研究[J]. 东南大学学报: 医学版, 2010, 29(5): 494-497.
- 6 Zeng Yiting. Research on 3D Reconstruction System for Dental Model Based on Stereo Vision[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.

- 曾一庭. 基于立体视觉的牙模三维重建系统的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- 7 Ma Chao. Research on Dental Measuring Technology and System[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.  
马 超. 牙齿三维测量技术与系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- 8 Nguyen T N, Huntley J M, Burguete R L, *et al.*. Multiple-view shape and deformation measurement by combining fringe projection and digital image correlation[J]. *Strain*, 2012, 48(3): 256-266.
- 9 Liu Cong, Chen Zhenning, He Xiaoyuan. Application of 3D-DIC in experimental study on mechanical properties of civil structures[J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2014, 44(2): 339-344.  
刘 聪, 陈振宁, 何小元. 3D-DIC 在土木结构力学性能试验研究中的应用[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2014, 44(2): 339-344.
- 10 Sun Wei, He Xiaoyuan, Xu Ming, *et al.*. Three-dimensional rigid body displacement measurement based on digital image correlation[J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(2): 34-38.  
孙 伟, 何小元, 胥 明, 等. 数字图像相关方法在膜材拉伸试验中的应用[J]. *工程力学*, 2007, 24(2): 34-38.
- 11 Sutton M A, Orteu J J, Schreier H W. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*[M]. New York: Springer, 2009: 70-271.
- 12 Pan Bing. Research on Digital Image Correlation with Its Application in Experimental Mechanics[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007.  
潘 兵. 数字图像相关方法及其在实验力学中的应用[D]. 北京: 清华大学, 2007.
- 13 Pan Bing. Recent progress in digital image correlation[J]. *Experimental Mechanics*, 2011, 51(7): 1223-1235.
- 14 Zhu Feipeng, Lei Dong. Study on mosaic of three-dimensional profile based on three-dimensional DIC[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2013, 34(3): 470-474.  
朱飞鹏, 雷 冬. 基于三维数字图像相关的三维形貌拼接研究[J]. *力学季刊*, 2013, 34(3): 470-474.
- 15 Meng Fanwen, Wu Lushen. Registration of unorganized point clouds by inheriting and optimizing algorithm[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(4): 825-831.  
孟凡文, 吴禄慎. 用继承与优化算法精密拼接无序点云[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(4): 825-831.

栏目编辑: 苏 岑