

文章编号 1004-924X(2014)04-0884-06

复杂铸件的三维测量

李旭东¹, 孙 健¹, 姜宏志^{1*}, 赵慧洁¹, 冯伟庆², 鞠长滨²

(1. 北京航空航天大学 精密光机电一体化教育部重点实验室, 北京 100191;

2. 沈阳飞机工业(集团)有限公司, 沈阳 110000)

摘要:针对复杂铸件尺寸大, 结构复杂, 槽、腔多, 测量时需兼顾测量效率和槽腔可测性的特点, 提出了一种大视场双目光栅测量子系统和小视场光栅测量子系统相结合的立体视觉测量方法。该方法使用前者测量复杂铸件的外部可测部分; 使用后者测量复杂铸件的槽腔等被遮挡部分。建立了两个测量子系统的数据库模型, 给出了数据库模型参数的定标方法。最后, 通过实验验证了该方法的可行性。实验结果表明: 该系统测量数据库模型的均方根误差(RMSE)为 0.22 mm, 满足复杂铸件测量的精度要求。相比传统测量方法, 该方法兼顾了测量复杂铸件速度快和可以灵活测量槽腔等被遮挡部分的特点, 对工程应用具有实际指导意义。

关键词:计算机视觉; 复杂铸件; 三维测量; 数据库模型

中图分类号: TP391.4; TP242.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142204.0884

3D measurement for complex castings

LI Xu-dong¹, SUN Jian¹, JIANG Hong-zhi^{1*}, ZHAO Hui-jie¹, FENG Wei-qing², JÜ Chang-bin²

(1. Key Laboratory for Precision Optical-mechanical Technology of the Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110000, China)

* Corresponding author, E-mail: jhzl1862@126.com

Abstract: As complex castings are characterized by larger sizes, complex structures and so many sheltered cavities, it is difficult to measure with higher efficiency and better measurability. Therefore, this paper proposes a stereo vision method combined a large-field binocular measuring subsystem with a small-field grating measuring subsystem. The former was used to measure the outer of the complex castings and the latter was used to measure the cavities of the complex castings. A data registration model for the two subsystems was established and also a method to calibrate the model parameters was proposed. The proposed method was validated by experimental tests. It is proved that the proposed method is suitable for measuring complex castings and the data registration Root Mean Square Error (RMSE) is 0.22 mm. Compared with traditional methods, this method has higher measuring velocity and can measure the complex castings with sheltered cavities. In conclusion, the research has great significance in applications.

Key words: computer vision; complex casting; 3D measurement; data registration

收稿日期: 2013-09-24; 修订日期: 2013-11-07.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2012AA041205); 科工技[2010]1536 号

1 引言

复杂铸件可节约材料和加工成本,已广泛应用于飞机、船舶、汽车等制造业中,其工艺成为制造技术发展的方向之一。目前,受铸造工艺水平的限制,复杂铸件加工完成后还要进行加工余量分配和工艺优化,而保证这两个过程顺利完成的关键是复杂铸件三维形貌数据的获取。由于复杂铸件具有尺寸大,结构复杂,多槽、腔等特点,在其形貌测量时要同时兼顾测量效率和槽腔可测性。

光学三维测量技术具有非接触、精度高、效率高等优点^[1],如德国的 ATOS 测量系统^[2]。该系统基于光栅测量原理,通过多视场数据拼接来完成复杂铸件的三维形貌测量,但它无法有效测量复杂铸件的槽、腔等部分。加拿大形创公司的 Metra SCAN 系统^[3]通过手持扫描仪来获取被测工件的部分三维形貌,同时使用一个双目视觉传感器来跟踪测量手持式扫描设备的姿态和进行手持式扫描设备多视场数据的拼接;但其测量视场小,测量速度慢。目前,国内外开展了大量的相关研究,北京航空航天大学的张广军^[4]、天津大学的黄凤山^[5]和中国海洋大学的解则晓^[6]等都研究了光笔式视觉测量系统,这种测量系统的灵活性较高,但是其测量范围小。意大利比萨大学的 Sandro Barone 研究了一种基于远程跟踪扫描仪的多视场扫描技术^[7],但是由于扫描仪是固定在支架上的,灵活性差。M. Callieri^[8]等研究了基于机器人与扫描仪相结合的测量方法,西安交通大学的刘建伟^[9]等研究了一种基于双目的便携式测量系统,但它们都不能测量复杂铸件的槽腔等被遮挡部分。

因此,本文提出了一种大视场双目光栅测量子系统和小视场光栅测量子系统相结合的测量方法,获取了复杂铸件的整体三维形貌,为其加工余量分析提供高精度数据。

2 系统构建及测量原理

2.1 系统构建

本文采用外差多频相移原理^[10-11],提出了一种由大视场双目光栅子系统和小视场光栅子系统组成的复杂铸件三维形貌测量系统。

大视场双目光栅测量子系统基于双目投影栅相位测量原理^[12],由两个相机、一个投影仪和两个发光二极管(LED)光源组成,其结构如图1所示。在测量系统中,该子系统测量复杂铸件外部的可测部分,得到了该部分在大视场双目光栅测量子系统坐标系下的三维坐标。

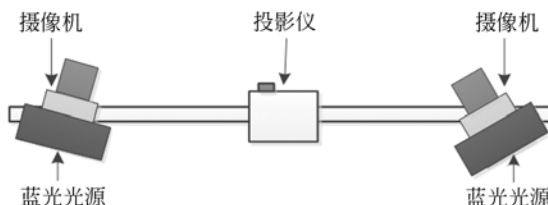


图1 大视场双目光栅测量子系统

Fig. 1 Large-field binocular measuring subsystem

但大视场双目光栅测量子系统难以测量复杂铸件槽腔等内部结构,因此本文设计了一种结构紧凑的单摄像机和投影仪组合的小视场光栅测量子系统,并在其机身上粘贴了回光反射靶标,其结构如图2所示。该子系统测量复杂铸件的槽、腔等被遮挡部分,并得到这些部分在小视场光栅测量子系统坐标系下的三维数据。

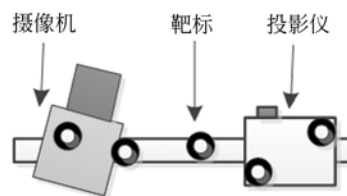


图2 小视场光栅测量子系统

Fig. 2 Small-field measuring subsystem

2.2 数据拼接原理

数据拼接是把两个子系统在各自坐标系下的测量数据配准到统一的全局坐标系下的过程。本文将小视场光栅测量子系统外壳上粘贴的回光反射靶标作为中介,来实现两个子系统测量数据的数据的拼接。

设定测量系统全局坐标系与大视场双目光栅测量子系统坐标系重合为 $O_t-X_tY_tZ_t$,小视场光栅测量子系统坐标系为 $O_s-X_sY_sZ_s$,数据拼接模型如图3所示。

在进行数据拼接时,需要求出 $O_s-X_sY_sZ_s$ 和 $O_t-X_tY_tZ_t$ 之间的转换关系参量旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移向量 \mathbf{T} ,通过式(1)就可以把小视场光栅测量子

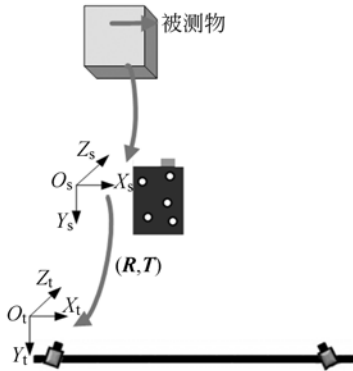


图 3 数据拼接模型示意图

Fig. 3 Model of data registration

系统的测量数据转换到全局坐标系下。

$$\begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \end{bmatrix} = \mathbf{R} \times \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} + \mathbf{T}. \quad (1)$$

令 $P_s = (x_s, y_s, z_s)$, 为小视场光栅测量量子系统测量的三维坐标; $P_t = (X_t, Y_t, Z_t)$, 为转换到全局坐标系下的三维坐标。

为了求解 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} , 在小视场光栅测量量子系统进行测量时, 用大视场光栅测量量子系统拍摄两张小视场光栅测量量子系统上至少 3 个不共线的回光反射靶标, 并解算得到回光反射靶标在大视场光栅测量量子系统下的三维坐标 $T = \{t_i | t_i \in T, i=1, 2, \dots, k\}$ 。假设所有的回光反射靶标在小视场光栅测量量子系统中的三维坐标已知为 $S = \{s_i | s_i \in S, i=1, 2, \dots, l\}$, 再通过距离约束和角度约束匹配出 n 对对应点, T 中对应点为 $P = \{p_i | p_i \in P, i=1, 2, \dots, n\}$, S 中对应点为 $Q = \{q_i | q_i \in Q, i=1, 2, \dots, n\}$ 。此时, 转换关系参量 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 可由式(2)采用 SVD 矩阵分解算法^[13]得到。

$$E = \sum_{i=1}^n \| p_i - (\mathbf{R} \times q_i + \mathbf{T}) \|^2, \quad (2)$$

其中: 数据拼接所需参数 $S = \{s_i | s_i \in S, i=1, 2, \dots, l\}$ 通过参数定标来获得。

3 数据拼接参数定标

数据拼接参数即回光反射靶标在小视场光栅测量量子系统中的三维坐标 $S = \{s_i | s_i \in S, i=1, 2, \dots, l\}$ 的定标, 可通过两个子系统共拍陶瓷球标定板, 同时大视场双目光栅测量量子系统拍摄小视场光栅测量量子系统上的靶标来实现。

设世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 建立在陶瓷球标定板上。两个测量量子系统测得的标定板上球心的三维坐标分别为 (x_t, y_t, z_t) 和 (x_s, y_s, z_s) ; 大视场光栅测量量子系统测量小视场光栅测量量子系统身上靶标在坐标系 $O_t-X_tY_tZ_t$ 中的三维坐标 $(x_t^{\text{trgt}}, y_t^{\text{trgt}}, z_t^{\text{trgt}})$ 。陶瓷球经过三坐标机检定, 球心三维坐标 (X_w, Y_w, Z_w) 。定标原理如图 4 所示。

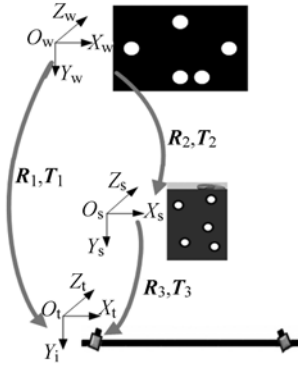


图 4 定标原理示意图

Fig. 4 Principle for data registration parameter calibration

若能得到坐标系 $O_s-X_sY_sZ_s$ 和坐标系 $O_t-X_tY_tZ_t$ 之间的转换关系参量 \mathbf{R}_3 (旋转矩阵) 和 \mathbf{T}_3 (平移向量), 通过式(3)就可计算得到靶标在坐标系 $O_s-X_sY_sZ_s$ 中的三维坐标 (x_s, y_s, z_s) , 即定标出数据拼接参数 $S = \{s_i | s_i \in S, i=1, 2, \dots, l\}$ 。

$$\begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} = \mathbf{R}_3 \times \begin{bmatrix} x_t^{\text{trgt}} \\ y_t^{\text{trgt}} \\ z_t^{\text{trgt}} \end{bmatrix} + \mathbf{T}_3, \quad (3)$$

为求得 \mathbf{R}_3 和 \mathbf{T}_3 , 首先使用四元素法^[12]分别计算得到坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 到坐标系 $O_t-X_tY_tZ_t$ 的转换关系参量 \mathbf{R}_1 (旋转矩阵) 和 \mathbf{T}_1 (平移向量) (参见式(4)), 以及 $O_w-X_wY_wZ_w$ 到坐标系 $O_s-X_sY_sZ_s$ 的转换关系参量 \mathbf{R}_2 (旋转矩阵) 和 \mathbf{T}_2 (平移向量) (参见式(5))。

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \mathbf{R}_1 \times \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} + \mathbf{T}_1, \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \mathbf{R}_2 \times \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} + \mathbf{T}_2, \quad (5)$$

根据式(4)和式(5)可得:

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_1^{-1} \times \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} + (\mathbf{T}_1 - \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_1^{-1} \mathbf{T}_2). \quad (6)$$

根据式(6)可知,坐标系 $O_s-X_sY_sZ_s$ 和坐标系 $O_l-X_lY_lZ_l$ 之间的旋转矩阵 R_3 和平移向量 T_3 分别为:

$$R_3 = R_2 R_1^{-1}, \quad (7)$$

$$T_3 = T_1 - R_2 R_1^{-1} T_2. \quad (8)$$

再根据式(3)就可以得到数据拼接参数 $S = \{s_i | s_i \in S, i=1, 2, \dots, l\}$ 。

4 实验结果与精度分析

4.1 实验系统组成

复杂铸件的三维测量系统的大视场双目光栅测量子系统和小视场光栅测量子系统的实验装置分别如图 5 和图 6 所示。其中,大视场双目光栅测量子系统的工作距离为 1 500 mm,测量范围为 1 200 mm×750 mm×1 000 mm;小视场光栅测量子系统的工作距离为 270 mm,测量范围为 200 mm×180 mm×80 mm。



图 5 大视场双目光栅测量子系统

Fig. 5 Photo of large-field binocular measuring subsystem

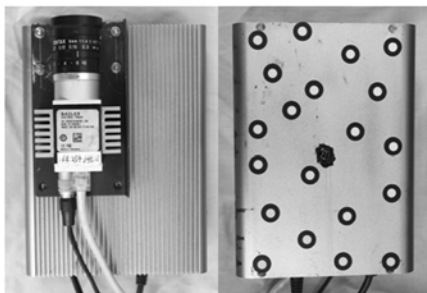


图 6 小视场光栅测量子系统

Fig. 6 Photo of small-field measuring subsystem

测量前首先标定出两个子系统的内外参数,再使用根据提出的数据拼接参数定标方法开发的程序进行参数定标,定标实验如图 7 所示。

数据拼接参数定标过程为:(1)两个子系统共拍陶瓷球标定板;(2)大视场双目光栅测量子系统



图 7 数据拼接参数定标

Fig. 7 Experiment of data registration parameter calibration

拍摄小视场光栅测量子系统上的靶标;(3)两个子系统的测量数据进行三维复现后提取球心,完成球心匹配;(4)提取出拍摄到的靶标三维坐标,利用第 3 节的定标方法得到靶标在小视场光栅测量子系统坐标系中的部分三维坐标,如表 1 所示。

表 1 靶标三维坐标

Tab. 1 3D-coordinates of targets

靶标编号	x/mm	y/mm	z/mm
1	68.560	64.117	-52.286
2	68.483	64.786	3.833
3	66.177	63.105	-139.130
4	60.515	63.444	-105.740
5	40.176	64.679	9.740
6	34.944	63.658	-81.394
7	32.494	64.304	-27.343
8	12.949	62.628	-138.070
9	5.575	63.591	-53.682
10	-8.842	63.667	-27.791

4.2 子系统测量精度评定

为验证系统的测量精度,本文分别对大视场双目光栅测量子系统和小视场光栅测量子系统的测量精度及两个子系统的测量精度进行了实验评定。

大视场双目光栅测量子系统的测量精度评估使用两端带有标志点的基线尺(参见图 8),两特征点间距为 $(1\ 000.661 \pm 0.005)$ mm。将基线尺在大视场双目光栅测量子系统测量范围内任意位



图 8 标尺实物图

Fig. 8 Surveyor's rod

置上放 15 次,共得到 30 组对应观测点。计算得到基线尺的中心间距如表 2 所示。由表可知,基线尺中心间距的均值为 1 000.585 mm,与真实值比较的均方根误差(RMS)为 0.022 mm。

表 2 标尺测量数据

Tab. 2 Measurement data of surveyor's rod (mm)

测量次数	测量长度	测量次数	测量长度
1	1 000.567	9	1 000.616
2	1 000.593	10	1 000.598
3	1 000.603	11	1 000.555
4	1 000.593	12	1 000.559
5	1 000.616	13	1 000.591
6	1 000.616	14	1 000.559
7	1 000.580	15	1 000.551
8	1 000.578	RMS	0.022

为评估小视场光栅测量子系统的测量精度,测量一个 200 mm×150 mm 的标准平面,使用最小二乘法拟合平面,用实测点到拟合平面的距离来衡量测量精度。计算得到测量点到拟合平面的距离标准差为 0.030 mm。

为评估测量系统的数据拼接精度。分别使用两个测量子系统测量一组标准陶瓷球,然后比较测量得到的球心距离(参见表 3)。通过计算得到球心间距离的均方根误差(RMS)为 0.220 mm。

表 3 两个子系统测得的球心距离

Tab. 3 Distance of sphere center measured by subsystems (mm)

测量球编号	球心偏差	测量球编号	球心偏差
1	0.296	6	0.219
2	0.267	7	0.150
3	0.337	8	0.164
4	0.237	9	0.327
5	0.279	10	0.040
		RMS	0.220

由实验结果可知,该系统存在的测量误差略大。误差的来源主要有两个子系统的标定误差、数据拼接参数的定标误差和受姿态测量精度影响的数据拼接误差。因此,标志点的数量、分布对系统精度影响还需要继续优化。

4.3 实物测量实验

为了验证上述测量方法的有效性和可行性,

用提出的测量系统对某机器叶轮进行了测量,叶轮的整体形貌和被遮挡腔体部分如图 9 所示。叶轮尺寸为 250 mm×250 mm×140 mm。

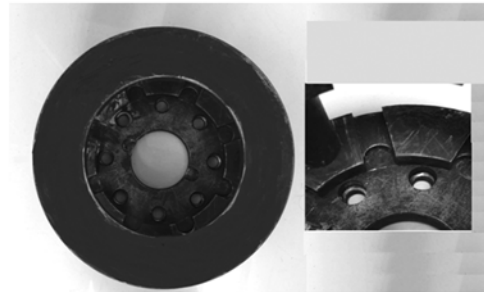


图 9 叶轮实物及细节放大图

Fig. 9 Impeller of measured castings

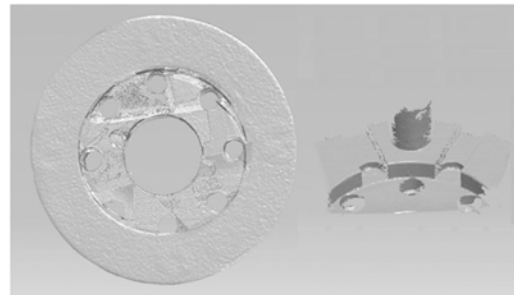


图 10 叶轮测量点云及内部细节放大图

Fig. 10 Measurement result of impeller after 3D-dimensional meshing

测量得到的叶轮三维点云结果如图 10 所示,分别是测得的叶轮整体形貌三维点云和被遮挡部分三维点云。被遮挡部分的测量过程为:小视场光栅测量子系统扫描被遮挡部分,同时大视场双目光栅测量子系统拍摄两幅此时小视场光栅测量子系统上的靶标,然后利用 2.2 节的拼接方法完成两个子系统的测量数据拼接。实验结果表明,该方法单视场的测量时间为 2 s,在本次实验中叶轮正面的测量可以在 1 个视场完成,相比传统测量仪器减少了 5 到 6 个视场;且被测件越大,测量时间的优势越明显。该方法可以有效测量复杂铸件槽腔等被遮挡部分的三维形貌,并提高复杂铸件的测量效率。

5 结 论

本文提出了一种利用大视场双目光栅测量子

系统和小视场光栅测量系统相结合的复杂铸件三维形貌测量方法,解决了槽腔等遮挡部分的测量问题,提高了测量效率,测量数据拼接的均方根误差(RMS)为0.22 mm。通过实验评定了系统

的测量精度,结果表明,两个子系统测得的点云数据能完成自动数据拼接,从而验证了该系统的可行性。该三维形貌测量系统在复杂铸件测量领域具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] SANSONI G, REBES CHI M T, DOCCHIO F. State-of-the-art and applications of 3D imaging sensors in industry, cultural heritage, medicine, and criminal investigation [J]. *Sensors*, 2009, 9 (1): 568-601.
- [2] ATOS compact scan-the compact class of scanning [EB/OL]. [2013-09-01]. <http://www.gom.com/metrology-systems/system-overview/atos-compact-scan.html>.
- [3] Optical CMM scanners: metraSCAN 3D[EB/OL]. [2013-09-01]. <http://www.creaform3d.com/en/metrascan/default.aspx>
- [4] 魏振忠,高明,张广军. 光笔视觉三维测量中光斑图像点立体匹配方法[J]. *光电工程*, 2009, 36(8):46-49. WEI ZH ZH, GAO M, ZHANG G J. Stereo matching of light-spot image points in light-probe 3D vision measurement [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(8):46-49. (in Chinese)
- [5] 黄凤山. 光笔式单摄像机三维坐标视觉测量系统关键技术研究[D]. 天津:天津大学, 2005:1-10. HUANG F SH. *Key Technologies of Single Camera Based Light-probe 3D Coordinates Vision Measurement System* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005:1-10. (in Chinese)
- [6] 解则晓,韩振华,高翔. 光笔式单目视觉测量系统的关键技术[J]. *中国光学*, 2013, 6(5):780-787. XIE Z X, HAN ZH H, GAO X. Key technologies of monocular vision measurement system with light pen[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5):780-787.
- [7] BARONE S, PAOLIN A, RAZIONALE A V. Shape measurement by a multi-view methodology based on the remote tracking of a 3D optical scanner[J]. *Opt. Lasers Eng.*, 2012, 48(2):380-390.
- [8] CALLIERI M, FASANO A, IMPOCO G, et al.. Robosca: an automatic system for accurate and unattended 3D scanning [J]. *Proc. 3DPVT' 04*, 2004:805-812.
- [9] 刘建伟,梁晋,梁新合,等. 大尺寸工业视觉测量系统[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1):126-134. LIU J W, LIANG J, LIANG X H, et al.. Industrial vision measuring system for large dimension workpieces[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1):126-134. (in Chinese)
- [10] 姜宏志,赵慧洁,梁宵月,等. 基于极线校正的快速相位立体匹配方法[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(10):2520-2025. JIANG H ZH, ZHAO H J, LIANG X Y, et al.. Phase-based stereo matching using epipolar line rectification[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10):2520-2025. (in Chinese)
- [11] 姜宏志,赵慧洁,李旭东,等. 用于强反射表面形貌测量的投影栅相位法[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(9):2002-2008. JIANG H ZH, ZHAO H J, LI X D, et al.. Projected fringe profilometry for profile measurement of high reflective surface[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9):2002-2008. (in Chinese)
- [12] 雷彦章,赵慧洁,姜宏志. 一种单双目结合的三维测量方法[J]. *光学学报*, 2008, 28(7):1338-1342. LEI Y ZH, ZHAO H J, JIANG H ZH. A three dimensional measurement method by combining binocular and monocular vision systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(7):1338-1342. (in Chinese)
- [13] EGGERT DW, LORUSSO A, FISCHER R B. Estimating 3-D rigid body transformations: a comparison of four major algorithms[J]. *Mach. Vis. Appl.*, 1997(9):272-290.

作者简介:



李旭东(1974—),男,陕西蓝田人,博士,副教授,1996年、2003年于北京航空航天大学分别获得学士和博士学位,主要从事光电检测及信息处理等方面的研究。E-mail: xdli@buaa.edu.cn

通讯作者:



姜宏志(1978—),男,辽宁辽阳人,博士,讲师,2001年、2004年于大连交通大学分别获得学士、硕士学位,2011年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事视觉三维测量等方面的研究。E-mail: jhz1862@126.com

(本栏目编辑:曹金)

(版权所有 未经许可 不得转载)