

## 基于电磁追踪系统的点云配准方法研究

孟晓亮, 张立晔, 房超

引用本文:

孟晓亮, 张立晔, 房超. 基于电磁追踪系统的点云配准方法研究[J]. 液晶与显示, 2020, 35(12): 1309–1314.

MENG Xiao-liang, ZHANG Li-ye, FANG Chao. Point cloud registration method based on electro-magnetic tracking system[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(12): 1309–1314.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203512.1309>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 高精度视频配准算法中的静态图像配准算法

Static image registration algorithm in high-precision video registration algorithm

液晶与显示. 2020, 35(6): 612–618 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203506.0612>

### 基于OpenMV的智能“寻的”小车控制系统

OpenMV-based intelligent “find” trolley control system

液晶与显示. 2020, 35(8): 870–876 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203508.0870>

### 大中型光立方体及驱动组件建模与仿真

Modeling and simulation of large-medium LED cube and driver components

液晶与显示. 2020, 35(9): 946–954 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203509.0946>

### 液晶偏振变焦透镜组合设计

Design of liquid crystal polarization zoom lens

液晶与显示. 2020, 35(7): 741–748 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203507.0741>

### 一种基于相位相关与子图像的偏振图像配准方法

Polarized image registration method based on phase correlation and sub-graph

液晶与显示. 2019, 34(5): 530–536 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193405.0530>

文章编号:1007-2780(2020)12-1309-06

# 基于电磁追踪系统的点云配准方法研究

孟晓亮, 张立晔\*, 房 超

(山东理工大学 计算机科学与技术学院, 山东 淄博 255049)

**摘要:**针对视觉测量中的点云配准问题,提出一种基于电磁追踪系统的点云配准方法。首先,搭建测量和配准系统,采用基于平面的坐标系转换方法获得世界坐标系与发射器坐标系之间的转换关系。其次,利用发射器和接收器之间准确的位姿信息,获得发射器坐标系和接收器坐标系之间的转换关系。最后,以发射器坐标系作为中间坐标系,将获取的点云由世界坐标系转换到接收器坐标系下,实现点云的粗配准,进而采用 ICP 方法实现精配准。对不同深度的平面进行测量配准实验,并使用石膏像对配准效果进行验证。实验结果表明:粗配准后平面的配准误差在 0.40 mm 以下,精配准后平面的配准误差在 0.04 mm 以下;经过粗配准后的石膏像,采用 ICP 方法进行精配准时其误差能够快速收敛,且精配准后视觉效果良好。

**关键词:**视觉测量;点云配准;电磁追踪系统;坐标系转换

**中图分类号:**TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/YJYXS20203512.1309

## Point cloud registration method based on electro-magnetic tracking system

MENG Xiao-liang, ZHANG Li-ye\*, FANG Chao

(College of Computer Science and Technology,  
Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

**Abstract:** For the point cloud registration problem in the vision measurement, a point cloud registration method based on electro-magnetic tracking system is proposed in this paper. First, the measurement and registration systems are built, and coordinate system transformation relation between world coordinate system and transmitter coordinate system is calculated using coordinate system transformation method based on the flat surface. Second, the accurate position and orientation of the receiver relative to the transmitter are used to calculate the transformation relation of transmitter coordinate system and receiver coordinate system. Finally, transmitter coordinate system is taken as intermediate coordinate system. The point cloud from different view can be transformed from world coordinate system to receiver coordinate system, and the point cloud coarse registration is accomplished, then the Iterative Closest Point (ICP) method is used to conduct the fine registration. The registration experiment is conducted using the flat surface with different depth, and the plaster model is also used to ver-

收稿日期:2020-05-09;修订日期:2020-08-07.

基金项目:山东省自然科学基金 (No. ZR2019BF022)

Supported by Shandong Provincial Natural Science Foundation of China(No. ZR2019BF022)

\* 通信联系人, E-mail: zhangliye@sdut.edu.cn

ify the registration vision effect. The experiment results show that the registration error of the flat surface is below 0.40 mm after the coarse registration, and the registration error of the flat surface is below 0.04 mm after the fine registration. After the coarse registration, the error of the plaster model can converge quickly when we conduct the fine registration using the ICP method, and the vision effect is good.

**Key words:** vision measurement; point cloud registration; electro-magnetic tracking system; coordinate system transformation

## 1 引言

近年来,随着计算机视觉技术的快速发展,结构光三维测量技术也被广泛应用于制造业、医学、机器视觉等领域。对于一个完整的物体,需要从不同视角进行多次测量,然后把它们拼合成一个整体才能反映物体表面的完整信息,这个过程称为点云配准<sup>[1]</sup>,也称为点云拼接。

点云配准按照其配准精度可以分为粗配准(也称初始配准)和精配准。目前,精配准方法中应用最为广泛的是 Besl 等人<sup>[2]</sup>提出的迭代最近点(ICP)算法及其改进算法<sup>[3-4]</sup>,该算法通过迭代最近点作为匹配点,计算获得使点对距离偏差最小的刚性变换,其配准效果的好坏依赖于粗配准的准确度,因此需要先对点云进行粗配准。现有的粗配准方法包括:(1)基于点云自身特征的配准。孟禹等人<sup>[5]</sup>提出一种基于采样球的点云粗配准方法,通过寻找重叠区域内近似重合的 3 个点集,实现点云的粗配准;陆军等人<sup>[6]</sup>采用法向量和曲率加权计算、特征点提取、对应关系筛选方法,提高了配准的准确度和速度;伍梦琦等人<sup>[7]</sup>利用点云的几何特征和图像特征完成了点云的粗配准。此类方法针对点云特征明显的物体可以实现很好的配准,但针对特征较少和重叠区域较小的物体,其配准效果会受影响。(2)基于辅助特征的配准。刘晓利等的<sup>[8]</sup>借助粘贴在被测物体表面的标志点求取坐标系转换矩阵,但该方法不适用于软质物体与易损物体的测量。孙军华等人<sup>[9-10]</sup>使用方格特征的平面靶标,利用方格角点的匹配求取坐标系转换矩阵。魏新国等人<sup>[11]</sup>采用圆形特征的平面靶标作为中介,求解前后测量位置的坐标系转换矩阵。此类方法不影响被测物表面自身的特征,但其测量范围受限,灵活性较低。(3)

基于机械定位的配准。徐永安等人<sup>[12]</sup>借助旋转的转台以实现点云的自动配准,在系统标定准确的情况下,能够得到较好的拼接准确度。但是此类方法的测量范围受限于机械结构的尺寸,系统灵活性较低,且工业现场测量时不便于携带。

综上所述,目前的点云粗配准方法都有一定的局限性。为此,本文提出一种基于电磁追踪系统的点云粗配准方法,利用电磁追踪系统高准确度的位移和姿态角信息,通过不同坐标系间的快速转换,实现点云的快速粗配准,再使用 ICP 精配准方法,实现点云的准确配准。最后,通过配准实验验证所提方法可有效提高粗配准的速度,并为 ICP 精配准提供良好的初值。

## 2 测量及配准系统组成

本文配准过程中使用的被测物点云信息由结构光三维测量系统获得。测量系统由一个工业相机及镜头、一个数字投影机和一台计算机组成,配准系统借助电磁追踪系统的发射器和接收器获取准确的位移和姿态角信息,如图 1 所示。

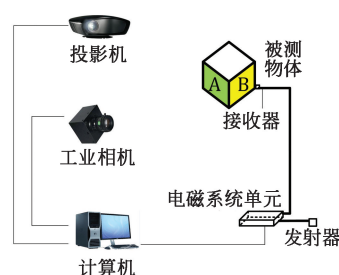


图 1 测量及配准系统示意图

Fig.1 Schematic view of the measurement and registration system

电磁追踪系统(FASTRAK)是美国 Polhemus 公司的一款电磁定位产品,由于其具有设备搭建简单、定位准确度高、速度快等特点,能

实时返回准确的位移和姿态角信息。本文将借助该系统实现点云的粗配准。电磁追踪系统主要由电磁系统单元、发射器和接收器等组成。

电磁追踪系统的发射器发射电磁波,接收器通过传感器接收电磁波,依据电磁系统单元计算发射器和接收器之间准确的位移和姿态角信息,通过 USB 传输,就可以连接计算机得到接收器相对于发射器的位移( $x, y, z$ )和姿态角( $\gamma, \varphi, \omega$ ) 6 个参数的数据。其中, $x, y, z$  分别为接收器相对于发射器 X 轴、Y 轴和 Z 轴的位移。 $\gamma$  为绕发射器 Z 轴旋转的角度, $\varphi$  为绕发射器 Y 轴旋转的角度, $\omega$  为绕发射器 X 轴旋转的角度。电磁追踪系统的位移准确度为 0.076 mm,姿态角准确度为 0.015°。

### 3 配准原理

本文采用结构光三维测量系统获取点云,并通过平移、旋转被测物体获取不同视角下的点云信息。将接收器与被测物体绑定,则接收器与被测物体之间的运动为刚体运动,通过接收器与发射器之间准确的位移和姿态角信息,发射器坐标系作为中间坐标系,将不同视角下获得的点云由世界坐标系转换到发射器坐标系下,再由发射器坐标系转换到接收器坐标系下,即实现了点云的粗配准。本文以两视角下的点云配准为例,阐述其配准原理。

#### 3.1 基于平面的坐标系转换方法

采用结构光三维测量系统获取的点云都是相对于测量系统标定时的世界坐标系而言。不同的空间坐标系测量同一个平面时,将获得不同的平面方程,而被测量的平面唯一存在。可通过获取空间某一平面上的点云分别在世界坐标系和发射器坐标系中的拟合平面求解坐标系之间的转换关系。

首先,获取空间平面在世界坐标系和发射器坐标系下的平面方程。世界坐标系下,采用结构光三维测量系统,获得平面的点云坐标,利用最小二乘法拟合得到世界坐标系下的平面方程:

$$a_w x_w + b_w y_w + c_w z_w + d_w = 0 \quad (1)$$

发射器坐标系下,让接收器在空间平面上滑动,利用电磁追踪系统软件记录接收器中心点坐标序列,同样采用最小二乘法拟合出平面

方程。由于接收器有一定的尺寸,接收器在测量平面上滑动时,得到的接收器中心点坐标序列所在平面与结构光测量系统拟合得到的平面平行,通过沿法线方向补偿一个深度值即可将两平面重合,并得到发射器坐标系下的平面方程:

$$a_t x_t + b_t y_t + c_t z_t + d_t = 0 \quad (2)$$

其次,在平面上选取 3 组不共线的 3 个点,设在世界坐标系下 3 点分别为  $W_1, W_2, W_3$ ,在发射器坐标系下的 3 点分别为  $T_1, T_2, T_3$ 。在选取这 3 组对应点时,令  $x_w = x_t, y_w = y_t, z_w$  和  $z_t$  的值可根据式(1)和式(2)得到,令

$$C_T = \frac{1}{3}(T_1 + T_2 + T_3) \quad (3)$$

$$C_W = \frac{1}{3}(W_1 + W_2 + W_3) \quad (4)$$

令

$$k_i = T_i - C_W \quad (5)$$

$$k'_i = T_i - C_T \quad (6)$$

式中, $i=1, 2, 3$ ,问题转化为求取如下目标函数:

$$\Sigma^2 = \sum_{i=1}^n \|k'_i - Rk_i\|^2 \quad (7)$$

根据奇异值分解(SVD)理论,有

$$H = \sum_{i=1}^3 k_i k_i'^T \quad (8)$$

可得

$$H = U \Lambda V^T \quad (9)$$

进而可以得到旋转矩阵  $R_{WT}$  和平移向量  $T_{WT}$ :

$$R_{WT} = VU^T \quad (10)$$

$$T_{WT} = C_T - R_{WT}C_W \quad (11)$$

求出  $R_{WT}$  和  $T_{WT}$  后,利用如下公式,将测得的点云由世界坐标系转换到发射器坐标系下:

$$[x_T \ y_T \ z_T]^T = R_{WT} \cdot [x_W \ y_W \ z_W]^T + T_{WT} \quad (12)$$

式中, $[x_T, y_T, z_T]^T$  为发射器坐标系下的点云, $[x_W, y_W, z_W]^T$  为结构光三维测量系统获取的点云。

#### 3.2 发射器坐标系与接收器坐标系转换关系的求取

配准过程中,发射器坐标系作为中间坐标系,因此还需要将点云由发射器坐标系转换到接收器坐标系下,其转换公式如下:

$$\begin{bmatrix} x_R & y_R & z_R \end{bmatrix}^T = R_{TR} \cdot \begin{bmatrix} x_T & y_T & z_T \end{bmatrix}^T + T_{TR} \quad (13)$$

式中,  $\begin{bmatrix} x_R & y_R & z_R \end{bmatrix}^T$  为接收器坐标系下的点云, 且

$$R_{TR} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & \sin\omega \\ 0 & -\sin\omega & \cos\omega \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & -\sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$T_{TR} = \begin{bmatrix} -x & -y & -z \end{bmatrix}^T \quad (15)$$

式中,  $(x, y, z)$  和  $(\gamma, \varphi, \omega)$  可借助电磁追踪系统软件实时获取。

### 3.3 粗配准步骤

(1) 根据 3.1 节中描述的方法, 求取发射器坐标系与世界坐标系的转换关系。

(2) 将接收器与被测物体绑定, 形成刚性连接。并将被测物体放在结构光三维测量系统下进行测量, 获取该视角下的点云信息, 并记为  $(x_A, y_A, z_A)$ , 如图 1 所示, 记录下此时接收器相对于发射器坐标系的位移和姿态角  $(x_1, y_1, z_1, \gamma_1, \varphi_1, \omega_1)$ 。

(3) 对被测物体旋转一定角度, 获取旋转后该视角下的点云信息, 并记为  $(x_B, y_B, z_B)$ , 记录下此时接收器相对于发射器坐标系的位移和姿态角  $(x_2, y_2, z_2, \gamma_2, \varphi_2, \omega_2)$ 。

(4) 将两视角下的点云根据 3.1 节中的方法由世界坐标系转换到发射器坐标系下, 再根据 3.2 节中的方法由发射器坐标系转换到接收器坐标系下, 合并两点云数据, 即实现了点云的粗配准。

### 3.4 ICP 精配准

ICP 算法即迭代最近点算法, 给定两视角下具有部分重叠的点云  $M_A$  和  $M_B$  以及它们之间的初始旋转矩阵  $R_0$  和平移矩阵  $T_0$ 。假设在初始位置, 点云  $M_A$  中任意一点  $M_{Ai}$  和离点云  $M_B$  中的最近一点  $M_{Bi}$  为一对匹配点, 针对  $M_A$  中的所有点查找其在  $M_B$  中的最近点, 然后求取最佳的  $R$  和  $T$ , 使目标误差函数最小。接着更新点云的相对位置, 重复以上过程, 不断迭代, 直至目标误差函数收敛或达到设定值, 这就是 ICP 精配准算法

的计算过程。目标误差函数的表达式如下:

$$f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |M_{Ai} - (RM_{Bi} + T)| \quad (16)$$

式中,  $N$  为匹配点对的个数。

通过本文提出的粗配准方法, 可实现两视角下被测物体的快速粗配准, 为 ICP 精配准提供良好的初值。结合 ICP 精配准方法, 可实现不同视角下点云的准确配准。

## 4 配准实验

本文采用一个大恒工业相机(型号为 DH-HV3151UC, 分辨率为  $2048 \times 1536$ ) 和一个数字投影机(型号为 Infocus 82, 分辨率为  $1024 \times 768$ ) 搭建结构光三维测量系统, 并固定好电磁追踪系统, 通过结构光三维测量方法<sup>[13]</sup> 获取单视角下被测物体的点云信息, 系统各部分位置如图 2 所示。

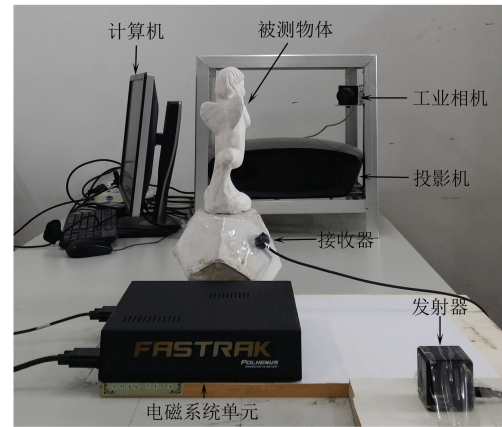


图 2 配准系统组成

Fig.2 Composition of registration system

### 4.1 平面配准实验

为评价本文所提方法的配准误差, 针对不同深度(距离投影机的远近)位置的平面进行有重叠的两视角平移配准实验, 通过计算配准后重叠区域点云最近点距离的平均值来评价配准误差, 并采用 ICP 方法进行精配准, 配准误差结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出, 粗配准后平面的配准误差在 0.40 mm 以下, 经 ICP 精配准后, 配准误差在

0.04 mm 以下,所提粗配准方法能为 ICP 精配准提供良好的初值,验证了所提方法的有效性,且所

提方法可对被测物体进行任意旋转或平移,配准过程更加灵活。

表 1 不同深度平面的配准误差 (mm)

Tab.1 Registration error of the plane with different depth (mm)

| 深度值 | 粗配准误差 | ICP 精配准误差 | 深度值 | 粗配准误差 | ICP 精配准误差 |
|-----|-------|-----------|-----|-------|-----------|
| 800 | 0.244 | 0.027     | 720 | 0.346 | 0.030     |
| 780 | 0.279 | 0.029     | 700 | 0.175 | 0.022     |
| 760 | 0.224 | 0.026     | 680 | 0.299 | 0.027     |
| 740 | 0.107 | 0.018     | 660 | 0.167 | 0.021     |

## 4.2 复杂表面配准实验

为进一步验证本文所提方法的配准效果,采用石膏像作为配准对象,进行两视角下的点云配准实验,配准后的结果如图 3 所示。

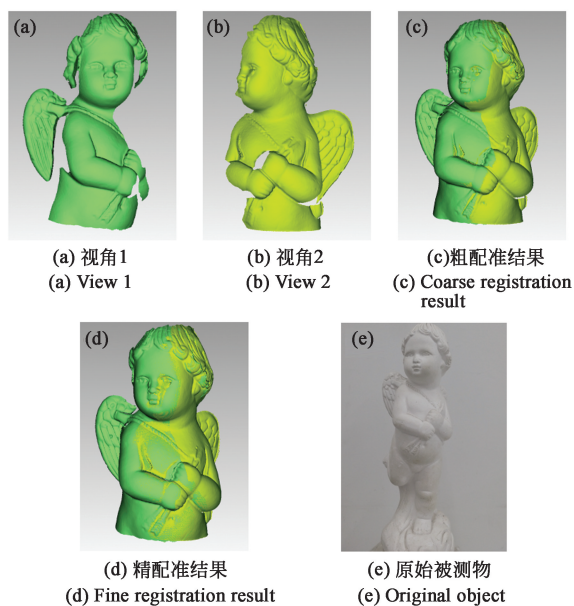


图 3 石膏像配准结果

Fig.3 Registration result of plaster model

图 3(a)和图 3(b)为采用结构光三维测量方法获取的不同视角下的石膏像点云,图 3(c)为采用本文所提粗配准方法进行粗配准后的结果。进行粗配准后,再结合 ICP 精配准方法进行精配准,精配准后的结果如图 3(d)所示。从图中可以看出,精配准后的石膏像视觉效果良好。

精配准后的配准误差和迭代次数的关系如图

4 所示。可以看出,采用 ICP 方法进行精配准的配准误差,在迭代次数为 10 次左右时趋于收敛,配准误差约为 0.04 mm。这也间接地表明本文所提粗配准方法可为 ICP 精配准提供良好的初值,使其在迭代过程中能快速收敛。

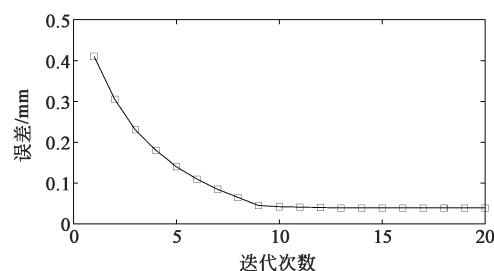


图 4 配准误差和迭代次数的关系

Fig.4 Relationship of registration error and iteration times

## 5 结 论

本文提出一种基于电磁追踪系统的点云配准方法,利用电磁追踪系统发射器和接收器之间准确的位移和姿态角信息,获得坐标系转换矩阵,并提出一种基于平面的坐标系转换方法。配准实验结果表明,本文所提粗配准方法能够为 ICP 精配准提供良好的初值,使 ICP 精配准在迭代过程中能快速收敛,且配准后效果良好,精配准后石膏像的配准误差约为 0.04 mm,验证了本文所提方法的有效性。但由于金属会影响电磁追踪系统的测量准确度,因此目前该方法主要适用于非金属物体表面的配准。

## 参 考 文 献:

- [1] 韩冬松,何昕,魏仲慧,等.采用区域特征匹配的三维弹痕自动配准[J].液晶与显示,2014,29(5):761-767.  
HAN D S, HE X, WEI Z H, *et al.* Automatic registration of 3-D bullet marks by matching regional features [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(5): 761-767. (in Chinese)
- [2] BESL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3-D shapes [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(2): 239-256.
- [3] 马国庆,刘丽,于正林,等.大型复杂曲面三维形貌测量及应用研究进展[J].中国光学,2019,12(2):214-228.  
MA G Q, LIU L, YU Z L, *et al.* Application and development of three-dimensional profile measurement for large and complex surface [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(2): 214-228. (in Chinese).
- [4] PHILLIPS J M, LIU R, TOMASI C. Outlier robust ICP for minimizing fractional RMSD [C]//*Proceedings of the Sixth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*. Montreal: IEEE, 2007: 427-434.
- [5] MENG Y, ZHANG H. Registration of point clouds using sample-sphere and adaptive distance restriction [J]. *The Visual Computer*, 2011, 27(6/8): 543-553.
- [6] 陆军,范哲君,王婉佳.点邻域信息加权的点云快速拼接算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2019,31(7):1238-1246.  
LU J, FAN Z J, WANG W J. Fast point cloud splicing algorithm based on weighted neighborhood information of points [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2019, 31(7): 1238-1246. (in Chinese)
- [7] 伍梦琦,李中伟,钟凯,等.基于几何特征和图像特征的点云自适应拼接方法[J].光学学报,2015,35(2):0215002.  
WU M Q, LI Z W, ZHONG K, *et al.* Adaptive point cloud registration method based on geometric features and photometric features [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0215002. (in Chinese)
- [8] 刘晓利,彭翔,殷永凯,等.借助标志点的深度数据全局匹配方法[J].光学学报,2009,29(4):1010-1014.  
LIU X L, PENG X, YIN Y K, *et al.* A method for global registration of range data combined with markers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(4): 1010-1014. (in Chinese)
- [9] 孙军华,张广军,魏振忠.大型自由曲面移动式三维视觉测量系统[J].仪器仪表学报,2006,27(12):1688-1691.  
SUN J H, ZHANG G J, WEI Z Z. Mobile 3D vision measurement system for large-scale free form surface [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(12): 1688-1691. (in Chinese)
- [10] 张广军,孙军华,魏振忠,等.基于单经纬仪的视觉测量三维数据拼接方法[J].仪器仪表学报,2007,28(3):441-445.  
ZHANG G J, SUN J H, WEI Z Z, *et al.* 3D data registration method based on single theodolite in vision measurement [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, 28(3): 441-445. (in Chinese)
- [11] 魏新国,刘涛,刘震.基于平面圆靶标的三维数据拼接[J].光学学报,2013,33(2):0215002.  
WEI X G, LIU T, LIU Z. Three-dimensional measurement data registration based on planar circle target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0215002. (in Chinese)
- [12] 徐永安,杨钦,怀进鹏.转台中心轴线标定误差分析与修正[J].北京航空航天大学学报,2005,31(8):899-903.  
XU Y A, YANG Q, HUAI J P. Analysis and modification of turntable's axis calibration [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 31(8): 899-903. (in Chinese)
- [13] WANG B Y, YU X Y, WU H B, *et al.* Phase-unwrapping approach based on dual-frequency analog structured light [J]. *Optics Communications*, 2017, 382: 272-280.

## 作者简介:



孟晓亮(1988—),男,山东潍坊人,博士,讲师,2018年于哈尔滨理工大学获得博士学位,主要从事视觉检测与图像处理方面的研究。E-mail: xiaoliang@sdu.edu.cn



张立晔(1986—),男,山东济南人,博士,讲师,2018年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事机器学习与图像处理方面的研究。E-mail: zhangliye@sdu.edu.cn