

文章编号 1004-924X(2014)05-1165-06

## 大尺度钢板的三维测量和拼接

史金龙<sup>\*</sup>, 钱 强, 庞林斌, 王 直, 白素琴  
(江苏科技大学 计算机科学与工程学院, 江苏 镇江 212003)

**摘要:**提出了基于投影的三维测量拼接方法,用于测量大尺度钢板表面的三维形状。首先,利用光学扫描仪、背景投影仪两种装置实现大尺度钢板的三维测量。其中,三维光学扫描仪负责测量大尺度钢板不同部分的三维数据,背景投影仪用于向被测钢板投射背景纹理;然后,利用基于随机抽样一致性算法(RANSAC)的拼接算法,将不同时刻测量的局部三维数据进行拼接,得到完整的钢板三维数据;最后,提出了一种拼接误差的评价方式来检验拼接精度。实验结果表明:所提方法的单次拼接精度为 0.5 mm 左右;测量一个 7.5 m 长的钢板,其累计拼接误差为 2 mm 左右。得到的结果基本满足船舶外板加工的精度要求,具有较高的实用价值。

**关键词:**三维测量;三维拼接;计算机视觉;结构光;大尺度钢板

**中图分类号:**TB92;TP242 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142205.1165

## Three-dimensional measurement and registration for large scale plates

SHI Jin-long<sup>\*</sup>, QIAN Qiang, PANG Lin-bin, WANG Zhi, BAI Su-qin

(School of Computer Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology,  
Zhenjiang 212003, China)

<sup>\*</sup> Corresponding author, E-mail: jlshefudan@gmail.com

**Abstract:** A 3D registration method based on the projection was proposed to align different 3D point clouds for measuring large-scale bending steel plates. First, the 3D measurement of a large-scale bending plate was performed by using a 3D optical scanner and a background projector, in which the 3D optical scanner was used to acquire the dense data of different partial views for the large bending plate and the background projector was used for projecting the background texture on the bending plate to align the point clouds measured at different time. Then, the point clouds were aligned by using the RANdom SAMple Consensus(RANSAC) based registration method and the 3D data measured from different time were registered. Finally, an evaluation method was proposed to verify the registration precision. The experimental results show that the precision of one registration is about 0.5 mm, and the accumulated registration error for measuring a plate with a length of 7.5 mm is about 2 mm. The effectiveness and performance evaluated by the experiments prove that the proposed method can satisfy the requirement of stability and accuracy for the industrial applications.

**Key words:** 3D measurement; 3D registration; computer vision; structured light; large-scale plate

收稿日期:2013-07-10;修订日期:2013-08-27.

基金项目:上海市引进技术吸收与创新项目(No. 12CH-11);江苏省产学研联合创新资金资助项目(No. BY2011143)

## 1 引言

在工业生产中,获取物体的三维形貌非常有意义。学者们提出了多种三维测量方法,用以定量分析物体的三维数据。当前的三维测量方法主要分为被动式测量与主动式测量两类。被动式测量严重依赖于被测物体的表面纹理,测量结果往往比较稀疏且不稳定<sup>[1]</sup>,因此限制了它在工业中的应用;主动式测量是工业生产中常用的测量方法,该方法通过向被测对象投射特定的光,得到稠密并且稳定的表面纹理<sup>[2]</sup>。本文将主动式测量归结为 3 类<sup>[2-10]</sup>:激光测量、飞行时间(Time-of-Flight, TOF)测量、结构光测量。这些方法大多只能测量较小的物体,且应用在特定领域,具有局限性。

在船舶、飞机的加工制造过程中,需要实时监测船舶或者飞机外板表面的三维形状。这种大尺度钢板的三维测量对于船舶、飞机的自动化制造非常重要。然而,现有的三维测量技术无法精确地测量一个大尺度物体。为此,文献<sup>[11]</sup>提出了一种根据相邻测量的重叠区域,利用最小二乘法拼接三维点云的方法。文献<sup>[12]</sup>提出了一种基于虚拟圆柱的三维测量拼接方法。文献<sup>[13]</sup>提出了一种光学扫描仪与立体视觉系统相结合的技术,该技术用光学扫描仪进行分块测量,立体视觉系统远程跟踪三维扫描仪并进行全景拼接。文献<sup>[14]</sup>提出了一种基于光学扫描仪及机械跟踪的测量方法,该方法利用扫描仪分块测量大物体,然后通过机械跟踪坐标进行全景拼接。这些方法的基本思想都是对大物体进行多次测量,然后拼接三维点云。

传统的拼接方法可以总结为以下几种:(1)通过被测物体的几何结构进行拼接,如迭代最近点(ICP)算法<sup>[15-17]</sup>;(2)如果被测物体表面具有丰富的纹理,通过提取并匹配纹理进行拼接<sup>[18]</sup>;(3)在被测物体表面贴上特殊标记,根据标记进行拼接<sup>[13-19]</sup>。

然而,由于船舶、飞机制造等工业领域的大尺度钢板的几何结构非常简单,每一点的曲率几乎是不变的,因此没有足够稳定、可靠的纹理用于拼接;而且被测对象的温度较高,也不能在表面贴标签。鉴于此,本文提出了一种大尺度钢板三维测量

拼接方法,该方法利用投影仪向被测钢板投射复杂纹理,然后利用基于随机抽取一致(Random Sample Consensus, RANSAC)的方法实现拼接。文中还通过实验给出了一种拼接误差的评价方式。该方法更加方便,拼接精度也可以满足工业生产要求。

## 2 测量与拼接方法

本文所用的测量拼接系统主要包括两台高亮度背景投影仪,一台三维扫描仪,和一台用于执行算法处理数据的高性能 GPU 服务器。其中,三维扫描仪由一台高亮度投影仪和两台工业相机组成。在结构光测量<sup>[13]</sup>过程中,三维扫描仪需要沿轨道扫描整个钢板。由于被测钢板较大,一台投影仪的视场无法覆盖被测场景,所以测量系统采用 2 台背景投影仪。这两台背景投影仪的位置相对不变,相对于被测物体表面静止不动,向钢板投射背景纹理。它们投射的背景纹理可以相同,也可以不同。

测量拼接的步骤为:

(1)利用背景投影仪向被测钢板投射复杂纹理,并利用三维扫描仪中的相机拍摄纹理照片,该照片称为背景图片。如图 1 所示,本文采用了随机的中文字符作为背景图片。为了避免干扰,投射纹理时需要关闭三维扫描仪的投影仪。

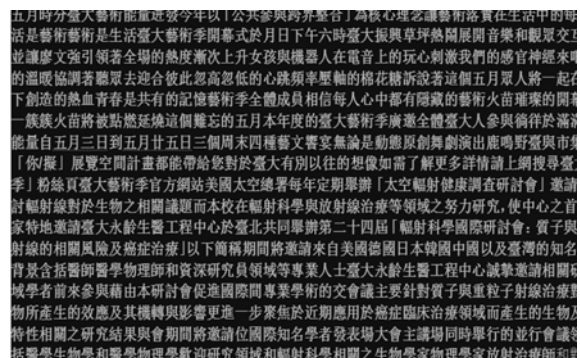


图 1 背景纹理

Fig. 1 Background texture

(2)关闭背景投影仪,用三维扫描仪的投影仪向钢板投射结构光,同时用两台相机拍摄,获得钢板的局部三维数据。

(3)向前移动三维扫描仪,但是需确保相邻扫描区域间的重叠区足够大,以保证拼接精度。重

复步骤(1)和(2),直至整个钢板全部测量后,执行下一步。

(4)在背景图片中提取并匹配特征点,根据背景图片中匹配的特征点来拼接三维扫描仪在不同时刻测得的局部三维数据。

### 2.1 在背景图片中提取并匹配特征点

为了拼接三维点云,需要在相邻的局部测量结果中提取、匹配一些稳定的特征点,过程如图2所示。其中, $G_1$ 和 $G_2$ 分别表示相邻时刻 $t_1$ 和 $t_2$ 的两组测量结果。

首先使用尺度不变特征变换算法(Scale-invariant Feature Transform, SIFT)在背景图片 $I_{BG}^1, I_{BG}^2, I_{BG}^{c1}$ 和 $I_{BG}^{c2}$ 中提取特征。在背景图片 $I_{BG}^1$ 和 $I_{BG}^2, I_{BG}^{c1}$ 和 $I_{BG}^{c2}$ ,以及 $I_{BG}^2$ 和 $I_{BG}^{c2}$ 之间进行特征匹配。根据 $I_{BG}^1$ 和 $I_{BG}^2$ ,以及 $I_{BG}^{c1}$ 和 $I_{BG}^{c2}$ 之间的匹配特征测量 $t_1$ 和 $t_2$ 时刻的部分背景三维点。最后,根据 $I_{BG}^1$ 和 $I_{BG}^{c2}$ 之间的特征匹配获得 $G_1$ 与 $G_2$ 之间的部分匹配三维点。

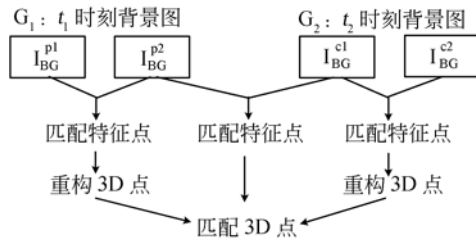


图2 提取匹配特征点

Fig. 2 Extraction of feature points

### 2.2 拼接相邻点云

在得到匹配的三维点后,计算两组测量的拼接变换参数。假设有 $K$ 对匹配的背景三维点对 $\langle p_i^1, p_i^2 \rangle, i \in \{1 \cdots K\}$ ,其中 $p_i^1 = (x_i^{p1}, y_i^{p1}, z_i^{p1})^T, p_i^2 = (x_i^{p2}, y_i^{p2}, z_i^{p2})^T$ 。拼接点云等价于计算 $p_i^1$ 和 $p_i^2$ 之间的变换关系,这种关系可以表示为旋转矩阵 $R$ 及平移向量 $T$ ,分别表示为:

$$R = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$T = (T_1, T_2, T_3)^T. \quad (2)$$

#### 2.2.1 理想拼接方法

假设所有匹配对 $\langle p_i^1, p_i^2 \rangle$ 都是精确的,首先通过计算得到:

$$T = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^k (p_j^2 - p_j^1). \quad (3)$$

然后估计旋转矩阵:

$$R p_j^1 = p_j^2 - T, j \in \{1 \cdots K\}. \quad (4)$$

将旋转矩阵 $R$ 重新表达为 $\mathfrak{R}$ ,即:

$$\mathfrak{R} = (R_{11}, R_{12}, R_{13}, R_{21}, R_{22}, R_{23}, R_{31}, R_{32}, R_{33})^T. \quad (5)$$

则将式(4)转换为:

$$A_j \mathfrak{R} = p_j^2 - T, j \in \{1 \cdots K\}. \quad (6)$$

将 $A_j$ 定义为:

$$A_j = \begin{pmatrix} x_j^{p1} & y_j^{p1} & z_j^{p1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_j^{p1} & y_j^{p1} & z_j^{p1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_j^{p1} & y_j^{p1} & z_j^{p1} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

则有:

$$A = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_K \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$P_T = \begin{pmatrix} p_1^2 - T \\ p_2^2 - T \\ \dots \\ p_K^2 - T \end{pmatrix}. \quad (9)$$

由此推导出:

$$A \mathfrak{R} = P_T. \quad (10)$$

然后,使用线性最小二乘法求解得到:

$$\mathfrak{R} = (A^T A)^{-1} A^T P_T. \quad (11)$$

在理想情况下,采用以上方法即可计算出拼接所需的变换参数。然而在实际中,往往会存在一些错误的匹配,这些错误的匹配会影响 $T$ 和 $R$ 的计算结果。

#### 2.2.2 基于RANSAC的方法

为了移除错误匹配,使算法精确、稳定,本文提出一种基于RANSAC的拼接方法,其步骤为:

(1)从 $K$ 对匹配的背景三维点对 $\langle p_i^1, p_i^2 \rangle$ 中,随机选择3个点,利用式(3)和式(11)计算 $T$ 和 $R$ ;

(2)对于其他 $K-3$ 对匹配点 $\langle p_j^1, p_j^2 \rangle$ ,根据 $T$ 和 $R$ 计算 $p_j^1$ 的变换点 $p_j^{1T}$ ;

(3)计算 $p_j^1$ 与 $p_j^{1T}$ 之间的欧式距离 $d_j^{12}$ ;

(4)如果 $d_j^{12} \leq \delta$ ( $\delta$ 为阈值),就认为 $\langle p_j^1, p_j^2 \rangle$ 是正确的匹配;否则认为是错误的匹配,并将之移除;

(5) 根据  $T$  和  $R$  计算并记录正确匹配的个数;

(6) 返回第一步, 重复执行  $M$  次, 产生  $M$  个集合;

(7) 从  $M$  个集合中选择匹配点数最多的一个集合, 形成新的匹配点对  $\langle p_j^1, p_j^2 \rangle$ , 其中  $j \in \{1 \dots N\}$ ,  $N$  是匹配点的个数;

(8) 根据新匹配  $\langle p_j^1, p_j^2 \rangle$ , 分别利用式(3)和式(11)重新计算  $R$  和  $T$ 。

采用上述方法可以获得精确的  $R$  和  $T$ , 再进行点云拼接即可得到完整的三维测量结果。

### 3 实验结果

本文设计的实验系统如图 3 所示。其中, 三维扫描仪由一台爱普生 EB-C1020XN 视频投影仪及两台佳能 600d 单反相机组成, 相机分辨率为  $4\ 512 \times 3\ 000$ , 相机的焦距是 35 mm; 背景投影仪由两台爱普生 EB-C1020XN 视频投影仪组成; 高性能服务器主要由 3.0 GHz CPU, 8G 内存, 以及两块 GeForce GTX 690 NVIDIA 显卡组成。



图 3 实验系统

Fig. 3 Experimental system

#### 3.1 钢板测量实验

本文对一块尺寸为  $3\text{ m} \times 7.5\text{ m}$  的钢板进行了两次实验测量。

第一次实验测量平滑的钢板, 如图 4(a) 所示。实验中, 对钢板进行 5 次测量, 得到局部点云  $PC_1, PC_2, PC_3, PC_4$  以及  $PC_5$ , 拼接这些局部点云即可得到钢板完整的三维数据。图 4(b)、4(c) 为从不同角度观察到的平滑钢板的三维测量结果 (彩图见期刊电子版)。图中, 不同的颜色区分 5

次测量的局部数据。

第二次实验的目的是进一步验证算法的有效性。实验中, 将平滑钢板进行了较大的变形, 如图 4(d) 所示。图 4(e)、(f) 为不同角度观察到的变形钢板的三维测量结果。

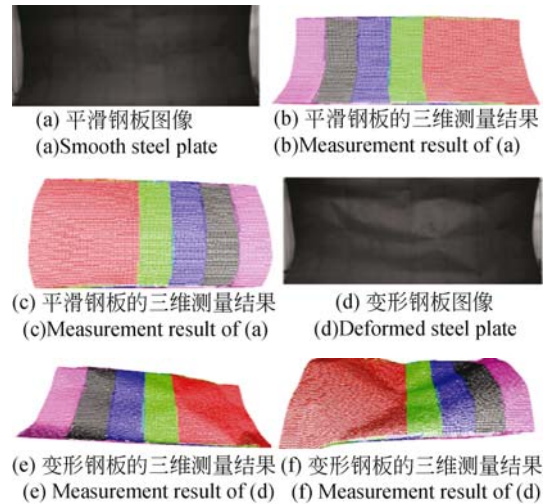


图 4 钢板测量结果

Fig. 4 Measurement results of plates

#### 3.2 拼接误差评估实验

拼接误差会严重影响测量精度, 因此需要评估拼接误差。本文将拼接误差定义为相邻点云重叠区域之间的平均距离, 并且认为平均距离越大, 拼接误差越大。

如图 5 所示, 以两个点云  $PC_1$  和  $PC_2$  的重叠区域为例, 假设  $C_1$  是  $PC_1$  重叠区域上的一个点,  $C_{21}$  和  $C_{22}$  是  $PC_2$  重叠区域上的两个点。

首先, 在  $PC_1$  的重叠区域中找到距离  $C_{21}$  最近的点, 假设为  $C_1$ , 并计算  $C_1$  与  $C_{21}$  之间的距离  $d_1$ ; 然后, 在  $PC_2$  的重叠区域中找到距离  $C_1$  最近的点  $C_{22}$ , 并计算  $C_{22}$  与  $C_1$  之间的距离  $d_2$ ; 最后, 将  $C_1$  到  $PC_2$  的距离定义为  $(d_1 + d_2)/2$ 。

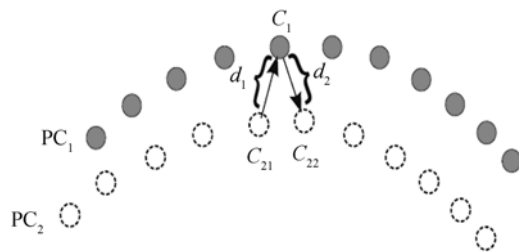


图 5 拼接误差评估

Fig. 5 Evaluation of registration error

采用上述方法可以获得  $PC_1$  重叠区域上的每个点到  $PC_2$  的距离,进而得到重叠区域之间的平均距离。

表 1 重叠区域平均距离的计算结果

Tab. 1 Calculation results of average distance in overlap areas (mm)

重叠区域	平均距离
$PC_1, PC_2$	0.46
$PC_2, PC_3$	0.59
$PC_3, PC_4$	0.38
$PC_4, PC_5$	0.54

表 1 为平滑钢板实验中 4 个重叠区域之间的平均距离。如表所示,每次拼接误差在 0.5 mm 左右,如果 4 次拼接误差偏向同一个方向,那么 4 次拼接的最大累积误差约为 2 mm。拼接误差主要来自以下 3 个方面:

(1)在背景图片中提取、匹配特征点不够精确。由于本文采用了亚像素级的高精度 SIFT 算法<sup>[20]</sup>,可以达到较高的特征提取及匹配精度,因此这方面的因素可以忽略不计。

(2)相机标定误差造成重构的三维点误差较大。由于本文使用了高精度的标定方法<sup>[21]</sup>,因此

这方面的因素也可以忽略不计。

(3)镜头畸变使单次测量的三维数据产生形变。虽然在图像处理时,本文利用畸变消除算法消除了部分镜头畸变产生的图像变形;但是由于系统采用佳能家用相机,相机的镜头畸变系数较大,无法消除全部图像的变形,因此会使测量的三维点云产生形变,从而导致重叠区域不能完全吻合,这也成为误差产生的最主要原因。

## 4 结 论

本文提出了一种大尺度钢板的三维测量拼接方法。该方法使用背景投影仪向被测钢板投射复杂纹理,利用相机拍摄纹理图片,在背景图片中提取特征点,然后根据特征点计算拼接的变换矩阵。实验结果显示,单次测量的拼接误差在 0.5 mm 左右;测量一个 7.5 m 长的钢板时(一般单块船舶外板的尺寸不会超过 7.5 m),4 次测量的最大累积拼接误差约为 2 mm。

目前,船舶外板的三维测量主要以使用样板条、箱的手工测量为主,虽然本文方法还不能实现大尺寸钢板的高精度测量,但足以作为一种辅助测量手段,以减轻测量工作量,节约人力成本。

## 参考文献:

- [1] HIROSHI K H, FURUKAWA R, SAGAWA R, *et al.*. Dynamic scene shape reconstruction using a single structured light pattern [C]. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Anchorage, Alaska, USA:CVPR*, 2008:1-8.
- [2] CHEN F, BROWN G M, SONG M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods [J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(1):10-22.
- [3] MARSHALL F, STUTZ G E. *Handbook of Optical and Laser Scanning* [M]. CRC Press, 2011, 147:28-30.
- [4] KURAZUME R, TOBATA Y, IWASHITA Y, *et al.*. 3D laser measurement system for large scale architectures using multiple mobile robots [C]. *Sixth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, Montreal, Quebec, Canada:3DIM*, 2007:91-98.
- [5] IDAN G J, YAHAV G. 3D Imaging in the studio (and elsewhere) [C]. *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation, San Diego, California, USA:Proc. SPIE*, 2001, 4298(1):48-55.
- [6] SCHUON S, THEOBALT C, DAVIS J, *et al.*. Lidarboost:depth super resolution for TOF 3d shape scanning [C]. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami, FL, USA:CVPR*, 2009:343-350.
- [7] GENG J. Structured-light 3d surface imaging:a tutorial [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, 3(2):128-160.
- [8] LIU Z, SUN J, WANG H, *et al.*. Simple and fast rail wear measurement method based on structured light [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(11):1343-1351.
- [9] ZHANG G, SU X, XIANG L, *et al.*. 3-d shape measurement based on complementary gray-code light [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(4):574-579.

- [10] ZHANG L, SNAVELY N, CURLESS B, *et al.*. Spacetime faces: highresolution capture for modeling and animation [J]. *Data-Driven 3D Facial Animation*, 2007:248-276.
- [11] GUO H, CHEN M. Multiview connection technique for 360-deg three-dimensional measurement [J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(4):900-905.
- [12] HE H, CHEN M, GUO H, *et al.*. Novel multiview connection method based on virtual cylinder for 3-D surface measurement [J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(8):083605-083608.
- [13] BARONE S, PAOLI A, RAZIONALE A V. Shape measurement by a multi-view methodology based on the remote tracking of a 3d optical scanner [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 3(50):380-390.
- [14] PAOLI A, RAZIONALE A V. Large yacht hull measurement by integrating optical scanning with mechanical tracking-based methodologies [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2012, 28(5):592-601.
- [15] BESL P J, MCKAY N D. Method for registration of 3-D shapes [J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(2):239-256.
- [16] 孙军华, 谢萍, 刘震, 等. 基于分层块状全局搜索的三维点云自动配准[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(1):174-180.
- SUN J H, XIE P, LIU ZH, *et al.*. Automatic 3D point cloud registration based on hierarchical block global search [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1):174-180. (in Chinese)
- [17] 王欣, 张明明, 于晓, 等. 应用改进迭代最近点方法的点云数据配准[J]. *光学 精密工程*, 2012, 20(9):2069-2077.
- WANG X, ZHANG M M, YU X, *et al.*. Point cloud registration based on improved iterative closest point method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9):2069-2077. (in Chinese)
- [18] SEITZ S M, CURLESS B, DIEBEL J, *et al.* A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms [C]. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, New York, NY, USA: CVPR*, 2006, 1:519-528.
- [19] 韩建栋, 吕乃光, 王锋, 等. 采用光学定位跟踪技术的三维数据拼接方法[J]. *光学 精密工程*, 2009, 1(17):45-51.
- HAN J D, LÜ N G, WANG F, *et al.*. 3D data registration method based on optical location tracking technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 1(17):45-51. (in Chinese)
- [20] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2):91-110.
- [21] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11):1330-1334.

#### 作者简介:



**史金龙**(1976—), 男, 黑龙江宾县人, 博士, 讲师, 1999 年于华东船舶工业学院获得学士学位, 2005 年于同济大学获得硕士学位, 2012 年于复旦大学获得博士学位, 主要研究方向为机器视觉、软件工程等。E-mail: jlsifudan@gmail.com



**钱强**(1978—), 男, 安徽巢湖人, 硕士, 讲师, 2001 年于安徽大学获得学士学位, 2013 年于江苏科技大学获得硕士学位, 主要研究方向为机器视觉、模式识别。E-Mail: qianqiang\_just@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)