

文章编号 1004-924X(2017)04-1044-06

## 采用可编程逻辑控制器的大型物体三维扫描重建

白素琴<sup>1</sup>, 史金龙<sup>2,3\*</sup>, 钱 强<sup>2</sup>, 王 直<sup>2</sup>

- (1. 江苏科技大学 电气与信息工程学院, 江苏 张家港 215600;
2. 江苏科技大学 计算机科学与工程学院, 江苏 镇江 212003;
3. 南京大学 计算机软件新技术国家重点实验室, 江苏 南京 210023)

**摘要:** 本文提出了一种新颖且实用的三维重建系统, 以获取大型物体的三维数据。文中对该系统的组成以及所采用的方法和原理进行了研究。该系统由一个基于红外的三维扫描仪、两个导轨和一个基于 PLC(可编程逻辑控制器)模块的高精度运动控制系统组成。运动控制系统控制安装在导轨上的三维扫描仪做匀速运动; 三维扫描仪向物体投射红外线, 并重建物体上所投射的红外线段; 接着, 系统根据三维扫描仪的运动速度, 拼接局部重建数据, 最终获得大型物体完整的三维重建数据。实验结果表明: 与基于激光测距拼接的方法相比, 该方法的测量速度约提高了 7 倍, 测量精度约提高了 2.5 倍。基本满足工业生产中大型物体自动三维重建的稳定可靠、精度高、速度快等要求。

**关键词:** 大型; 扫描; 三维重建; 测量

**中图分类号:** TP391.41 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172504.1044

## 3D scanning and reconstruction of large objects based on PLC

BAI Su-qin<sup>1</sup>, SHI Jin-long<sup>2,3\*</sup>, QIAN Qiang<sup>2</sup>, WANG Zhi<sup>2</sup>

- (1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhangjiagang 215600, China;
  2. School of Computer Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China;
  3. State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210023)
- \* Corresponding author, E-mail: jlshifudan@gmail.com

**Abstract:** An innovative and practical 3D reconstruction system was proposed to obtain 3D data of large objects, and the system composition, theory and method were researched. The system is composed by an infrared-based 3D scanner and two guide rails and a high-accuracy motion control system based on Programmable Logic Controller (PLC) module. First, the 3D scanner installed in the guide rail was controlled by the motion control system to move at a constant speed; then, the 3D scanner was used to project infrared ray towards the object and reconstruct the infrared segment projected; finally, based on constant motion speed of the 3D scanner, the system was used to merge the local reconstruction data, thus obtaining complete 3D reconstruction data of the large object. Experiment re-

收稿日期: 2016-10-14; 修订日期: 2016-12-01.

基金项目: 中国博士后科学基金一等资助(2014M560417); 国家自然科学基金面上项目(61471182); 江苏省自然科学基金(BK20130473); 江苏省高校自然科学基金(1134881401, 16KJB520009)

sult indicates that compared with the method based on laser ranging, measuring speed achieved by using this proposed method is improved by approximately 7 times, with a measurement accuracy improved by about 2.5 times. The proposed method can basically satisfy the requirements, such as high reliability, high accuracy and high speed, for auto 3D reconstruction of large objects in industrial production.

**Key words:** Large; scanning; 3D reconstruction; measurement

## 1 引言

制造业中存在很多大型工件,例如飞机或轮船的外壳。为了实现这些大型工件的自动化生产,需要精确、鲁棒、快速地获得这些大型工件的三维形状。近年来研究人员虽然提出了很多方法,但应用到实际的工业生产时,很多方法都存在一定的局限性。目前,三维重建方法主要可分为被动式方法和主动式方法。被动式方法是根据相机拍摄的物体图像,采用图像匹配方法获取物体的三维形状。相关学者提出了很多基于特征匹配的策略,以获取大场景三维数据的被动式方法<sup>[1-2]</sup>。然而,由于被动式方法需要被测物体有丰富的纹理信息,而工业生产中被测工件上的纹理通常较少,因此,被动式方法很难用于工业生产。主动式方法是通过光交互的方式获取物体三维形状的。与被动式方法相比,这种方法能快速、鲁棒地获取稠密的三维数据,因而更能满足工业生产的需求。有些主动式方法,如飞行时间(TOF)方法可以实时获取稠密的三维数据<sup>[3]</sup>,但通常精度很低<sup>[4]</sup>,很难精确获取大型物体的三维数据。大多数主动式方法都采用结构光技术<sup>[5-9]</sup>,过去几十年中,随着结构光技术的发展,主动式方法得到了深入研究,并且广泛应用于工业领域。然而,在大型物体三维重建领域,结构光方法的研究仍不太成熟。近几年有学者提出一些采用结构光重建大型物体三维形状的方法,基本思想是:先重建出不同的局部区域,然后拼接得到大型物体完整的三维数据。根据拼接策略的不同,这些方法可分为:基于形状的方法<sup>[10-14]</sup>、基于跟踪器的方法<sup>[15-17]</sup>、基于标记的方法<sup>[18]</sup>以及基于激光测距的方法<sup>[19]</sup>。

(1)基于形状的方法:文献[10,11]采用 Kinect 获取大场景的局部区域,然后采用 ICP(迭代就近点)算法拼接局部区域。文献[12]也提出了一种使用 Kinect 的大场景重建方法。文献[13]

结合可视特征与形状特征,提出一种三维拼接技术。文献[14]提出基于实时跟踪相机,利用 RGB-D 传感器进行室内环境三维重建的方法。基于形状的方法均可获得不错的重建效果,但都需要被测物体表面有丰富的几何形状。

(2)基于跟踪器的方法:文献[15]提出一种基于跟踪器的方法。该方法使用一个立体跟踪器和一个三维扫描仪进行大型物体的三维重建。其中,三维扫描仪用于重建大型物体的不同局部区域;立体跟踪器用于远程跟踪贴在扫描仪上的跟踪标记,估计扫描姿态,最终实现拼接。当跟踪器与扫描仪之间的距离变大时,立体跟踪器不能清楚地捕获标记,因此该方法的测量范围受限。文献[16]提出了一种结合立体跟踪器和一个三维扫描仪的方法。为了扩大测量范围,该方法采用高亮度的发光二极管(LED)作为跟踪标记。与文献[15]相比,该方法扩大了测量范围,但是当距离进一步增大时,并不能保证该方法的鲁棒性。文献[17]将一个三维扫描仪和一个机器人结合起来,利用激光全站仪跟踪机器人系统的位置,由此提出了一种船体表面的三维重建方法。该方法可以重建大型物体,但由于使用激光全站仪需手动跟踪标记,因此使用起来不是很方便。

(3)基于标记的方法:文献[18]提出一种需要在物体表面放置基准标记的基于标记的方法。这种方法可以准确拼接不同局部区域,但必须使用特殊标记,因此使用起来不太方便。

(4)基于激光测距的方法:文献[19]提出一种结合三维扫描仪和激光测距仪的方法。该方法中,三维扫描仪固定安装在机器手上,而机器手可以随轨道滑动,故三维扫描仪也可沿轨道直线滑动,从而可以重建大型物体的不同局部区域。激光测距仪用于测量移动距离,根据移动的距离,计算三维扫描仪的姿态,实现拼接。

通过调研大型工件的三维重建方法,本文提出了一种重建大型物体的方法。该技术属于主动

式方法,类似于激光测距方法<sup>[19]</sup>,它利用 PLC 运动控制系统控制三维扫描仪以恒定的速度沿直线轨道移动;移动过程中,三维扫描重建红外投线仪投射的线条;之后,系统对扫描线条进行拼接,从而得到大型物体完整的三维数据。该方法不仅能重建纹理稀疏的物体,而且能重建表面平滑的物体,相比于激光测距方法,具有使用鲁棒、快速准确的特点。

## 2 系统介绍

### 2.1 系统构成

如图 1 所示,本系统主要由一个三维扫描仪,两根平行排列的导轨和一个基于 PLC 模块的运动控制系统组成。其中,两条轨道平行放置,三维扫描仪安装在导轨上,并由运动控制系统控制其以恒定的速度移动。三维扫描仪包括一个红外线投线仪和两个立体视觉系统,每个立体视觉系统包括两个工业摄像机。两个立体视觉系统的作用是扩大系统测量范围,如需要测量更大范围的场景,只需增加立体视觉系统数量即可。本系统采用文献[19]描述的方法对两个立体视觉系统进行标定。

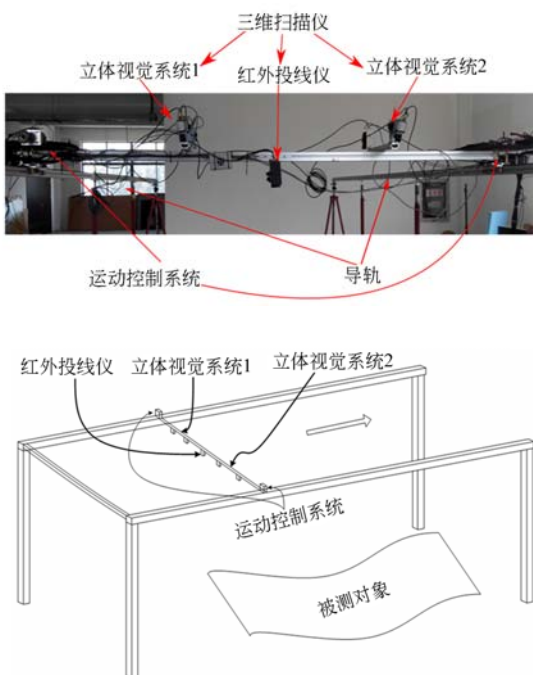


图 1 系统构成及原理示意图

Fig. 1 Illustration of system setup and principle

### 2.2 大型物体的三维重建方法

本系统的重建过程主要包括两个关键步骤:首先由运动控制系统控制三维扫描仪以恒定的速度沿轨道移动,同时,令三维扫描仪扫描并重建红外投线仪投射的线条;然后系统以恒定的速度拼接扫描线条,从而得到完整的大型物体的三维数据。

本系统采用红外投线仪,而没有采用视频投影仪,主要基于四个原因:其一,红外光对人眼无害,而且还减少了可见光对测量结果的影响。因此,更适用于复杂的工业生产环境;其二,高度反光的物体通常会将光反射到摄像机中,从而导致系统不能正确理解捕获的图像。而红外投线仪仅发出一条红外线,不会出现大面积反射。此外,本系统用红外带通滤波器过滤掉没用的光,缩小了摄像机的镜头光圈。在这种条件下,拍摄的图像中,投影线条将非常明亮,因此,可以提高系统精度;其三,摄像机每帧仅拍摄投影线条的部分图像,因此,可以极大地减少图像传输和处理中所需的时间代价,提高系统处理速度;其四,由于三维扫描仪每次仅重建一条线,在校正图像中仅匹配被测物体上的单个线条,因此,相对更容易些,还可以提高系统的鲁棒性。

下面将详细介绍本系统重建过程中的这两个关键步骤。其中,假设摄像机帧率为  $f$  frame/s,三维扫描仪的运动速度为  $m$  mm/s,由此可知,扫描过程中三维扫描仪每隔  $m/f$  mm 重建一条线。

#### 2.2.1 重建一条投影线

本系统中三维扫描仪包括两个立体视觉系统和一个红外投线仪。每个立体视觉系统由两个工业相机组成,如图 2(a)所示。图 2(b)为左、右两相机拍摄到的校正图像示意图,图中的虚线为红外投影线,此时,左、右图像的匹配点位于水平扫描线上。立体视觉系统按照以下 4 个步骤测量投影线:

第一步,利用一维高斯滤波器<sup>[20,21]</sup>,如式(1)所示,对校正图像中的水平扫描线条进行滤波。此处,根据投射的红外光的宽度,设置滤波器的窗口值  $\sigma$ ;

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (1)$$

第二步,在经过滤波后的水平扫描线中,检测灰度值最大的位置,该位置就是投射线中心的初

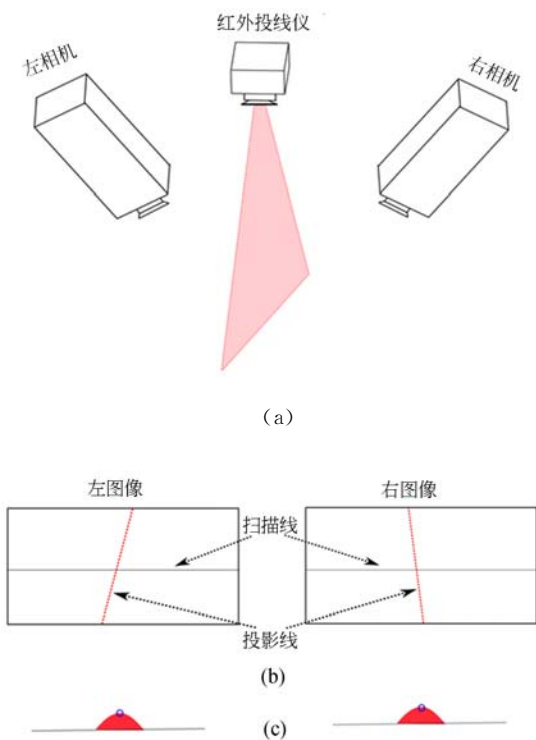


图 2 立体视觉系统工作示意图  
Fig. 2 Illustration of stereo vision system

始值(图 2(c)为一条扫描线的示意图);

第三步,获取更加准确的线条中心:

(1)首先使用初始值周围的相邻像素拟合抛物线。假设利用  $n$  个邻近点拟合抛物线,  $x_i$  表示第  $i$  个邻近点的水平坐标,  $y_i$  表示其对应的像素灰度值,则可以通过优化公式(2)得到拟合的抛物线:

$$E = \sum_{i=1}^n |y_i - (a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2)|^2, \quad (2)$$

其中  $a_0, a_1, a_2$  是抛物线参数。

(2)将抛物线的极值位置作为投影线的精确线条中心,将左、右图像中的线条中心作为一个匹配对;

第四步,根据匹配对,利用三角测量法计算相应的三维坐标。

对立体图像中的所有扫描线,执行以上 4 个步骤,便可以获得整条投影线的三维坐标。当两个立体视觉系统都得到投影线条的三维数据之后,再利用立体视觉系统间的标定参数,将两组线条数据拼接在一起,即可得到一条完整的线条数据。本文假设:  $t$  时刻三维扫描仪获得的一个线条数据有  $p(t)$  个三维点,则相应的三维线可表示

为:

$$X^{s(t)} = (X_1^{s(t)}, \dots, X_i^{s(t)}, \dots, X_{p(t)}^{s(t)}), \quad (3)$$

其中,  $X_i^{s(t)}$  表示  $t$  时刻一个三维点在三维扫描仪坐标系中的齐次坐标。

### 2.2.2 重建物体完整的三维数据

三维扫描仪一次只能重建一条线,为了重建物体完整的三维数据,必须利用运动控制系统移动三维扫描仪,重建多条投影线,然后将重建的多条投影线拼接起来,形成被测物体完整的三维数据。为了提高处理速度,本文假设  $t_k$  时刻,在三维扫描仪拍摄的第  $k$  帧图像中,扫描线的中心位置为  $(x, y)$ ;那么在  $t_{k+1}$  时刻,在扫描仪拍摄的第  $(k+1)$  帧图像中,系统仅在扫描线  $[x - \delta x, x + \delta x]$  内检测投影线极值。其中,  $\delta x$  是一个很小的值,这样检测极值时,搜索空间将大大减小,可以极大地降低检测代价。

在重建出一个物体的多条线之后,下面的关键问题就是如何拼接不同时刻得到的线条数据。实际上,可以将这个问题看成是三维扫描仪的坐标转换。该坐标转换又可以分解成三维扫描仪运动方向和旋转角度的变换。由于三维扫描仪沿轨道做直线运动,因此不会出现旋转,只需计算其运动方向。

重建之前,需要计算出三维扫描仪的运动方向,步骤如下:

第一步,在三维扫描仪下放置一个标定板;

第二步,  $t_0$  时刻,三维扫描仪获得一幅标定板的图像。  $t_1$  时刻把三维扫描仪移动到一个新的位置,并获得此刻的标定板图像;

第三步,利用标定板图像,计算从  $t_0$  到  $t_1$  时刻三维扫描仪位置之间的坐标转换,假设该坐标转换可以用一个旋转矩阵  $\mathbf{R} \in \text{SO}(3)$  和一个平移向量  $\mathbf{T}$  表示。 $\mathbf{R}$  称为移动方向,在扫描过程中不会发生变化。

第四步,为了计算三维扫描仪某个时刻的转换,对进行归一化,获得归一化的转换矩阵  $\mathbf{T}_n$ 。

重建中,按照下列步骤拼接不同的三维线段:

第一步,假设  $t_0$  时刻开始重建物体,将当前三维扫描仪的坐标系认为是全局坐标系;

第二步,三维扫描仪按照  $m \text{ mm/s}$  的速度移动。在  $t_k$  时刻,三维扫描仪获得第  $k$  条三维线条  $X^{s(t_k)}$ ,且  $t_0$  到  $t_k$  时刻三维扫描仪移动的距离为  $(m \times k) / f \text{ mm}$ 。因此,  $t_k$  时刻的平移向量可以表

示为:

$$\mathbf{T}_k = (m \times k / f) \mathbf{T}_n. \quad (4)$$

第三步, 获得  $t_k$  时刻三维线条  $X^{s(t_k)}$  的平移向量  $\mathbf{T}_k$  和旋转向量  $\mathbf{R}$ , 则可以按照公式(5)将  $X^{s(t_k)}$  拼接到全局坐标系。

$$P_{tk} = [\mathbf{R} | \mathbf{T}_k] X^{s(t_k)}. \quad (5)$$

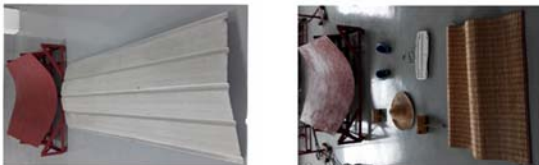
第四步, 三维扫描仪继续移动, 重复步骤二、三, 直到测量结束。最终得到大尺度物体的完整的三维测量数据。

### 3 实验结果及分析

本系统采用 4 个 500 万像素的德国 Baumer 工业相机组成两个立体视觉系统, 相机安装有焦距为 16 mm 的日本 Computar 镜头, 并在镜头上安装 850 nm 滤光片。采用基于 PLC 的外部触发器同步控制拍摄图像。导轨的长度为 8 m。此外, 为评估系统准确性, 本文引入了一台 Leica FlexLine TS09 激光全站仪和两个圆形的反光红外标签。

#### 3.1 三维重建结果

本文完成两个实验, 被测场景的尺寸约为  $6.5\text{m} \times 1.7\text{m}$ , 如图 3 所示。

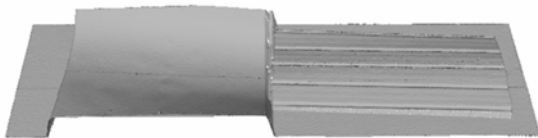


(a) 大型弯曲钢板原图

(b) 复杂大场景图

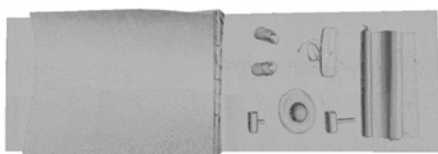
(a) Image of large steel plate

(b) Image of complex and large scene



(c) 图 3(a) 的重建结果

(c) Reconstruction result of Fig. 3(a)



(d) 图 3(b) 的重建结果

(d) Reconstruction result of Fig. 3(b)



(e) 文献[10]得到的图 3(b) 的部分重建结果

(f) 本文算法得到的图 3(c) 的部分重建结果

(e) Partial reconstruction result by Ref. [10] on Fig. 3(b)

(f) Partial reconstruction result by proposed method on Fig. 3(b)

图 3 实验结果

Fig. 3 Experimental results

第一个实验是两个大型弯曲钢板的重建实验, 大型弯曲钢板如图 3(a) 所示, 重建结果如图 3(c) 所示。该实验目的是验证重建平滑且纹理较少的大型物体时, 系统的有效性。

第二个实验: 一个复杂大场景的重建实验, 如图 3(b) 所示, 重建结果如图 3(d) 所示。该实验的目的是验证本系统对于具有自由复杂曲面的大型物体的重建有效性。

此外, 本文采用 Kinect2.0 for windows, 并利用微软 SDK 提供的 Kinectfusion 源代码, 使用文献[10] Kinectfusion 方法得到图 3(b) 中复杂场景的部分重建结果, 如图 3(e) 所示。图 3(f) 为本系统所获得的相应结果。对比图 3(e) 和 3(f) 可知, Kinectfusion 的结果过于平滑, 而本系统所得的结果更接近真实值。

#### 3.2 测量精度和速度分析

为了测试本系统的测量精度和速度, 将本文方法与文献[19]方法进行比较。

(1) 速度方面: 文献[19]手动移动扫描仪, 采用的是时变的结构光技术, 当重建一个局部区域时三维扫描仪必须停下来。因此测量大型物体时, 时间代价较大。相较而言, 本系统由 PLC 模块自动控制, 重建速度更快。实验中, 本系统所用的摄像机帧率是 15 frame/s。运动系统的最大移动速度是 10 cm/s, 因此重建一个长度为 6 m 的物体, 本文方法只需要花费 1 min, 其中采样间隔为  $2/3$  cm。而采用文献[19]方法则需要花费约 7 min。本文方法的速度为文献[19]方法的 7 倍。

(2) 精度方面: 文献[19]是使用激光测距仪计算三维扫描仪姿态的, 而本系统采用的是基于

PLC 模块的运动控制系统。因此,本系统应更加鲁棒、准确。为了评价系统的准确性,本实验把两个反光红外标记贴在一个铁条上,采用3种方法进行测量比较:首先,用激光全站仪测量两个标记之间的欧式距离,并将这个测量结果作为基准数据;然后,分别用本系统(采用文献[15]的方法检测标记中心位置)和文献[19]方法测量标记之间的欧式距离。共进行了5次测量,每次标记贴在铁条的不同位置,测量结果如表1所示。

表1 测量精度比较

Tab.1 Comparison of measurement accuracies

(mm)			
实验	基准值	本系统测量值	文献[19]测量值
1	1 343.5	1 344.2	1 345.2
2	2 621.8	2 622.5	2 623.6
3	3 559.1	3 559.6	3 561.2
4	5 514.3	5 515.1	5 516.2
5	6 742.2	6 743.1	6 443.8
平均误差		0.72	1.82

#### 参考文献:

- [1] VU H H, LABATUT P, PONS J P, *et al.*. High accuracy and visibility-consistent dense multiview stereo[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(5): 889-901.
- [2] SHI J L, ZOU D P, BAI S Q, *et al.*. Reconstruction of dense three-dimensional shapes for outdoor scenes from an image sequence[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(12):123104.
- [3] TI CH P, YANG R G, DAVIS J, *et al.*. Simultaneous time-of-flight sensing and photometric stereo with a single tof sensor[C]. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2015:4334-4342.
- [4] CUI Y, SCHUON S, CHAN D, *et al.*. 3d shape scanning with a time-of-flight camera[C]. *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2010: 1173-1180.
- [5] 白素琴,史金龙,钱强,等.视觉与激光相融合的大尺度钢板三维测量[J].*光电子·激光*,2015,26(3):

结果显示,本文方法与文献[19]方法相比,精度提高了约2.5倍。

## 4 结 论

本文提出了一种实用的大型物体三维重建系统。该系统由红外三维扫描仪、导轨及由高精度PLC(低于0.1 mm/10 m)模块控制的精确运动控制系统组成。运动控制系统控制三维扫描仪匀速运动;同时三维扫描仪向物体投射红外线,并重建物体上所投射的红外线段;系统根据三维扫描仪的运动速度,拼接局部重建数据,进而获得大型物体完整的三维重建数据。实验结果显示,该方法不仅能有效重建纹理稀疏的物体,还能重建表面平滑的物体,且在速度和精度方面有较大提高。与文献[19]方法相比,速度提高了约7倍,精度提高了约2.5倍。此外,由于采用PLC运动控制系统进行拼接,该系统不易出错,对于工业应用来说更加鲁棒、稳定。虽然本方法也存在一定局限性,如不适合测量有大量遮挡的场景。不过,在很多实际应用中,如工业领域中常用的曲面钢板,该方法是非常有效的。

581-585.

- BAI S Q, SHI J L, QIAN Q, *et al.*. 3D measurement of large steel plates based on the integration of computer vision and laser technology[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2015, 26(3): 581-585. (in Chinese)
- [6] 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*,2009,17(1):45-51.
- HAN J D, LU N G, WANG F, *et al.*. 3D data registration method based on optical location tracking technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1):45-51. (in Chinese)
- [7] SALVI J, FERNANDEZ S, PRIBANIC T, *et al.*. A state of the art in structured light patterns for surface profilometry [J]. *Pattern Recognition*, 2010, 43(8):2666-2680.
- [8] 史金龙,钱强,鹿林斌,等.大尺度钢板的三维测量和拼接[J].*光学精密工程*,2015,22(5):1165-1170.
- SHI J L, QIAN Q, PANG L B, *et al.*. Three-dimensional measurement and registration for large scale plates [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 22(5):

- 1165-1170. (in Chinese)
- [9] 杨磊,李桂菊,王丽荣. 面向场景重构的多序列间配准[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(2): 174-180.  
YANG L, LI G J, WANG L R. Registration between multiple sequences for scene reconstruction [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2): 174-180. (in Chinese)
- [10] NEWCOMBE R A, DAVISON A J, SHAHRAM I, *et al.*. Kinectfusion: Real-time dense surface mapping and tracking[C]. *2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR) IEEE*, 2011: 127-136.
- [11] IZADI S, KIM D, HILLIGES O, *et al.*. Kinect fusion: real-time 3d reconstruction and interaction using a moving depth camera[C]. *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, ACM, 2011: 559-568.
- [12] CHEN J W, BAUTEMBACH D, IZADI S. Scalable real-time volumetric surface reconstruction[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2013, 32(4): 113-119.
- [13] HENRY P, KRAININ M, HERBST E, *et al.*. Rgb-d mapping: Using kinect-style depth cameras for dense 3d modeling of indoor environments[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2012, 31(5): 647-663.
- [14] BYLOW E, STURM J, KERL C, *et al.*. Real-time camera tracking and 3d reconstruction using signed distance functions [C]. *Robotics: Science and Systems (RSS) Conference*, 2013: 99-108.
- [15] 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, 50(3): 380-390.
- [16] SHI J L, SUN ZH X. Large-scale three-dimensional measurement based on led marker tracking [J]. *The Visual Computer*, 2015, 32(2): 179-190.
- [17] 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.
- [18] BARONE S, PAOLI A, RAZIONALE A V. Three-dimensional point cloud alignment detecting fiducial markers by structured light stereo imaging [J]. *Machine Vision and Applications*, 2012, 23(2): 217-229.
- [19] SHI J L, SUN ZH X, BAI S Q. Large-scale three-dimensional measurement via combining 3d scanner and laser range finder [J]. *Applied optics*, 2015, 54(10): 2814-2823.
- [20] 田浩南,张叶. 基于边缘及特征点匹配的立体图像质量评价[J]. *液晶与显示*, 2015, 30(4), 666-672.  
TIAN H N, ZHANG Y. Quality evaluation of stereo image based on edge and characteristic point matching [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(4), 666-672. (in Chinese)
- [21] 赵九龙,马瑜,李爽,等. 三维医学图像的混合噪声去除方法[J]. *液晶与显示*, 2015, 30(2), 340-346.  
ZHAO J L, MA Y, LI SH, *et al.*. Mixed noise removing method for three-dimensional medical images [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(2), 340-346. (in Chinese)

#### 作者简介:



白素琴(1976—),女,山西太谷人,硕士,副教授,1999年于华东船舶工业学院获得学士学位,2002年于华东船舶工业学院获硕士学位,主要从事机器视觉应用技术研究。E-mail: baisuqin\_zj@gmail.com



史金龙(1976—),男,黑龙江宾县人,博士,副教授,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,主要从事视觉测量方面的研究。E-mail: jlsHFudan@gmail.com