

# 基于平面圆靶标的三维数据拼接

魏新国 刘涛 刘震

(北京航空航天大学精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

**摘要** 针对大尺寸物体形貌视觉测量中三维数据拼接问题提出了一种基于平面圆靶标的三维数据拼接方法。该方法将平面圆靶标放置在被测物前, 三维测头分别在相邻两个测量位置拍摄平面圆靶标, 然后以平面圆靶标为中介, 利用圆特征边缘点集对应, 实现前后两个测量位置的三维数据拼接。经实物实验验证, 在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴方向的拼接精度分别为 0.067、0.035、0.134 mm, 与相同实验条件下方格靶标法的精度相当。在被测物存在部分遮挡的情况下, 方格靶标法因为角点误匹配而导致三维数据拼接失败, 而本文方法可实现数据拼接在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴方向的拼接精度分别为 0.062、0.037、0.168 mm。

**关键词** 机器视觉; 三维形貌测量; 三维数据拼接; 圆靶标; 遮挡

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0215002

## Three-Dimensional Measurement Data Registration Based on Planar Circle Target

Wei Xinguo Liu Tao Liu Zhen

(Key Laboratory for Precision Optical-Mechanical Technology, Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract** A three-dimensional (3D) data registration method based on planar circular target is proposed to solve the problem of 3D data registration in the vision measurement of large-scale object surface profile. With the planar circular target placed in front of the measured object, 3D vision system takes photographs of planar circular target at adjacent measurement positions. Then the planar circular target is used as an intermediary, and registration of 3D measurement data from adjacent measurement positions is achieved by establishing correspondence between edge points in circle. As shown in experiments, the data registration root mean square (RMS) error of  $x$ ,  $y$  and  $z$ , with considerable accuracy of the planar grid target method, is 0.06, 0.03 and 0.134 mm respectively. When the measured object is partly occluded, the data registration RMS error of  $x$ ,  $y$  and  $z$  is 0.06, 0.03 and 0.168 mm respectively. While the method of planar grid target fails to registration because of mismatch of 3D grid data.

**Key words** machine vision; three-dimensional surface-profile measurement; three-dimensional data registration; circle target; occlusion

**OCIS codes** 150.0155; 150.1488; 150.1135

## 1 引言

在大尺寸三维(3D)形貌视觉测量中, 经常会出现因视觉传感器视场有限而导致被测物无法一次完成全部表面的测量, 所以需要先根据被测对象, 从不同角度、不同地点对被测物进行分块后局部测量, 再将局部三维测量数据拼接到全局坐标系下<sup>[1]</sup>。三维数据拼接在大尺寸三维形貌视觉测量中有着重要的地位, 其精度决定了大尺寸三维形貌视觉测量能够达到的精度。

当前常用于三维数据拼接的方法主要有三种: 1) 通过精密平台、经纬仪和激光跟踪仪等大型装置来扩展测量范围<sup>[2,3]</sup>, 但是这类装置价格昂贵并且范围有限; 2) 通过在测量装置相邻两次测量的公共视场内粘贴标记点, 利用其中非共线的3个点来求取转换矩阵<sup>[4]</sup>, 该方法存在较为繁琐的粘贴和清除标记工作, 粘贴标记部位点云缺失, 易损害被测物表面的缺点; 3) 另一类常用的方法是 Rusinkiewicz 等<sup>[5]</sup>提出的迭代最近点(ICP)算法及一些改进型算法<sup>[6]</sup>, 但是这些

收稿日期: 2012-07-25; 收到修改稿日期: 2012-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(50905011, 60804060)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0037)资助课题。

作者简介: 魏新国(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光电测量方面的研究。E-mail: wxg@buaa.edu.cn

算法存在迭代运算量太大,运行时间长等问题,并且不适合用于表面曲率变化不丰富的被测物。

基于平面靶标的方法<sup>[7,8]</sup>克服了以上不足,此方法利用相邻两次测量公共视场内的平面靶标提供的特征点,求解转换矩阵,不仅操作方便,而且精度高,有着广泛的使用前景。孙军华等<sup>[7]</sup>使用方格特征的平面靶标,利用方格角点的匹配求取转换矩阵,实现三维数据拼接,达到较高精度。韩建栋等<sup>[8]</sup>在基于平面靶标的基础上,结合光学跟踪技术,也取得不错的效果。在实际应用中,在被测物部分遮挡的情况下,方格角点由于遮挡情况的不确定性,经常出现误匹配的情况,导致三维数据拼接失败。因此对遮挡情况下的三维数据拼接方法进行系统的分析很有必要。

圆在摄像机标定中有着广泛的应用<sup>[9]</sup>,具有全局性,边缘信息丰富,在遮挡情况下依然可以精确提取的特点<sup>[10]</sup>。本文利用圆特征的这些特点,针对现有基于平面靶标的三维数据拼接方法中存在的局限性,提出一种基于平面圆靶标的三维数据拼接方法,以平面圆靶标为中介,求解前后测量位置的坐标系转换矩阵。介绍了基于平面圆靶标三维数据拼接的基本原理和实现步骤,并通过实物实验证明了该方法的可行性。

## 2 三维数据拼接原理

在测量过程中,将被测物分为多个子区域分别进行测量,保证各子区域之间存在公共部分,视觉传感器在第一个位置完成对第一个子区域测量后,保持视觉传感器不动,将平面圆靶标放置在公共部分进行测量。移动视觉传感器到第二个位置,而平面靶标保持不动,先对靶标特征点进行测量,然后移开靶标,对第二个子区域进行测量。通过靶标上的圆特征来完成三维数据的拼接。若被测物被分成  $N$  个子区域,则第  $k$  个子区域与  $k+1$  个子区域之间均可重复上述过程完成三维拼接,从而完成整个被测物的统一测量。

如图1所示,在局部测量位置  $k$  和位置  $k+1$  分别建立摄像机坐标系  $O_{ck}x_{ck}y_{ck}z_{ck}$  和  $O_{ck+1}x_{ck+1}y_{ck+1}z_{ck+1}$ ,将全局坐标系建立在位置1的摄像机坐标系  $O_{c1}x_{c1}y_{c1}z_{c1}$  下。在前后二次局部测量的摄像机移动过程中,平面靶标保持不动,即靶标上圆特征的圆心坐标和法向量在全局坐标系下不变,假设为  $\mathbf{p}, \mathbf{v}$ 。  $\mathbf{p}, \mathbf{v}$  在摄像机坐标系  $O_{ck}x_{ck}y_{ck}z_{ck}$  和  $O_{ck+1}x_{ck+1}y_{ck+1}z_{ck+1}$  的结果分别为  $\mathbf{p}_k, \mathbf{v}_k$  和  $\mathbf{p}_{k+1}, \mathbf{v}_{k+1}$ 。假设摄像机坐标系  $O_{ck}x_{ck}y_{ck}z_{ck}$  和

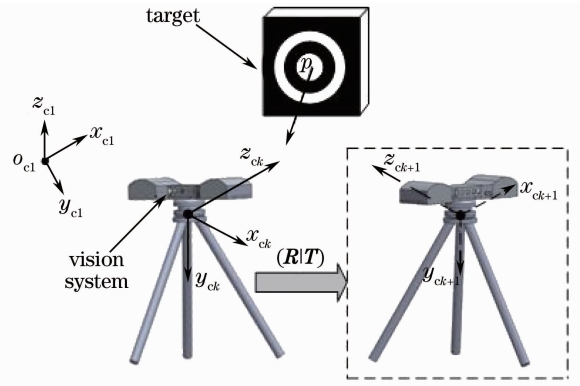


图1 三维数据拼接示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 3D data registration

$O_{ck+1}x_{ck+1}y_{ck+1}z_{ck+1}$  的转换矩阵为  $\mathbf{M}_{k+1,k}$ ,  $\mathbf{M}_{k+1,k}$  由正交的  $3 \times 3$  旋转矩阵  $\mathbf{R}_{k+1,k}$  和  $3 \times 1$  平移矢量  $\mathbf{t}_{k+1,k}$  组成,其表达式为

$$\mathbf{M}_{k+1,k} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{k+1,k} & \mathbf{t}_{k+1,k} \\ \mathbf{O}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

在局部测量位置  $k$  到位置  $k+1$  的测量过程中,平面靶标圆特征在全局测量坐标系下具有同一性,通过

$$\mathbf{v}_{k+1} = \mathbf{R}_{k+1,k} \cdot \mathbf{v}_k, \quad (2)$$

$$\mathbf{p}_{k+1} = \mathbf{R}_{k+1,k} \cdot \mathbf{p}_k + \mathbf{t}_{k+1,k}, \quad (3)$$

求解摄像机坐标系变换矩阵  $\mathbf{M}_{k+1,k}$ 。以位置1处的摄像机坐标系为全局测量坐标系,在位置  $k+1$  处测量数据经过变换  $\mathbf{M}_{2,1} \mathbf{M}_{3,2}, \dots, \mathbf{M}_{k+1,k}$ ,可以统一到全局坐标系  $O_{c1}x_{c1}y_{c1}z_{c1}$  下。同理,视觉传感器在所有位置的局部测量数据均可统一到全局坐标系  $O_{c1}x_{c1}y_{c1}z_{c1}$  下,从而得到整个被测物的三维形貌数据。基于平面圆靶标的三维数据拼接方法主要步骤如下:

1) 放置平面圆靶标在被测物前,移动已标定的视觉传感器,拍摄平面靶标圆特征在前后测量位置所成的椭圆图像;

2) 从拍摄图像中提取椭圆,并拟合椭圆方程,然后重建出平面圆靶标在前后两次局部测量坐标系下的特征  $\mathbf{p}_k, \mathbf{v}_k$  和  $\mathbf{p}_{k+1}, \mathbf{v}_{k+1}$ ;

3) 利用重建出的前后测量位置的圆特征在空间中的同一性,求解初步的转换矩阵构造  $\mathbf{R}_0, \mathbf{t}_0$ ;

4) 通过构造优化目标函数求解高精度转换矩阵  $\mathbf{R}, \mathbf{t}$ 。

### 2.1 求解 $\mathbf{p}_k, \mathbf{v}_k$

对于平面圆靶标在摄像机成像平面所成的图像,采用 Canny 算法检测图像中的边缘,得到像素级精度的边缘点集。然后用梯度幅值作为权值来计

算沿梯度方向的位置加权值,对边缘位置沿梯度方向做亚像素级的校正:

$$\delta d = \frac{\sum_{i=1}^n g_i d_i}{\sum_{i=1}^n g_i}, \quad (4)$$

式中  $d_i$  是一个像素沿梯度方向与检测到的边缘点的距离,  $g_i$  为梯度幅值。利用其他先验信息如圆弧度、点集大小、区域面积、凹凸性、封闭性和相邻椭圆的距离等约束条件去除不符合的边缘点集。然后利用结合随机抽样一致性算法(RANSAC)的直接最小二乘法<sup>[11]</sup>拟合出椭圆方程数,在部分遮挡的情况下,边缘提取出的遮挡物边缘点并不属于椭圆。这些外点的存在造成直接最小二乘法拟合椭圆方程的精度下降<sup>[12]</sup>,因此利用 RANSAC<sup>[13]</sup>来区分出边缘椭圆的内点和外点,从而去除外点的影响,提高椭圆拟合的精度。

基于结合 RANSAC 的直接最小二乘法拟合出的椭圆方程、摄像机参数矩阵以及平面靶标上圆特征的半径值,利用几何相交的圆特征三维重建方法<sup>[14]</sup>,重建局部测量坐标系下的圆特征,即求取在位置  $k$  局部测量坐标系下,平面靶标上圆特征的三维圆心坐标和法向量分别为  $\mathbf{p}_k, \mathbf{v}_k$ 。同理,求得  $\mathbf{p}_{k+1}, \mathbf{v}_{k+1}$ 。

## 2.2 求解 $\mathbf{R}_0, t_0$

由于旋转矩阵有 3 个自由度,因此至少需要选取两对向量,利用这两对向量及其叉乘向量,计算旋转矩阵  $\mathbf{R}$ ,但是,这种线性求解方法精度较低,一般用来作为非线性求解及全局优化的初值。当已知多于 3 对向量时,旋转矩阵  $\mathbf{R}$  可用最小二乘线性回归求得

$$\mathbf{R} = \mathbf{N}_{k+1} \cdot \mathbf{N}_k^T \cdot (\mathbf{N}_k \cdot \mathbf{N}_k^T)^{-1}, \quad (5)$$

式中  $\mathbf{N}_k = (\mathbf{v}_{k,1}, \mathbf{v}_{k,2}, \dots, \mathbf{v}_{k,n})^T$ ;  $\mathbf{N}_{k+1} = (\mathbf{v}_{k+1,1}, \mathbf{v}_{k+1,2}, \dots, \mathbf{v}_{k+1,n})^T$ ;  $n$  为匹配的空间圆法向量对的数目,且  $n > 3$ 。

通过(4)式求得旋转矩阵  $\mathbf{R}$  后,平移矢量  $t$  可由(5)式求得

$$t = \mathbf{p}_{k+1} - \mathbf{R} \cdot \mathbf{p}_k. \quad (6)$$

## 2.3 非线性优化

基于匹配的空间圆的法向量对,将旋转矩阵  $\mathbf{R}$  用 Rodrigues 向量形式表示,并根据 RANSAC 拟合求解椭圆时得到内外点的比例值,来设置向量对  $\mathbf{v}_{k,i}$  和  $\mathbf{v}_{k+1,i}$  对应的权重  $\omega_i$ ,构造优化求解旋转矩阵  $\mathbf{R}$  的最小二乘问题:

$$\min f = \sum_{i=1}^n \omega_i \|\mathbf{v}_{k+1,i} - \mathbf{R} \cdot \mathbf{v}_{k,i}\|^2, \quad (7)$$

式中  $\|\cdot\|$  为取 2-范数,对(6)式使用 Levenberg-Marquardt<sup>[15]</sup>非线性优化方法,求得优化后的旋转矩阵  $\mathbf{R}$ 。

在(5)式求解出的平移矢量  $t$  和(6)式求解出的旋转矩阵  $\mathbf{R}$  的基础上,利用匹配的空间圆边缘点集及空间圆圆心构造优化目标函数求解转换矩阵:

$$\min f = \sum_{i=1}^n \omega_i \left\| \mathbf{p}_{k+1} - \begin{bmatrix} \mathbf{R} & t \\ \mathbf{O}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{p}_k \right\|^2. \quad (8)$$

同样将旋转矩阵  $\mathbf{R}$  用 Rodrigues 向量形式表示,并根据 2.1 节中 RANSAC 拟合椭圆方程时得到的内外点比值,来设置匹配的边缘点集  $\mathbf{p}_k$  和  $\mathbf{p}_{k+1}$  对应的权重  $\omega_i$ ,利用 Levenberg-Marquardt 非线性优化方法,求解出高精度的旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和平移矢量  $t$ 。

## 3 实验结果与分析

通过将平面圆靶标方法分别与 ICP 法和平面方格靶标方法进行实验对比,评价平面圆靶标方法用于三维数据拼接的实际效果。

### 3.1 平面圆靶标方法与 ICP 方法的对比

搭建实验系统如图 2 所示,采用 2 个 AVT F302b 型 CCD 摄像机,每个摄像机靶面尺寸为 2/3 inch (1 inch=2.54 cm),分辨率为 1028 pixel×960 pixel,分别结合 2 个 Schneider 12 mm 镜头组成双目视觉传感器,并与投影仪组成三维扫描侧头。

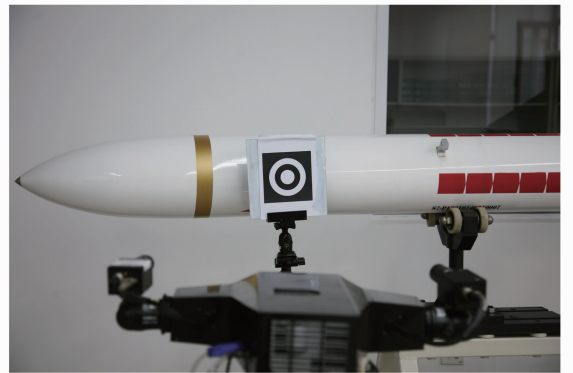


图 2 实验系统图

Fig. 2 Diagram of experimental system

实验采用的平面圆靶标基本的形状是一组同心圆,以及正方形方框。如图 2 中所示,圆靶标中的同心圆由 3 个圆组成,直径从大到小依次为 95、65、35 mm,正方形方框的边长大小为 125 mm。同心圆可以用于空间圆心和法向量的精确提取,外面的正方

形方框用于靶标坐标系的确定以及非线性优化求解中圆特征点的对应。

以导弹模型为被测物,利用三维测头分别对其进行了两次测量得到点云,如图3所示。图4(a)为采用平面圆靶标法拼接得到的点云,图4(b)为采用

ICP方法拼接得到的点云。可以看出,采用平面圆靶标方法拼接得到较好的效果,两个测量位置得到三维点云数据正确拼接,而采用ICP方法则出现拼接错误的情况。ICP方法拼接耗时213.6 s,而本文提出的方法拼接耗时6.8 s。

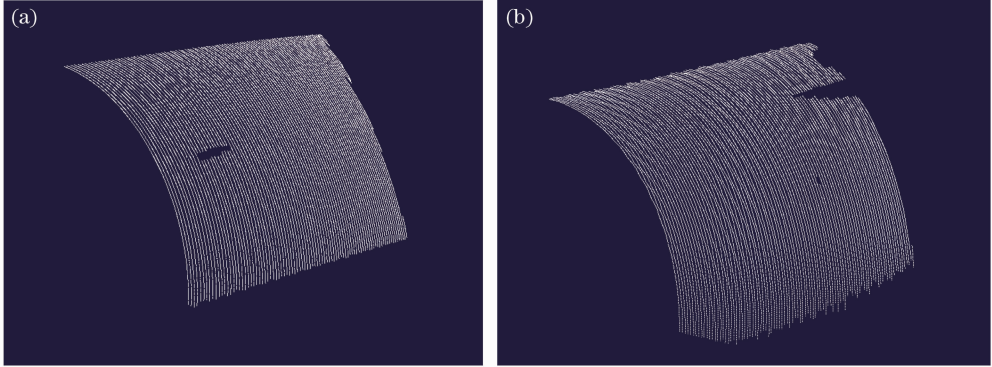


图3 局部测量位置的三维点云。(a)位置1;(b)位置2

Fig. 3 3D data set measured in local place. (a) Place 1; (b) place 2

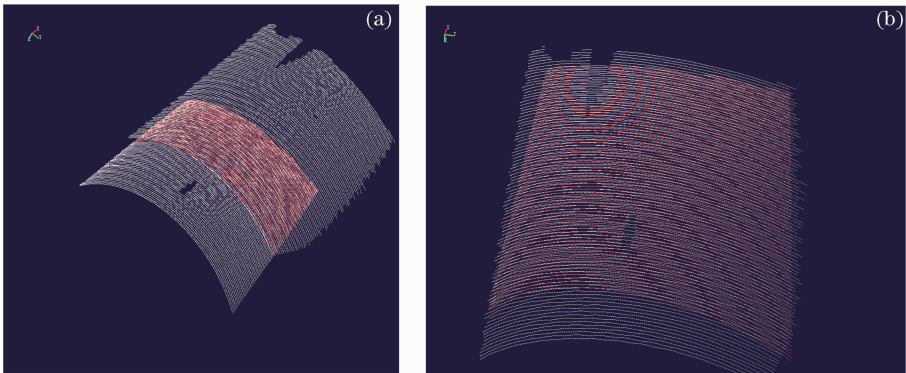


图4 拼接得到的点云。(a)平面圆靶标法;(b)ICP法

Fig. 4 Registered data set. (a) Planar circle target; (b) ICP

ICP方法出现拼接错误的原因在于被测物表面纹理不丰富,特征少,由此可见ICP方法对于类似于圆柱形曲面等表面纹理不丰富的被测物并不适用。从拼接实验结果的对比可以看出,本文提出的基于平面圆靶标的方法在拼接效果与算法处理时间上均优于ICP方法。

### 3.2 平面圆靶标方法与平面方格靶标方法的对比

在图2所示的实验条件下,利用在拼接靶标前放置遮挡物来实现部分遮挡的情况。图5为视觉系统中右摄像机在位置一和位置二拍摄的部分遮挡情况下拍摄的平面圆靶标图像。

对图5所示的图像,利用2.1节所介绍的方法重建平面靶标圆特征在局部测量坐标系下圆心位置

及法向量方向。三维重建的结果如表1所示。

利用重建出的位置一和位置二的圆特征,求解这2个位置的摄像机坐标系之间的转换矩阵 $\mathbf{R}, \mathbf{t}$ 。利用此转换矩阵将前后测量的局部数据拼接在同一坐标系下,然后评价此转换矩阵对应的拼接精度。

在评价三维数据拼接精度时,应利用与优化求解转换矩阵 $\mathbf{R}, \mathbf{t}$ 无关的点集来评价精度,而不是用优化求解转换矩阵 $\mathbf{R}, \mathbf{t}$ 的点集来评价精度。利用在平面圆靶标后放置高精度玻璃方格靶标的方式,通过重构出玻璃方格靶标上角点分别在位置一摄像机坐标系和位置二摄像机坐标系的三维坐标,利用均方根(RMS)评价拼接转换矩阵 $\mathbf{R}, \mathbf{t}$ 对应的拼接精度。

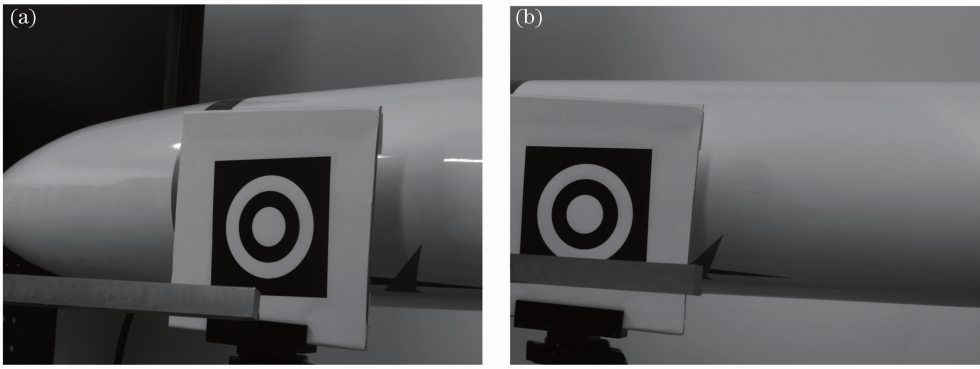


图 5 右摄像机拍摄部分遮挡图像。(a)位置 1；(b)位置 2

Fig. 5 Partly sheltered image of right camera. (a) Place 1; (b) place 2

表 1 平面靶标圆特征重建结果

Table 1 Feature reconstruction results of planer target circular

unit: mm

Radius	Center of place 1			Center of place 2			Normal vector of place 1			Normal vector of place 2		
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
95	129.974	-30.627	1373.353	24.834	79.954	1357.565	2.146	-1.728	-7.523	3.474	-2.397	-7.288
65	129.929	-30.558	1373.307	24.761	79.961	1357.456	2.143	-1.729	-7.522	3.481	-2.403	-7.288
35	129.909	-30.612	1373.196	24.812	79.941	1357.373	2.155	-1.752	-7.524	3.455	-2.368	-7.290

通过视觉传感器拍摄高精度方格靶标,利用前后位置双目视觉传感器重建出的方格靶标的角点三维坐标来计算 RMS 值,选取方格靶标中 10 个角点的三维坐标列在表 2 中。

为了对比平面方格靶标法和平面圆靶标法的三维数据拼接精度,在无遮挡情况以及有遮挡情况下,分别利用平面方格靶标法和平面圆靶标方法求解拼接矩阵,实验结果如表 3 所示。

表 2 用于精度评价的方格角点坐标

Table 2 Grid point coordinates for accuracy assessment

unit: mm

	Place 1			Place 2		
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
1	26.042	-47.133	829.923	36.112	-58.737	834.687
2	15.382	-37.834	830.068	25.928	-59.680	830.825
3	4.737	-28.551	830.257	15.746	-40.734	826.908
4	-5.911	-19.246	830.404	5.570	-31.740	823.002
5	-16.553	-9.934	830.502	-4.603	-22.738	819.133
6	-27.213	-0.647	830.646	-14.799	-13.721	815.192
7	-37.838	8.673	830.740	-24.963	-4.730	811.258
8	-48.516	17.983	830.961	-35.155	4.274	803.380
9	-59.156	27.275	831.082	-45.333	13.291	803.473
10	-69.795	36.573	831.195	-55.502	22.295	799.549

表 3 三维数据拼接方法精度对比结果

Table 3 Accuracy comparison of 3D data registration methods

unit: mm

	Unsheltered			Partly sheltered						
	Grid target			Circle target						
<b>R</b>	$\begin{bmatrix} 0.920 & -0.034 & -0.389 \\ 0.027 & 0.999 & -0.025 \\ 0.390 & 0.012 & 0.920 \end{bmatrix}$			$\begin{bmatrix} 0.919 & -0.033 & -0.391 \\ 0.025 & 0.999 & -0.024 \\ 0.394 & 0.012 & 0.920 \end{bmatrix}$			Unable to match	$\begin{bmatrix} 0.919 & -0.033 & -0.390 \\ 0.025 & 0.998 & -0.025 \\ 0.391 & 0.013 & 0.919 \end{bmatrix}$		
<b>T</b>	$\begin{bmatrix} 333.730 & 8.637 & 60.612 \end{bmatrix}$			$\begin{bmatrix} 334.171 & 8.725 & 60.566 \end{bmatrix}$				$\begin{bmatrix} 333.730 & -8.419 & 60.996 \end{bmatrix}$		
<b>RMS</b>	$\begin{bmatrix} 0.0571 & 0.0329 & 0.103 \end{bmatrix}$			$\begin{bmatrix} 0.0675 & 0.0364 & 0.134 \end{bmatrix}$				$\begin{bmatrix} 0.0624 & 0.0376 & 0.168 \end{bmatrix}$		

在无遮挡的情况下,基于平面圆靶标的三维数据拼接方法在  $x, y, z$  轴方向上的拼接精度分别为 0.067、0.035、0.134 mm。利用方格靶标作为中介靶标,计算同样位置关系的摄像机坐标系转换矩阵,得到  $x, y, z$  轴方向上的拼接精度分别为 0.057、0.032、0.103 mm。实验结果说明,本文介绍的方法

在无遮挡的情况下与平面靶标法精度相当。

在部分遮挡情况下,平面方格靶标在两个测量位置方格角点三维重建结果如图 6 所示。

由于遮挡情况的不确定性,重建出来的三维点之间的匹配存在着如图 7 所示的多种可能性。

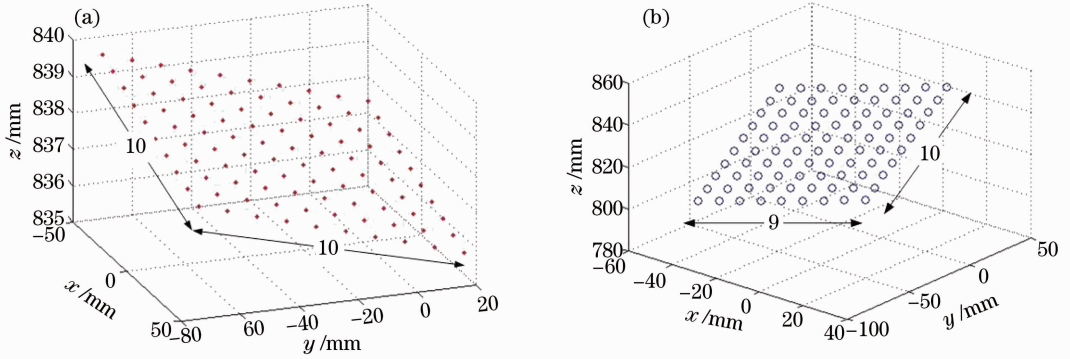


图 6 方格靶标三维点集。(a)位置 1; (b)位置 2

Fig. 6 3D data set of planar grid target. (a) Place 1; (b) place 2

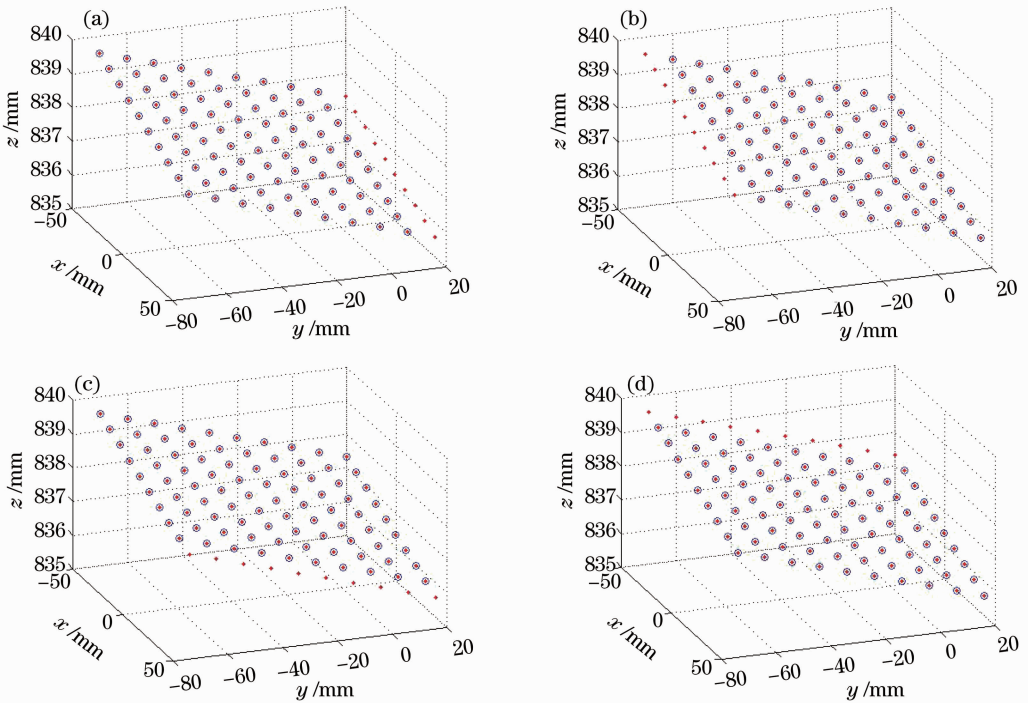


图 7 匹配的不确定性

Fig. 7 Uncertainty relation of match

由于遮挡导致匹配的不确定,平面方格靶标法导致三维数据无法实现正确的拼接。同样的情况下,本文方法不受遮挡影响,在  $x, y, z$  轴方向上的拼接精度分别为 0.062、0.037、0.168 mm。实验结果表明,平面圆靶标方法在遮挡的情况下,优于平面

方格靶标方法,适用于复杂现场环境下的三维数据拼接。

## 4 结 论

针对现有大尺寸三维形貌测量中三维数据拼接

方法存在的不足,提出一种基于平面圆靶标的三维数据拼接方法。该方法利用平面靶标圆特征前后二次局部测量在全局坐标系下的同一性,根据圆特征丰富的边缘点集相互对应,构造出优化目标函数,实现前后两次局部测量三维数据的拼接。通过与ICP方法对比实验,本文方法在拼接效果和算法处理时间上要优于ICP方法。通过与平面靶标方法的对比实验,在未遮挡情况下,本文方法在 $x, y, z$ 轴方向上的拼接精度分别为0.067、0.035、0.134 mm;在部分遮挡情况下,本文方法使用方便,在 $x, y, z$ 轴方向上的拼接精度分别为0.062、0.037、0.168 mm。而平面方格靶在部分遮挡情况下标出现误匹配,无法完成拼接。实验结果表明本文所提出的基于平面圆靶标的三维数据拼接方法简单可靠,精度高,不易受遮挡情况的影响,在复杂现场环境下有较好的应用前景。

### 参 考 文 献

- Zhang Guangjun. Machine Vision [M]. Beijing: Science Press, 2005. 180~185  
张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 180~185
- Lin Hongbin, Liu Bin, Zhang Yucun. Three-dimensional reconstruction method of large axisymmetric forge workpieces [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0715001  
林洪彬, 刘彬, 张玉存. 大型回转类锻件的三维重建方法[J]. 光学学报, 2011, **31**(7): 0715001
- Xu Yongan, Yang Qin, Huai Jinpeng. Calibration of the axis of the turntable in 4-axis laser measuring system and registration of multi-view [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(5): 659~662  
徐永安, 杨钦, 怀进鹏. 激光旋转扫描测量系统中转轴标定及多视拼合[J]. 中国激光, 2005, **32**(5): 659~662
- Liu Xiaoli, Peng Xiang, Yin Yongkai *et al.*. A method for global registration of range data combined with markers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1010~1014  
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, **9**(4): 1010~1014
- S. Rusinkiewicz, M. Levoy. Efficient variants of the ICP algorithm [C]. The Third International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling, 2001. 145~152
- S. Granger, X. Pennec. Multi-scale EM-ICP: a fast and robust approach for surface registration [C]. ECCV'02 Proceedings of the 7th European Conference on Computer Vision Part IV, 2002. 418~432
- Sun Junhua, Zhang Guangjun, Wei Zhenzhong. Vision measurement data registration method based on planar baseline target [J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2006, **42**(7): 192~194  
孙军华, 张广军, 魏振忠. 基于平面基线靶标的视觉测量数据拼接方法[J]. 机械工程学报, 2006, **42**(7): 192~194
- Han Jiandong, Lü Naiguang, Wang Feng *et al.*. 3D data registration method based on optical location tracking technology [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(1): 45~51  
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
- Hou Junjie, Wei Xinguo, Sun Junhua. Calibration method for binocular vision based on matching synthetic images of concentric circles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0315003  
侯俊捷, 魏新国, 孙军华. 基于同心圆合成图像匹配的双目视觉标定[J]. 光学学报, 2012, **32**(3): 0315003
- R. McLaughlin. Intelligent Algorithms for Finding Curves and Surfaces in Real World Data [D]. Australia: University of Western Australia, 2000. 68~104
- W. Gander, G. H. Golub, R. Strebler. Least-square fitting of circles and ellipses [J]. *BIT Numerical Mathematics*, 1994, **34**(4): 558~578
- Z. Y. Zhang. Parameter estimation techniques: a tutorial with application to conic fitting [J]. *Image and Vision Computing*, 1997, **15**(1): 59~76
- R. C. Bolles, M. A. Fischler. A RANSAC-based approach to model fitting and its application to finding cylinders in range data [C]. International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1981. 637~643
- L. Quan. Conic reconstruction and correspondence from two views [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996, **18**(2): 151~160
- J. J. More. The Levenberg-Marquardt algorithm, implementation and theory [J]. *Numerical Analysis*, 1978, **630**: 105~116

栏目编辑: 李文洁