

# 一种多相机阵列大尺寸测量系统快速标定方法

吴庆华<sup>1,3\*</sup>, 陈慧<sup>2</sup>, 朱思斯<sup>1,3</sup>, 周阳<sup>1,3</sup>, 万偲<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>湖北工业大学机械工程学院, 湖北 武汉 430068;

<sup>2</sup>湖北工业大学理学院, 湖北 武汉 430068;

<sup>3</sup>现代制造与质量工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068

**摘要** 多相机阵列中的相机位姿关系标定是大尺寸测量系统中非常重要的一个环节。建立了标定模型,采用圆点阵列平面靶标,通过线性平移,使靶标分别位于不同相机的视野范围内,获得了同一靶标特征点在不同相机坐标系下的坐标;根据所得坐标,求解靶标坐标系与相机坐标系之间的位姿关系;根据靶标的线性平移约束,进而求解两两相机之间的位姿关系。经实验验证,对于安装距离约为 2300 mm 的相机,标定误差小于 0.002 mm。其标定过程简单、速度快,可以适用工业大尺寸测量中的现场标定。

**关键词** 机器视觉; 大尺寸测量; 位姿标定; 相机阵列

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1215002

## Fast Calibration Method of Large Dimension Measurement System Based on Multi-Camera Array

Wu Qinghua<sup>1,3\*</sup>, Chen Hui<sup>2</sup>, Zhu Sisi<sup>1,3</sup>, Zhou Yang<sup>1,3</sup>, Wan Cai<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> School of Mechanical Engineering of Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China;

<sup>2</sup> School of Science of Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China;

<sup>3</sup> Key Laboratory of Advanced Manufacture and Quality Engineering of Hubei Province, Wuhan, Hubei 430068, China

**Abstract** The calibration of multi-camera pose relationship is a very important step in the large dimension measurement system. A calibration model is established and a planar target with a filling circle array is adopted. By means of linear translation, the target is located within fields of view of different cameras at the same time, the coordinate value of the same target feature point in each camera coordinate system can be extracted. Based on the coordinate values, the position-pose relationship between the target coordinate system and the camera coordinate system can be calculated. Moreover, according to the linear transition of target, the position-pose relationship between two cameras is thus solved. It is verified by experiment that, as for the cameras with an installation distance of about 2300 mm, the calibration error is less than 0.002 mm. The whole calibration procedure is simple and fast, which can be applied to the on-site calibration by a large dimension measurement system in industry.

**Key words** machine vision; large dimension measurement; position-pose calibration; camera array

**OCIS codes** 150.1488; 150.0155; 150.4232

## 1 引 言

机器视觉技术在工业检测中得到了广泛的应用。但是由于视觉系统的工作距离、视野范围与测量分辨率之间的相互制约,使视觉检测大多应用于镜头本身所限定视野范围内的尺寸测量,限制了机器视觉技术的应用。当然,也可以将视觉技术与各

种运动控制结合起来,通过移动相机,实现大于视野范围的较大尺寸测量,如通过机械手、线位移平台实现大尺寸的测量<sup>[1]</sup>。但是,由于引入了运动装置,增加了测量的中间环节,会使测量结果引入运动误差,增加了其不确定度;同时,运动带来测量效率下降,不便于在线快速测量。为了提高测量效率,目前大多采用多相机阵列的方式<sup>[2-5]</sup>,在每一个关键测量点

收稿日期: 2018-05-28; 修回日期: 2018-07-05; 录用日期: 2018-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(51275158)、湖北工业大学高层次人才科研启动基金项目(BSQD13019)

\* E-mail: kinghuawu@sohu.com

布置一个相机,以扩展测量范围。这种测量方法的关键在于统一各相机测量坐标系。文献[6-11]研究了两个相机之间位姿关系的求解,但是这些求解方法中的特征点必须同时位于两个相机的视野内,并不适合于大尺寸测量系统的标定。文献[12]采用两轴转台旋转使靶标分别进入各个相机视场,通过旋转角度建立靶标与各个无公共视野的相机之间的关系。文献[13]在一个连接杆的两端分别安装两个靶标,使其分别置于无公共视场相机的两个相机视野中,从而求解相机之间的位置关系。但是需要使用多个靶标。在传统多相机位姿关系求解方法的基础上,采用平面圆点阵列作为靶标,通过标定杆实现线性平移,使靶标分别位于不同的相机视野范围,并根据线性平移约束,求解相机位姿关系。整个标定过程简单,标定速度快,适用于工业检测中现场标定。

## 2 多相机位姿标定的数学模型

测量系统中相机的位姿关系指其各自测量坐标系之间的旋转平移矩阵。测量系统中的相机拍摄处于同一平面上的两个靶标。通过求取靶标上的特征点在对应该相机中的图像坐标,在已知靶标中特征点的物理坐标,以及两靶标之间的位姿约束的条件下,求解两个相机之间的位置关系矩阵。

图1为两相机阵列测量系统标定模型。模型中,假定已对相机的光轴与被测靶标平面不垂直带来的斜视畸变进行了校正,可以认为两相机的光轴平行,从而建立相机1坐标系  $O_{c1}-X_{c1}Y_{c1}Z_{c1}$ 。其中, $O_{c1}$ 为相机的光心, $O_{c1}Z_{c1}$ 与相机的光轴重合, $O_{c1}X_{c1}$ 、 $O_{c1}Y_{c1}$ 分别与相机图像传感器的横纵坐标平行。同理,建立相机2坐标系  $O_{c2}-X_{c2}Y_{c2}Z_{c2}$ 。则两相机之间的位置关系矩阵即为所求。

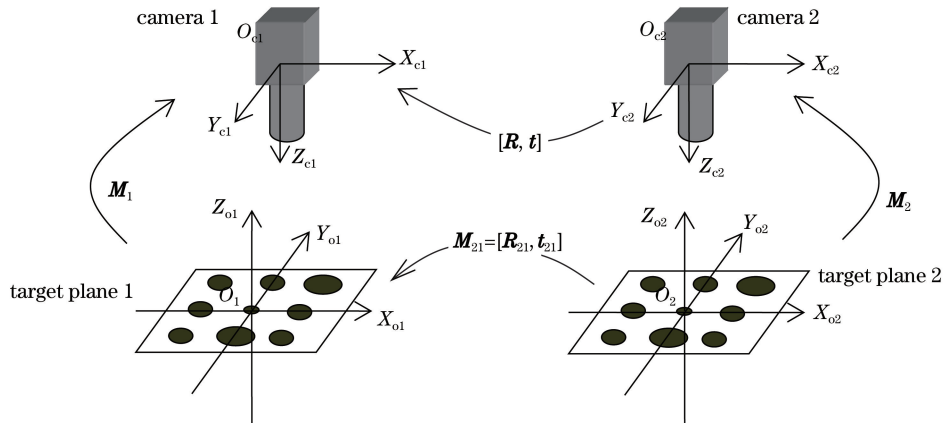


图1 两相机位姿关系标定模型

Fig. 1 Calibration model of position-pose relationship between two cameras

平面靶标1和平面靶标2分别置于相机1、2的视野范围,两靶标之间的位置关系设为  $[R_{21}, t_{21}]$ 。在靶标1中,建立靶标坐标系  $O_1-X_{o1}Y_{o1}Z_{o1}$ ,其中  $O_1-X_{o1}Y_{o1}$ 为靶标1所在平面。在靶标2中,建立平面靶标2的靶标坐标系  $O_2-X_{o2}Y_{o2}Z_{o2}$ ,其中  $O_2-X_{o2}Y_{o2}$ 为靶标2所在平面。

假设相机1和相机2的成像参数均已知,靶标1上任一特征点  $p_1$ ,其在靶标坐标系  $O_1-X_{o1}Y_{o1}Z_{o1}$ 下的坐标为  $(X_{o1}, Y_{o1}, 0)$ ,在相机坐标系  $O_{c1}-X_{c1}Y_{c1}Z_{c1}$ 下的物点坐标为  $(X_{c1}, Y_{c1}, Z_{c1})$ ,对应图像中的像素坐标为  $(u_1, v_1)$ 。设相机1坐标系  $O_{c1}-X_{c1}Y_{c1}Z_{c1}$ 与靶标1坐标系  $O_1-X_{o1}Y_{o1}Z_{o1}$ 之间的关系为  $M_1$ ,即

$$\begin{aligned} [X_{c1}, Y_{c1}, Z_{c1}, 1]^T &= M_1 [X_{o1}, Y_{o1}, 0, 1]^T = \\ & G_1 [X_{o1}, Y_{o1}, 1]^T, \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $G_1$  由  $M_1$  的第一、二和四列向量决定,第一列

向量与第二列向量正交,且第一、二列向量与第四列向量不在一个平面上,故  $\det(G_1) \neq 0$ 。

根据相机小孔成像理论<sup>[14]</sup>及(1)式,则有

$$\begin{aligned} s_1 [u_1, v_1, 1]^T &= A_1 [X_{c1}, Y_{c1}, Z_{c1}, 1]^T = \\ & A_1 G_1 [X_{o1}, Y_{o1}, 1]^T = H_1 [X_{o1}, Y_{o1}, 1]^T, \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $s_1$  为比例系数;  $A_1$  由相机1的内参决定,且  $\det(A_1) \neq 0$ ;  $H_1$  为像素点集与靶标上的二维点集间的单映性矩阵,由于  $\det(G_1) \neq 0$ ,故  $\det(H_1) \neq 0$ 。求出所有特征点的像素点集和对应的二维物理点集后,采用奇异值分解(SVD)的方法求解初值,然后采用 Levenberg-Marquardt(LM)法<sup>[15,16]</sup>通过优化可以求得  $H_1$  矩阵,进而可求得  $G_1$ ,由(1)式可以求得靶标1上的每个特征点在相机1下的坐标。

同理,靶标2上任一特征点  $p_2$ ,其在相机2坐标系  $O_{c2}-X_{c2}Y_{c2}Z_{c2}$ 下的物点坐标为  $(X_{c2}, Y_{c2}, Z_{c2})$ ,

像点像素坐标为 $(u_2, v_2)$ ;  $p_2$  在靶标 2 坐标系  $O_2-X_{o_2}Y_{o_2}Z_{o_2}$  下的坐标为 $(X_{o_2}, Y_{o_2}, 0)$ , 于是有

$$\begin{aligned} [X_{c_2}, Y_{c_2}, Z_{c_2}, 1]^T &= \mathbf{M}_2 [X_{o_2}, Y_{o_2}, 0, 1]^T = \\ & \mathbf{G}_2 [X_{o_2}, Y_{o_2}, 1]^T. \end{aligned} \quad (3)$$

由摄影成像理论及(3)式, 得到

$$\begin{aligned} s_2 [u_2, v_2, 1]^T &= \mathbf{A}_2 \mathbf{M}_2 [X_{o_2}, Y_{o_2}, 0, 1]^T = \\ & \mathbf{A}_2 \mathbf{G}_2 [X_{o_2}, Y_{o_2}, 1]^T = \mathbf{H}_2 [X_{o_2}, Y_{o_2}, 1]^T, \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $s_2$  为比例系数;  $\mathbf{M}_2$  为相机 2 坐标系  $O_{c_2}-X_{c_2}Y_{c_2}Z_{c_2}$  与靶标 2 坐标系  $O_2-X_{o_2}Y_{o_2}Z_{o_2}$  之间的关系矩阵。  $\mathbf{A}_2$  由相机 2 的内参决定, 且  $\det(\mathbf{A}_2) \neq 0$ ;  $\mathbf{H}_2$  为靶标上的特征点像素点集与二维物理坐标点集间的单映性矩阵,  $\det(\mathbf{H}_2) \neq 0$ , 求得  $\mathbf{H}_2$  矩阵后, 已知  $\mathbf{A}_2$ , 即可求得  $\mathbf{G}_2$ , 由(3)式可以求得靶标 2 上的每个特征点在相机 2 下的坐标。

根据设计的标定模型, 靶标 2 坐标系  $O_2-X_{o_2}Y_{o_2}Z_{o_2}$  与靶标 1 坐标系  $O_1-X_{o_1}Y_{o_1}Z_{o_1}$  之间的关系为

$$[X_{o_1}, Y_{o_1}, Z_{o_1}, 1]^T = \mathbf{M}_{21} [X_{o_2}, Y_{o_2}, Z_{o_2}, 1]^T. \quad (5)$$

利用(5)式, 可以得到靶标 2 上的特征点在靶标 1 坐标系下的坐标为 $(X_{o_{21}}, Y_{o_{21}}, Z_{o_{21}})$ ; 代入(1)式, 可以得到靶标 2 上的特征点在相机 1 坐标系下的坐标为 $(X_{c_{21}}, Y_{c_{21}}, Z_{c_{21}})$ 。

设相机 2 与相机 1 坐标系之间的关系为 $[\mathbf{R}, \mathbf{t}]$ , 其中  $\mathbf{R}$  代表 2 个相机坐标系之间的旋转角度关系,  $\mathbf{t}$  表示三维平移向量, 于是有:

$$[X_{c_1}, Y_{c_1}, Z_{c_1}, 1]^T = [\mathbf{R}, \mathbf{t}] [X_{c_2}, Y_{c_2}, Z_{c_2}, 1]^T. \quad (6)$$

分别求得靶标 2 上的特征点在相机 2 坐标系下的坐标点集 $(X_{c_2}, Y_{c_2}, Z_{c_2})$ 和在相机 1 坐标系下的坐标点集 $(X_{c_{21}}, Y_{c_{21}}, Z_{c_{21}})$ , 同样, 采用 LM 优化得到 $[\mathbf{R}, \mathbf{t}]$ 矩阵。

求得 $[\mathbf{R}, \mathbf{t}]$ 矩阵后, 相机 2 测得的点的坐标, 均可通过该矩阵转换到相机 1 坐标系中, 实现测量坐标系的统一。

同样, 多于两个相机阵列时, 均可采用上述方法求得两两相机之间的位姿关系, 或相对于同一相机的位姿关系。这样, 将所有相机的测量坐标转换到同一个相机坐标系中, 即可实现大尺寸工件的多相机阵列测量。

### 3 靶标设计

工业现场进行多相机位姿标定时, 空间位置会受限, 靶标中部分特征点可能会因被遮挡而无法参与计算, 从而影响标定; LM 优化计算时, 旋转与平

移矩阵的初始值非常关键, 且像素特征点与靶标上的特征点必须一一对应。为此, 采用文献[17]描述的方法制作多相机阵列位姿标定的靶标。图 2(a)所示为  $N \times M$  排列的实心圆, 其中  $N, M$  为奇数; 实心圆横向间距为  $\Delta x$ , 纵向间距为  $\Delta y$ ;  $(1, M)$  与  $[N, (M+1)/2]$  处的实心圆直径为  $\phi A$ , 中心  $[(N+1)/2, (M+1)/2]$  处实心圆的直径为  $\phi B$ , 其余位置圆的直径为  $\phi C$ 。为便于圆点面积计算与识别, 以用于圆点排序, 要求  $A \geq 2C \geq 4B$ 。通过图像分析, 采用 Blob 斑点提取方法, 得到各个圆点的面积。比较各个圆点的面积, 其最小者设为靶标的原点, 而最大的有两个圆点。规定距离原点较近的大圆点和原点位于同一个坐标轴上, 另外一条坐标轴与其垂直, 即可建立靶标坐标系  $O_0-X_0Y_0Z_0$ , 如图 2(b)所示。利用文献[17]描述的规则, 可以容易确定靶标中的各个特征点在坐标系  $O_0-X_0Y_0Z_0$  中的坐标。

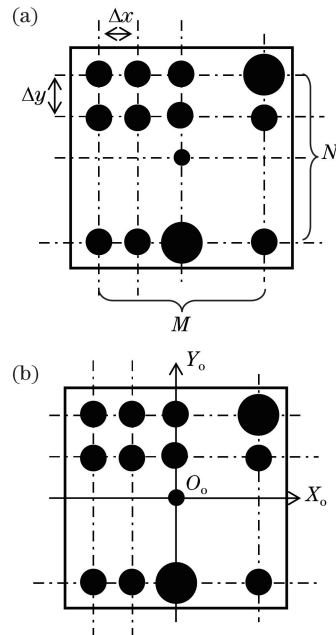


图 2 (a) 靶标中的实心圆点阵列; (b) 靶标平面坐标系  
Fig. 2 (a) Solid circle array in target plane;  
(b) target plane coordinate system

同时, 采用图 3 所示的标准杆来实现靶标的快速线性平移。图 3 中的标准杆上配有间距为  $\Delta L$  的定位销两组, 而两组定位销间的间距为  $W$ 。在平面靶标上设计有对应的定位孔两个。通过每组两个销孔的配合, 可实现靶标位置的唯一性。间距  $W$  与两个相机之间的距离相当, 确保靶标分别与两组定位销配合时, 均处于对应的相机视野范围内。间距  $W$  大小以及两组销(共 4 个)的共线性非常关键, 为靶

标位姿提供关系明确的线性约束。

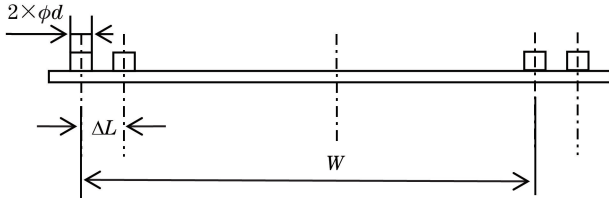


图 3 带有定位销的标准平移杆

Fig. 3 Standard translation pole with locating pins

#### 4 相机的位姿关系标定实验

为测量宽度约为 2400 mm 的物体尺寸,搭建实验平台。两个工业数字相机大致等高安装,拍摄平面靶标。相机的视野范围均约为 500 mm×500 mm,

表 1 相机 1 和相机 2 的内参标定结果

Table 1 Calibration results of intrinsic parameters for cameras 1 and 2

Parameter	Focus length $x$	Focus length $y$	Principal point $u$	Principal point $v$	1st-order radial distortion $k_1$	1st-order tangential distortion $p_1$
Value	1601.632	1601.947	622.954	541.844	-0.07064	0.00813
	1605.286	1605.115	635.909	524.713	-0.07848	0.00838

#### 4.2 两相机位姿关系标定实验步骤

1) 靶标置于相机 1 下,按图 2(b)建立靶标坐标系  $O_1-X_{o1}Y_{o1}Z_{o1}$ ,这样得到靶标中所有特征点在靶标坐标系下的坐标。相机 1 获得靶标 1 图像,如图 4(a)所示。通过图像处理方法得到所有特征点的像素坐标。由像素坐标及其对应靶标坐标系下的坐标,由(2)式可以求得靶标 1 坐标系  $O_1-X_{o1}Y_{o1}Z_{o1}$  与相机 1 坐标系  $O_{c1}-X_{c1}Y_{c1}Z_{c1}$  之间的关系,并求得  $O_1-X_{o1}Y_{o1}Z_{o1}$  与  $O_{c1}-X_{c1}Y_{c1}Z_{c1}$  之间的关系矩阵为

$$[\mathbf{R}_1 \quad \mathbf{t}_1] = \begin{bmatrix} 0.998559 & -0.050244 & -0.018862 & -36.182964 \\ 0.051312 & 0.996807 & 0.061178 & -69.930122 \\ 0.014728 & -0.062058 & 0.997949 & 852.774170 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

2) 在标准杆上平移靶标,使其移动到相机 2 视野中,通过定位销孔配合,实现靶标沿靶标 1 的  $O_1X_{o1}$  方向平移 2300 mm。在平移后的靶标(设为靶标 2)建立新的靶标 2 坐标系  $O_2-X_{o2}Y_{o2}Z_{o2}$ 。相机 2 获得靶标图像,如图 4(b)所示,根据其在相机 2 下特征点的像素坐标,及其对应的特征点在靶标 2 坐标系下的坐标,求得新的靶标坐标系  $O_2-X_{o2}Y_{o2}Z_{o2}$  与相机 2 坐标系  $O_{c2}-X_{c2}Y_{c2}Z_{c2}$  之间的关系矩阵为

工作距离约为 740 mm。工业数字相机型号为 Basler acA1300-60gm, Mono CMOS 传感器,幅面为 1282 pixel×1026 pixel,像元大小为  $5.3 \mu\text{m} \times 5.3 \mu\text{m}$ ,帧率为 60 frame/s;采用 Computar 公司的 8 mm 焦距镜头,型号为 M0814-MP2;自制平面靶标,7×7 阵列实心圆,圆心间距为 60 mm,第一行第七列与第七行第四列处的实心圆直径为  $\Phi 60$ ,第四行第四列处圆直径为  $\Phi 15$ ,其余圆直径为  $\Phi 30$ 。自制一维标准杆,平面靶标通过定位销孔与标准杆联接,两端定位孔间距为 2340 mm。

#### 4.1 相机内参的标定

根据文献[18]的标定方法,得到相机 1 和相机 2 的内参,如表 1 所示。

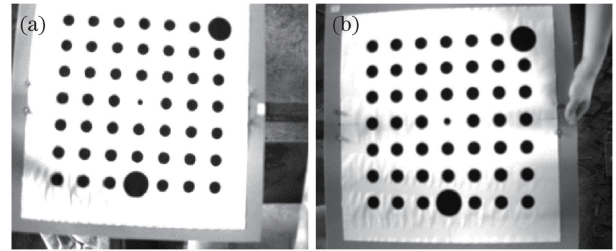


图 4 相机拍摄到的靶标图像。(a)相机 1; (b)相机 2

Fig. 4 Target images captured by cameras.

(a) Camera 1; (b) camera 2

$$[\mathbf{R}_2 \quad \mathbf{t}_2] = \begin{bmatrix} 0.993216 & 0.019574 & 0.114624 & -36.864429 \\ -0.022938 & 0.999342 & 0.028099 & -18.533442 \\ -0.113999 & -0.030537 & 0.993011 & 857.684631 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

3) 当靶标位于相机 2 视野中时,靶标上的特征点在靶标 1 坐标系  $O_1-X_{o1}Y_{o1}Z_{o1}$  下的坐标可以通过一维标准杆的线性约束关系求得,由(1)式可以求得其在相机 1 坐标系下的坐标值。

4) 当靶标位于相机 2 视野中,由靶标上的特征点在相机 2 坐标系下的坐标点集  $\{(X_{c2i}, Y_{c2i}, Z_{c2i})\}$  和在相机 1 坐标系下的坐标点集  $\{(X_{c1i}, Y_{c1i}, Z_{c1i})\}$ ,如表 2 所示,可以求得相机 2 坐标系与相机 1 坐标系的关系矩阵。求得两个相机之间的关系矩阵为

表 2 平移 2340 mm 后的靶标特征点在相机 1 及相机 2 坐标系下的坐标

Table 2 Coordinate values in cameras 1 and 2 for target feature point after translation of 2340 mm

Coordinate value in $O_{c1}-X_{c1}Y_{c1}Z_{c1}$			Coordinate value in $O_{c2}-X_{c2}Y_{c2}Z_{c2}$		
$x_{c1}$	$y_{c1}$	$z_{c1}$	$x_{c2}$	$y_{c2}$	$z_{c2}$
2129.748	-138.521	897.917	-219.167	-194.286	883.701
2189.662	-135.443	898.861	-159.574	-195.662	876.861
2249.575	-132.364	899.804	-99.981	-197.039	870.021
2309.489	-129.285	900.748	-40.388	-198.415	863.181
2369.403	-126.207	901.692	19.205	-199.791	856.341
2429.316	-123.128	902.635	78.798	-201.168	849.501
2489.230	-120.049	903.579	138.391	-202.544	842.661
2126.734	-78.713	894.194	-217.992	-134.326	881.869
2186.647	-75.634	895.137	-158.399	-135.702	875.029
2246.561	-72.556	896.081	-98.806	-137.078	868.189
2306.474	-69.477	897.025	-39.213	-138.454	861.349
2366.388	-66.398	897.968	20.380	-139.831	854.509
2426.302	-63.319	898.912	79.973	-141.207	847.669
2486.215	-60.241	899.856	139.566	-142.583	840.829
2123.719	-18.905	890.470	-216.818	-74.365	880.037
2183.633	-15.826	891.414	-157.225	-75.741	873.197
2243.546	-12.747	892.357	-97.632	-77.118	866.357
2303.460	-9.668	893.301	-38.039	-78.494	859.517
2363.373	-6.590	894.245	21.554	-79.870	852.677
2423.287	-3.511	895.189	81.147	-81.247	845.837
2483.200	-0.432	896.132	140.740	-82.623	838.997
2120.705	40.904	886.747	-215.643	-14.405	878.204
2180.618	43.983	887.690	-156.050	-15.781	871.365
2240.531	47.061	888.634	-96.457	-17.157	864.525
2300.445	50.140	889.578	-36.864	-18.533	857.685
2360.359	53.219	890.521	22.729	-19.910	850.845
2420.272	56.297	891.465	82.321	-21.286	844.005
2480.186	59.376	892.409	141.914	-22.662	837.165
2117.690	100.712	883.023	-214.469	45.556	876.372
2177.603	103.791	883.967	-154.876	44.180	869.532
2237.517	106.870	884.911	-95.283	42.803	862.692
2297.430	109.948	885.854	-35.690	41.427	855.852
2357.344	113.027	886.798	23.903	40.051	849.012
2417.258	116.106	887.742	83.496	38.675	842.173
2477.171	119.185	888.685	143.089	37.298	835.333
2114.675	160.521	879.300	-213.294	105.516	874.540
2174.589	163.599	880.243	-153.701	104.140	867.700
2234.502	166.678	881.187	-94.109	102.764	860.860
2294.416	169.757	882.131	-34.516	101.388	854.020
2354.329	172.836	883.074	25.077	100.011	847.180
2414.243	175.914	884.018	84.670	98.635	840.340
2474.156	178.993	884.962	144.263	97.259	833.500
2111.661	220.329	875.576	-212.120	165.477	872.708
2171.574	223.408	876.520	-152.527	164.101	865.868
2231.488	226.486	877.464	-92.934	162.724	859.028
2291.401	229.565	878.407	-33.341	161.348	852.188
2351.315	232.644	879.351	26.252	159.972	845.348
2411.228	235.723	880.295	85.845	158.596	838.508
2471.142	238.801	881.238	145.438	157.219	831.668

$$[\mathbf{R} \quad \mathbf{t}] = \begin{bmatrix} 0.988641 & -0.073643 & -0.131015 & 2447.850830 \\ 0.077397 & 0.996716 & 0.023789 & 51.067142 \\ 0.128833 & -0.033659 & 0.991095 & 43.645191 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

### 4.3 标定结果反算验证

将靶标在两相机坐标系下的像素坐标,及其在各相机坐标系下的坐标,由所得的关系矩阵[(7)~(9)式],反算靶标中的特征点在不同相机视野中各对应点之间的实际物理距离,计算其与真实值(2340 mm)的偏差,如图5所示。其距离误差值 $\leq 0.002$  mm。经观察分析可知,在两端其偏差值较大。由靶标坐标系中特征点的排序可知,横坐标较小和较大的对应点主要位于靶标的四周,这与相机径向畸变模型一致。

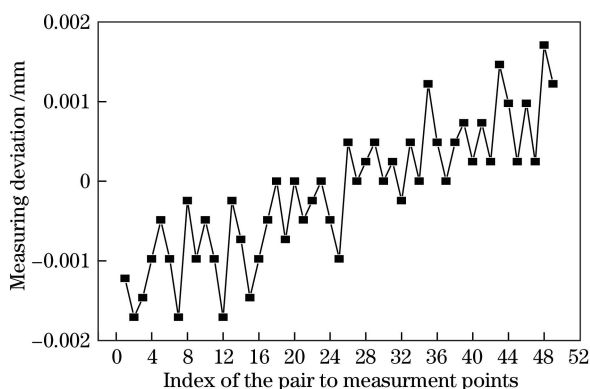


图5 反算测量结果的偏差值

Fig. 5 Deviation values for reverse calculation of measurement results

## 5 结 论

提出了一种基于一维线性平移的相机位姿关系标定方法。采用这种方法,可以将任一相机的坐标系转换到同一个测量坐标系中。相对于已有方法,其所使用的靶标简单、标定速度快、精度高,对在线标定时可能出现的遮挡不敏感,还可以应用于多相机阵列中的大尺寸测量系统。后续工作可以研究使用相同的靶标,对相机内参与位姿关系同时进行标定,进一步提高标定的效率与精度。

### 参 考 文 献

- [1] Shi Y Q, Sun C K, Wang P, *et al.* High-speed measurement algorithm for the position of holes in a large plane[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(12): 1828-1835.
- [2] Liu H Q, Yang L H, Ren Y J, *et al.* Large-scale 3D coordinate measurement based on orthogonal cylindrical imaging cameras[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 157-162.
- [3] 刘海庆, 杨凌辉, 任永杰, 等. 基于正交柱面成像相机的大尺寸三维坐标测量[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(11): 157-162.
- [4] Xu Z Y, Wang Y, Yang C. Multi-camera global calibration for large-scale measurement based on plane mirror[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2015, 126(23): 4149-4154.
- [5] Jing J, Yang L H, Lin J R, *et al.* Flexible vision shape measurement by multi-way combination intersection[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(3): 438-444.
- [6] 景江, 杨凌辉, 林嘉睿, 等. 基于多向联合交汇的柔性视觉形貌测量新方法[J]. *应用光学*, 2017, 38(3): 438-444.
- [7] Liu J W, Liang J, Liang X H, *et al.* Industrial vision measuring system for large dimension work-pieces[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(1): 126-134.
- [8] 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.
- [9] Zhang C, Han C, Yang H M, *et al.* Large field and binocular vision calibration algorithm based on position and orientation constraints[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0115003.
- [10] 张超, 韩成, 杨华民, 等. 基于位姿约束的大视场双目视觉标定算法[J]. *光学学报*, 2016, 36(1): 0115003.
- [11] Yang J H, Liu W, Liu Y, *et al.* Calibration of binocular vision measurement system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(2): 300-308.
- [12] 杨景豪, 刘巍, 刘阳, 等. 双目立体视觉测量系统的标定[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(2): 300-308.
- [13] Ding Y, Fan J T, Song T. Optimal forward design method for the binocular stereo vision inspection system[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(3): 650-657.
- [14] 丁莹, 范静涛, 宋天喻. 双目立体视觉检测系统正向最优化设计方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(3): 650-657.
- [15] Bu P H, Zhao H, Gu F F, *et al.* A fully automatic camera calibration method based on planar target[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1015004.
- [16] 卜鹏辉, 赵宏, 谷飞飞, 等. 一种基于平面靶标的全自动标定方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1015004.
- [17] Zou P P, Zhang Z L, Wang P, *et al.* Binocular camera calibration based on collinear vector and plane homography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1115006.
- [18] 邹朋朋, 张滋黎, 王平, 等. 基于共线向量与平面单

- 应性的双目相机标定方法[J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1115006.
- [11] Yang D S, Bi S S, Cai Y R, *et al.* Wide-area monocular plane measurement based on calibration on a parallel plane using multiple targets[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1015001.  
杨东升, 毕树生, 蔡月日, 等. 基于平行面多靶标标定的单目大视场平面测量[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1015001.
- [12] Lu Y N, Wan Z J, Wang X J. Solution to relative position of cameras without public FOV[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(3): 400-405.  
鲁亚楠, 万子敬, 王向军. 一种无公共视场相机位置关系的求解方法[J]. 应用光学, 2017, 38(3): 400-405.
- [13] Hu X K, Bi Y W. A method for solving relative position of two cameras without public visual[J]. *Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition)*, 2010, 23(2): 138-141.  
胡潇琨, 毕远伟. 一种无公共视场双摄像机位置关系的求取方法[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2010, 23(2): 138-141.
- [14] Zhang G J. *Vision measurement*[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- 张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [15] Shan B H, Yuan W T, Liu Y. A calibration method for stereovision system based on solid circle target[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(9): 0915001.  
单宝华, 袁文厅, 刘洋. 一种基于实心圆靶标的立体视觉系统标定方法[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0915001.
- [16] Zhu J G, Yu Z J. *The principle of vision metrology*[M]. Beijing: China Machine Press, 2012: 91-93.  
郝继贵, 于之靖. 视觉测量原理与方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [17] Wu Q H, He T, Shi T L. A calibration method for line structured-light vision sensor based on a plane target[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2013, 24(2): 297-301.  
吴庆华, 何涛, 史铁林. 一种基于平面标靶的线结构光视觉传感器标定方法[J]. 光电子 • 激光, 2013, 24(2): 297-301.
- [18] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.