

## 高精度抗遮挡的四目相机三维重建系统

陈鹏 刘慧婷 张磊 王克逸 蔡柏林

### High-precision occlusion-resistant quad-vision camera 3D reconstruction system

CHEN Peng, LIU Huiting, ZHANG Lei, WANG Keyi, CAI Bolin

引用本文:

陈鹏, 刘慧婷, 张磊, 等. 高精度抗遮挡的四目相机三维重建系统[J]. 应用光学, 2024, 45(2): 307–313. DOI: 10.5768/JAO202445.0201005

CHEN Peng, LIU Huiting, ZHANG Lei, et al. High-precision occlusion-resistant quad-vision camera 3D reconstruction system[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(2): 307–313. DOI: 10.5768/JAO202445.0201005

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0201005>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 融合Kinect与 $\gamma$ 相机图像的放射性区域重建与定位

Reconstruction and localization of radioactive area fusing images from Kinect and  $\gamma$  camera

应用光学. 2020, 41(5): 965–972 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0502005>

#### 基于ChArUco平板的多目相机标定

Calibration of multiple cameras based on ChArUco board

应用光学. 2021, 42(5): 848–852 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0502004>

#### 多频光栅物体高精度廓形三维测量及重建研究

Research on 3D measurement and reconstruction of high-precision profile of multi-frequency grating object

应用光学. 2020, 41(3): 580–585 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0303006>

#### 基于闪烁体3D剂量测量系统中光场重聚焦位置的标定方法

Calibration method of light field refocusing position in 3D dose measurement system based on scintillator

应用光学. 2020, 41(4): 822–828 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0409804>

#### 光栅投影三维测量系统标定技术研究

Study on calibration method of grating projection 3D measuring system

应用光学. 2020, 41(5): 938–946 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0502002>

#### 立体视觉测量系统标定误差补偿

Calibration error compensation technique of stereoscopic vision measurement system

应用光学. 2020, 41(6): 1174–1180 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0601006>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 02-0307-07

# 高精度抗遮挡的四目相机三维重建系统

陈 鹏<sup>1</sup>, 刘慧婷<sup>1</sup>, 张 磊<sup>1</sup>, 王克逸<sup>1</sup>, 蔡柏林<sup>2</sup>

(1. 中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230026; 2. 安徽大学 互联网学院, 安徽 合肥 230039)

**摘 要:** 多目相机用于三维重建能够提升精度, 克服遮挡, 可多方位获取目标的三维位置。为了更准确地恢复目标在空间中的分布情况, 介绍了一种汇聚式四目相机三维重建系统。设计和搭建了围绕目标场景均匀分布四相机的重建平台, 立体标定出相邻相机的相对位姿后, 借助坐标系变换, 获取每个相机在统一坐标系中的位置和姿态, 并用传递次数最多的机位进行检验。检验结果表明, 测量出的位姿与经过传递推导的位姿一致。对 66×65 阵列的棋盘标靶进行重建, 在 45 mm 范围内最大相对误差为 0.061%; 与拟合结果相比较, 均方根误差为 0.319 3  $\mu\text{m}$ 。使用金属块进行重建实验, 能够通过其顶点恢复出形貌。实验结果表明, 该装置能够用于高精度抗遮挡的三维重建系统中。

**关键词:** 三维重建; 四目相机; 立体标定; 抗遮挡

中图分类号: TN911.73; TP302.7

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0201005

## High-precision occlusion-resistant quad-vision camera 3D reconstruction system

CHEN Peng<sup>1</sup>, LIU Huiting<sup>1</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>, WANG Keyi<sup>1</sup>, CAI Bolin<sup>2</sup>

(1. Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 2. School of Internet, Anhui University, Hefei 230039, China)

**Abstract:** Multi-camera for 3D reconstruction can improve the accuracy and overcome occlusion, allowing for the acquisition of 3D position of targets from multiple viewpoints. In order to more accurately recover the distribution of targets in space, a convergent quad-vision camera 3D reconstruction system was introduced. A reconstruction platform was designed and built with four cameras evenly distributed around the target scene. After calibrating the relative pose of adjacent cameras in the system, the position and pose of each camera in a unified coordinate system were obtained through coordinate system transformation. The pose of the camera with the most transformations was verified, and the measurement results were consistent with those derived from transformation. A chessboard target array of size 66×65 was reconstructed, with a maximum relative error of 0.061% within a range of 45 mm. Compared with the fitted results, the root-mean-square (RMS) error was 0.319 3  $\mu\text{m}$ . By using a metal block for reconstruction experiments, the shape could be recovered through its vertices. Experimental results show that the device can be used in high-precision and occlusion-resistant 3D reconstruction systems.

**Key words:** 3D reconstruction; quad-vision camera; stereo calibration; occlusion-resistant

## 引言

三维重建的研究一直是计算机视觉领域的经典方向, 三维重建技术可以表征物体的形貌, 定位

目标点的位置坐标。从 1963 年 ROBERTS L G 介绍由物体图像获取三维信息的方法开始<sup>[1]</sup>, 经过数十年的长足发展, 无论是提出经典面片重构法的

收稿日期: 2023-03-30; 修回日期: 2023-05-24

基金项目: 国家自然科学基金 (52105538, 61935008)

作者简介: 陈鹏 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事立体视觉研究。E-mail: chenpeng@mail.ustc.edu.cn

通信作者: 王克逸 (1962—), 男, 博士, 博士生导师, 主要从事光电系统、微光学与信息光学技术研究。E-mail: kywang@ustc.edu.cn

FURUKAWA A Y的工作<sup>[2]</sup>,还是基于运动恢复结构算法优化后实现的COLMAP开源工具<sup>[3]</sup>,以及香港科技大学团队基于卷积网络提出的多视角立体视觉网络框架<sup>[4]</sup>,在三维重建领域都具有划时代的重要意义。然而,大多工作需要围绕目标场景连续采集10张以上具备高重叠度的图像信息<sup>[2,3]</sup>,使用深度学习方法虽然只用一张图像就能估计出深度信息,但需要经过大量训练<sup>[5-7]</sup>。还有不少工作在双目视觉中使用优化匹配<sup>[8-9]</sup>和改善标定<sup>[10]</sup>的方法使三维测量更准确,也有其他团队采用平行式布局并在相机数目上寻求突破<sup>[11-12]</sup>,但是双目视觉和平行式布局受限于硬件结构<sup>[13]</sup>,在提升精度和抗遮挡性方面不及汇聚式四目立体视觉。

针对上述问题,本文设计并搭建了四目相机三维重建系统,提出汇聚式四目相机统一坐标系的方案。从结构设计上使目标场景尽可能产生多组匹配,能充分发挥该系统深度测量上的敏感性,相较于双目和平行式布局相机具备高精度和抗遮挡的优势。

## 1 基本原理

### 1.1 三维重建原理

图1展示了相机的简单成像模型。图1中某一点 $P$ ,在世界坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 中表示为 $P_w(x_w, y_w, z_w)$ ,经过旋转和平移操作,变换到相机坐标系 $O_c - X_c Y_c Z_c$ 中,表示为 $P_c(x_c, y_c, z_c)$ 。再经过投影,变换到图像平面坐标系 $o_{xy} - xy$ 中表示为 $p_{xy}(x, y)$ ,便完成了从三维空间到图像平面的转换。最后在同一平面内经过仿射变换,映射到像素坐标系 $o_{uv} - uv$ ,点 $p(u, v)$ 即是 $P$ 在像素平面的映射点。

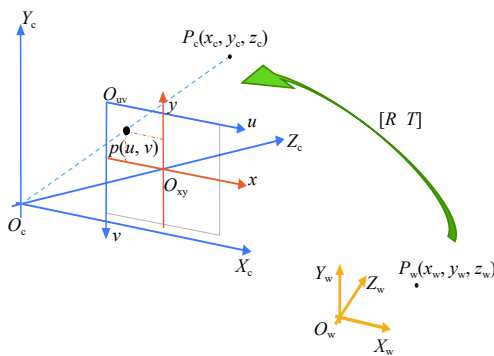


图1 相机成像模型

Fig. 1 Imaging model of camera

从世界坐标系到相机坐标系的旋转平移变换有:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $\begin{bmatrix} R & T \end{bmatrix}$ 为旋转矩阵和平移向量构成的 $3 \times 4$ 外参矩阵。从相机坐标系到像素坐标系的变换有:

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix}$$

即:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c/z_c \\ y_c/z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $f_x$ 和 $f_y$ 表示相机在 $X$ 轴和 $Y$ 轴上的焦距; $(u_0, v_0)$ 为主点坐标。设 $x'_c = x_c/z_c$ ,  $y'_c = y_c/z_c$ , 则 $(x'_c, y'_c)$ 表示点 $P$ 在某一归一化相机坐标系下的坐标。单目相机下的共线方程为

$$\begin{cases} x'_c = \frac{x_c}{z_c} = \frac{R_{11}x_w + R_{12}y_w + R_{13}z_w + T_x}{R_{31}x_w + R_{32}y_w + R_{33}z_w + T_z} \\ y'_c = \frac{y_c}{z_c} = \frac{R_{21}x_w + R_{22}y_w + R_{23}z_w + T_y}{R_{31}x_w + R_{32}y_w + R_{33}z_w + T_z} \end{cases} \quad (3)$$

基于图像的三维重建,产生立体视觉需要目标点在不同图像中的位置信息<sup>[14]</sup>。双目相机产生的对应点示意图如图2所示。

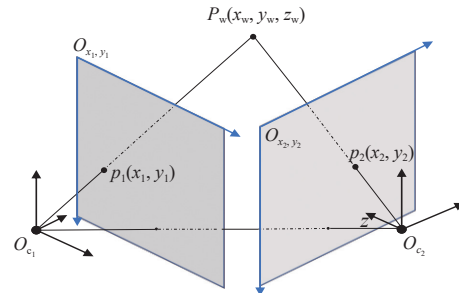


图2 双目相机产生的对应点示意图

Fig. 2 Schematic diagram of corresponding points generated by binocular camera

图2中点 $P$ 在不同的2个相机产生2个图像的点 $p_1$ 、 $p_2$ , 根据(3)式产生4个共线方程:

$$\begin{cases} x_{c1}' = \frac{R_{11}^{(1)}x_w + R_{12}^{(1)}y_w + R_{13}^{(1)}z_w + T_x^{(1)}}{R_{31}^{(1)}x_w + R_{32}^{(1)}y_w + R_{33}^{(1)}z_w + T_z^{(1)}} \\ y_{c1}' = \frac{R_{21}^{(1)}x_w + R_{22}^{(1)}y_w + R_{23}^{(1)}z_w + T_y^{(1)}}{R_{31}^{(1)}x_w + R_{32}^{(1)}y_w + R_{33}^{(1)}z_w + T_z^{(1)}} \\ x_{c2}' = \frac{R_{11}^{(2)}x_w + R_{12}^{(2)}y_w + R_{13}^{(2)}z_w + T_x^{(2)}}{R_{31}^{(2)}x_w + R_{32}^{(2)}y_w + R_{33}^{(2)}z_w + T_z^{(2)}} \\ y_{c2}' = \frac{R_{21}^{(2)}x_w + R_{22}^{(2)}y_w + R_{23}^{(2)}z_w + T_y^{(2)}}{R_{31}^{(2)}x_w + R_{32}^{(2)}y_w + R_{33}^{(2)}z_w + T_z^{(2)}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $R^{(1)}$ 、 $T^{(1)}$ 以及 $R^{(2)}$ 、 $T^{(2)}$ 分别表示第一个和第二个

个相机坐标系相对世界坐标系的旋转、平移变换;  
( $x_{c_1}', y_{c_1}'$ )和( $x_{c_2}', y_{c_2}'$ )表示点在第一个和第二个归一

化相机坐标系下的坐标。对(4)式联立 4 个等式移项后可以进一步表示为 $\mathbf{Ax} = 0$ 的形式,即:

$$\begin{bmatrix} x_{c_1}'R_{31}^{(1)} - R_{11}^{(1)} & x_{c_1}'R_{32}^{(1)} - R_{12}^{(1)} & x_{c_1}'R_{33}^{(1)} - R_{13}^{(1)} & x_{c_1}'T_z^{(1)} - T_x^{(1)} \\ y_{c_1}'R_{31}^{(1)} - R_{21}^{(1)} & y_{c_1}'R_{32}^{(1)} - R_{22}^{(1)} & y_{c_1}'R_{33}^{(1)} - R_{23}^{(1)} & y_{c_1}'T_z^{(1)} - T_y^{(1)} \\ x_{c_2}'R_{31}^{(2)} - R_{11}^{(2)} & x_{c_2}'R_{32}^{(2)} - R_{12}^{(2)} & x_{c_2}'R_{33}^{(2)} - R_{13}^{(2)} & x_{c_2}'T_z^{(2)} - T_x^{(2)} \\ y_{c_2}'R_{31}^{(2)} - R_{21}^{(2)} & y_{c_2}'R_{32}^{(2)} - R_{22}^{(2)} & y_{c_2}'R_{33}^{(2)} - R_{23}^{(2)} & y_{c_2}'T_z^{(2)} - T_y^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_{c_1}'R_{31}^{(1)} - R_{11}^{(1)} & x_{c_1}'R_{32}^{(1)} - R_{12}^{(1)} & x_{c_1}'R_{33}^{(1)} - R_{13}^{(1)} & x_{c_1}'T_z^{(1)} - T_x^{(1)} \\ y_{c_1}'R_{31}^{(1)} - R_{21}^{(1)} & y_{c_1}'R_{32}^{(1)} - R_{22}^{(1)} & y_{c_1}'R_{33}^{(1)} - R_{23}^{(1)} & y_{c_1}'T_z^{(1)} - T_y^{(1)} \\ x_{c_2}'R_{31}^{(2)} - R_{11}^{(2)} & x_{c_2}'R_{32}^{(2)} - R_{12}^{(2)} & x_{c_2}'R_{33}^{(2)} - R_{13}^{(2)} & x_{c_2}'T_z^{(2)} - T_x^{(2)} \\ y_{c_2}'R_{31}^{(2)} - R_{21}^{(2)} & y_{c_2}'R_{32}^{(2)} - R_{22}^{(2)} & y_{c_2}'R_{33}^{(2)} - R_{23}^{(2)} & y_{c_2}'T_z^{(2)} - T_y^{(2)} \end{bmatrix}$  通常满秩,对其进行 SVD 分解,

$\mathbf{V}$ 矩阵的最后一列就是 $\mathbf{Ax} = 0$ 的最小二乘解,前 3 个元素除以第 4 个元素即可得到( $x_w, y_w, z_w$ )值。

(1)式~(5)式给出了目标点在不同图像的像素坐标,恢复其在水世界坐标系的具体位置的理论推导。

## 1.2 多目相机统一坐标系

根据上述可知,目标点通过不同相机的视场能重建出水世界坐标,增加相机数目能提高重建的精度和抗遮挡性能<sup>[15-16]</sup>。相机坐标系之间的转换关系可用下式表示:

$$\mathbf{C}_k = \mathbf{R}_{jk}\mathbf{C}_j + \mathbf{T}_{jk} \quad (6)$$

(6)式表示空间中的点在  $j$  号相机坐标系的投影点坐标 $\mathbf{C}_j$ ,可以使用  $j$  号相机与  $k$  号相机之间的旋转矩阵 $\mathbf{R}_{jk}$ 和平移向量 $\mathbf{T}_{jk}$ ,转换到  $k$  号相机坐标系下的投影坐标 $\mathbf{C}_k$ 。四目相机可以根据上述相机坐标系传递模型进行以下转换:

$$\begin{cases} \mathbf{C}_2 = \mathbf{R}_{1,2}\mathbf{C}_1 + \mathbf{T}_{1,2} \\ \mathbf{C}_3 = \mathbf{R}_{2,3}\mathbf{C}_2 + \mathbf{T}_{2,3} \\ \mathbf{C}_4 = \mathbf{R}_{3,4}\mathbf{C}_3 + \mathbf{T}_{3,4} \end{cases} \quad (7)$$

进一步可以表示为

$$\begin{cases} \mathbf{C}_2 = \mathbf{R}_{1,2}\mathbf{C}_1 + \mathbf{T}_{1,2} \\ \mathbf{C}_3 = \mathbf{R}_{2,3}\mathbf{R}_{1,2}\mathbf{C}_1 + \mathbf{R}_{2,3}\mathbf{T}_{1,2} + \mathbf{T}_{2,3} \\ \mathbf{C}_4 = \mathbf{R}_{3,4}\mathbf{R}_{2,3}\mathbf{R}_{1,2}\mathbf{C}_1 + \mathbf{R}_{3,4}\mathbf{R}_{2,3}\mathbf{T}_{1,2} + \mathbf{R}_{3,4}\mathbf{T}_{2,3} + \mathbf{T}_{3,4} \end{cases} \quad (8)$$

1 号相机相对于自身的旋转矩阵为单位阵,平移向量为零向量。至此,以 1 号相机坐标系为起始坐标系,完成了四目相机坐标系的统一。

由(8)式可知,每个相机在统一坐标系下都有自身位姿的固定表达,根据(5)式,即可求出任意两相机视场中对应点的水世界坐标。

## 2 实验与分析

为验证四目相机三维重建系统重建目标点的

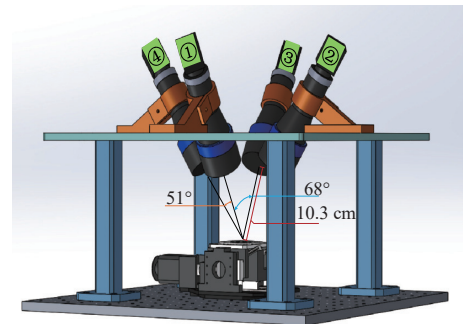
精度和抗遮挡性能,设计并搭建了四目相机三维重建平台,进行了统一坐标系和三维重建的实验。

### 2.1 实验装置

四目相机三维重建平台实物图如图 3(a)所示。该系统由一套均匀分散的汇聚式四目相机组、一个高度位移平台以及 4 张图像采集卡等组成,四目相机组的结构布局图如图 3(b)所示。



(a) 四目相机三维重建平台实物图



(b) 四目相机组的结构布局图

图 3 四目相机三维重建平台

Fig. 3 3D reconstruction platform based on quad-vision camera

四目相机组相对夹角为  $68^\circ$ , 相邻夹角为  $51^\circ$ , 工作距离为 10.3 cm, 每只相机由 OPTO 公司生产



的 TC23036 双远心光学镜头和埃科光电公司生产的 TS5MCL-156M 灰度图像传感器组成。目标物体通过高度位移台调整到合适的工作空间,相机通过 Camera Link 接口与主机连接传输图像,程序软触发控制相机采集同一场景的图像。

## 2.2 统一坐标系实验

根据(5)式和(7)式可知,统一坐标系的基础是获得所有相机之间的位姿,首先需要进行双目标定。相邻相机组成左右立体相机,拍摄同一场景

的标靶图像进行双目标定,求解两两相机之间的位姿关系<sup>[17]</sup>。使用的标靶为黑白相间的棋盘格,含有 66×65 个内角点,格点间距为 0.5 mm,加工精度±10 μm。值得注意的是,本实验双目标定需要按照相对左右的顺序进行<sup>[18]</sup>,因此,最后一组标定出 1 号相机相对 4 号相机 (Cam<sub>4,1</sub>) 的位姿,而非 4 号相机相对 1 号相机 (Cam<sub>1,4</sub>) 的位姿。标定出相邻相机之间的旋转矩阵、平移向量以及重投影误差的结果如表 1 所示。

表 1 双目相机间的外参及其重投影误差

Table 1 External parameters and reprojection error of each stereo camera

立体相机组	旋转矩阵 $R$	平移向量 $T$	重投影误差/pixel
Cam <sub>1,2</sub>	$\begin{bmatrix} 0.000\ 0 & -0.860\ 2 & -0.509\ 9 \\ 0.839\ 6 & 0.276\ 9 & -0.467\ 3 \\ 0.543\ 2 & -0.428\ 1 & 0.722\ 3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 6\ 659.251\ 0 \\ 6\ 103.255\ 2 \\ 31\ 774.554\ 7 \end{bmatrix}$	0.340 5
Cam <sub>2,3</sub>	$\begin{bmatrix} 0.001\ 4 & -0.850\ 3 & -0.526\ 3 \\ 0.847\ 1 & 0.280\ 7 & -0.451\ 3 \\ 0.531\ 4 & -0.445\ 2 & 0.720\ 7 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 21\ 692.761\ 8 \\ 18\ 610.735\ 5 \\ -27\ 990.843\ 7 \end{bmatrix}$	1.212 9
Cam <sub>3,4</sub>	$\begin{bmatrix} -0.017\ 1 & -0.863\ 2 & -0.504\ 6 \\ 0.882\ 8 & 0.223\ 8 & -0.412\ 9 \\ 0.469\ 4 & -0.452\ 5 & 0.758\ 2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 875.785\ 8 \\ 696.793\ 9 \\ 19\ 489.329\ 0 \end{bmatrix}$	1.195 3
Cam <sub>4,1</sub>	$\begin{bmatrix} 0.016\ 3 & -0.892\ 1 & -0.451\ 6 \\ 0.844\ 2 & 0.254\ 3 & -0.471\ 9 \\ 0.535\ 7 & -0.373\ 5 & 0.757\ 3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 9\ 383.368\ 9 \\ 9\ 802.680\ 3 \\ -2\ 675.676\ 5 \end{bmatrix}$	0.343 7

根据(8)式,以 1 号相机的坐标系为基准,各相机在统一坐标系后的位姿如表 2 所示。

表 2 统一坐标系中相机的位姿

Table 2 Position and pose of each camera in unified coordinate system

相机	旋转矩阵 $R$	平移向量 $T$
Cam <sub>1</sub>	$\begin{bmatrix} 1.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 \\ 0.000\ 0 & 1.000\ 0 & 0.000\ 0 \\ 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 1.000\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.000\ 0 \\ 0.000\ 0 \\ 0.000\ 0 \end{bmatrix}$
Cam <sub>2</sub>	$\begin{bmatrix} 0.000\ 0 & -0.860\ 2 & -0.509\ 9 \\ 0.839\ 6 & 0.276\ 9 & -0.467\ 3 \\ 0.543\ 2 & -0.428\ 1 & 0.722\ 3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 6\ 659.251\ 0 \\ 6\ 103.255\ 2 \\ 31\ 774.554\ 7 \end{bmatrix}$
Cam <sub>3</sub>	$\begin{bmatrix} -0.999\ 8 & -0.011\ 3 & 0.016\ 5 \\ -0.009\ 5 & -0.457\ 7 & -0.889\ 1 \\ 0.017\ 7 & -0.888\ 9 & 0.457\ 6 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -210.461\ 3 \\ 11\ 625.114\ 2 \\ -4\ 296.365\ 4 \end{bmatrix}$
Cam <sub>4</sub>	$\begin{bmatrix} 0.016\ 3 & 0.843\ 9 & 0.536\ 2 \\ -0.892\ 0 & 0.254\ 6 & -0.373\ 4 \\ -0.451\ 6 & -0.472\ 2 & 0.757\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -7\ 001.092\ 1 \\ 4\ 875.520\ 2 \\ 10\ 893.141\ 5 \end{bmatrix}$

统一坐标系后,通过 2 次关系传递推导出 4 号

相机的相对位姿,即表 2 中第 4 项数据,作为间接结果 $\begin{bmatrix} R_{1,4} & T_{1,4} \end{bmatrix}$ 。表 1 中双目标定实验检测出 1 号相机相对 4 号相机的位姿 $\begin{bmatrix} R_{4,1} & T_{4,1} \end{bmatrix}$ ,根据(9)式:

$$R_{1,4}^* = R_{4,1}^{-1}, T_{1,4}^* = -R_{4,1}^{-1}T_{4,1} \quad (9)$$

求出 4 号相机相对 1 号相机的位姿 $\begin{bmatrix} R_{1,4}^* & T_{1,4}^* \end{bmatrix}$ ,作为直接测定的结果。根据旋转矩阵和平移向量的性质,直接测得和推导的矩阵对应位置元素应相同。因此,对于  $m \times n$  矩阵,  $X_{i,j}$  表示间接推导出的矩阵  $X$  中第  $i$  行  $j$  列的元素 ( $1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$ ),  $X^*$  表示直接测出的矩阵。自定义相对误差矩阵  $\Delta E$ , 对于其中每个元素都有  $\Delta E_{i,j} = \left| \frac{X_{i,j} - X_{i,j}^*}{X_{i,j}^*} \right|$ 。对比直接测定结果和间接推导结果,验证 1.2 节方法的正确性,对比情况如表 3 所示。

从表 3 中可知,对于 4 号相机的相对位姿,相对误差矩阵中的元素最大为 0.13%,可以认为直接测定结果和间接推导结果相同,证明了上述相机统一坐标系方法的正确性。

表3 4号相机位姿的直接测定结果和推导结果对比

Table 3 Comparison of direct and derived results of position and pose for No.4 camera

	直接结果 $X^*$	推导结果 $X$	相对误差矩阵 $\Delta E$
$R$	$\begin{bmatrix} 0.016\ 3 & 0.844\ 2 & 0.535\ 8 \\ -0.892\ 1 & 0.254\ 3 & -0.373\ 5 \\ -0.451\ 5 & -0.471\ 8 & 0.757\ 2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.016\ 3 & 0.843\ 9 & 0.536\ 2 \\ -0.892\ 0 & 0.254\ 6 & -0.373\ 4 \\ -0.451\ 6 & -0.472\ 2 & 0.757\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.001\ 0 & 0.000\ 4 & 0.000\ 8 \\ 0.000\ 0 & 0.001\ 3 & 0.000\ 4 \\ 0.000\ 2 & 0.000\ 8 & 0.000\ 3 \end{bmatrix}$
$T$	$\begin{bmatrix} -6\ 995.300\ 4 \\ 4\ 878.855\ 2 \\ 10\ 887.774\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -7\ 001.092\ 1 \\ 4\ 875.520\ 2 \\ 10\ 893.141\ 5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.000\ 8 \\ 0.000\ 7 \\ 0.000\ 5 \end{bmatrix}$

2.3 三维重建实验

对棋盘标靶进行四目相机三维重建实验。在该平台中,任意2个相机采集到目标点即可以进行三维重建。若所有相机都采集到目标场景的对应点,则有 $C_4^2$ 个重建结果。同理,若有3个相机采集到对应点,则有 $C_3^2$ 个重建结果。由于本重建平台的结构布局,至少能有2个相机采集到对应点,则至少有 $C_2^2$ 个重建结果。使用四目相机采集上述标定使用的棋盘格图像,对同一场景的棋盘格进行重建。平面中每个格点都能被所有相机采集,故共有6组三维坐标数据,取平均值后融合点云,绘制出如图4所示的棋盘格点空间分布图。拟合出平面方程为 $z=13\ 060.296\ 45-0.032\ 91\ x+0.65\ 835\ y$ ,对比重建值,得到均方根误差为 $0.319\ 3\ \mu\text{m}$ 。以格点间距为真值,计算相邻点云之间的距离,测量结果如表4所示。

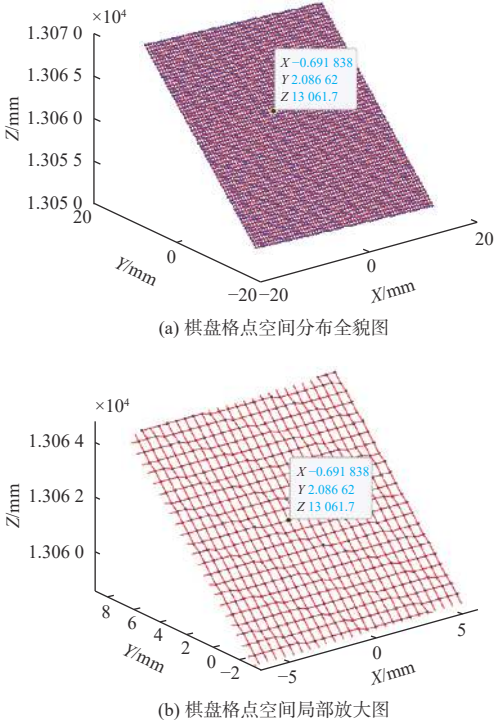


图4 四目相机重建出的棋盘格点空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution diagram of checkerboard points reconstructed by quad-vision camera

表4 棋盘格点间距测量结果

Table 4 Checkerboard grid point spacing measurement

results						mm
间距	统计数量/个	最大值	最小值	最大误差	均值	标准差
纵向间距	4 224	0.517	0.489	0.017	0.500	0.005
横向间距	4 225	0.515	0.483	0.017	0.500	0.005
所有间距	8 449	0.517	0.483	0.017	0.500	0.005

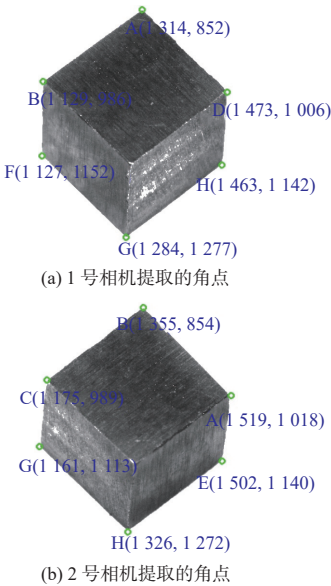
相距最远的对角棋盘格点的空间距离相对真值距离的误差如表5所示。

表5 相对误差

Table 5 Relative errors

已知间距/mm	对角距离/mm	相对误差/%
45.610	45.638	0.061
	45.594	0.035

使用尺寸为 $5\ \text{mm}\times5\ \text{mm}\times5\ \text{mm}$ 的金属方块进行重建实验,验证抗遮挡性能。四目相机单次采集方块的4个视场的图像,各图像提取的顶点坐标如图5(a)~5(d)所示。



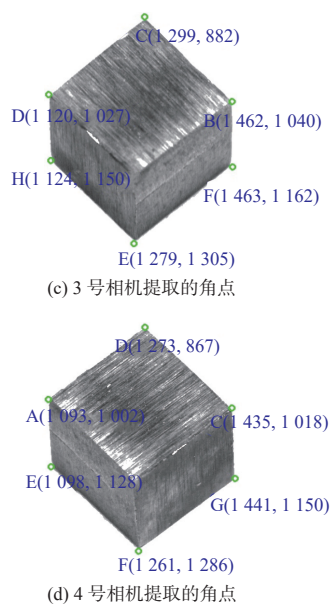


图5 各视场下提取的方块角点

Fig. 5 Extracted corner points of square in each field of view

融合3组点云后,重建出金属块三维形貌图,并使用Matlab做简单的渲染,如图6所示。实验结果表明,即使背对相机的方块顶点被遮挡,正对相机的顶点不易提取,仍然能重建出该金属方块,每个顶点至少能在3个相机的视场中被提取出,最终融合3组点云呈现该结果。

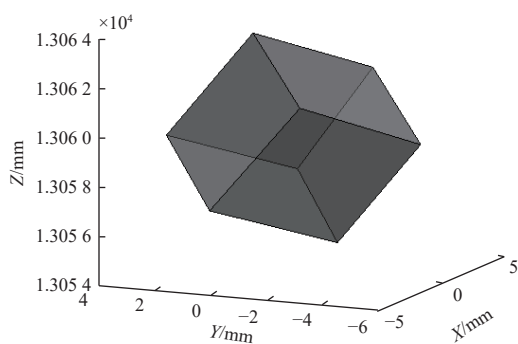


图6 金属块三维重建图

Fig. 6 Three-dimensional reconstruction diagram of metal cube

### 3 结论

本文介绍了一套高精度的四目相机三维重建系统,先对系统中的多目相机组进行了统一坐标系的实验,结果验证了统一坐标系理论方法的正确性。应用前述三维重建的原理,知道匹配点在对应该图像中的像素坐标即能重建出其世界坐标。

分别对棋盘标靶的格点以及金属方块进行重建,0.5 mm范围内的最大重建误差为0.017 mm,最大相对误差在3.4%以下;在45 mm的范围内,最大相对误差为0.061%;与拟合的平面对比,重建结果的均方根误差为0.319 3  $\mu\text{m}$ ,且顺利恢复出方块所有方向的顶点空间位置,达到高精度的同时表现出良好的抗遮挡性能。在生产中,该重建系统可应用于工业中电子元器件的缺失检测和自动化生产中的质量控制,以及在工业设计和制造领域中的三维建模。本系统还有优化的空间,相信在使用更高精度的标靶,结合高效的匹配方法后,系统的重建精度还能明显提升,在高精度的三维测量中发挥更大的作用。

### 参考文献:

- [1] ROBERTS L G. Machine perception of three-dimensional solids[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1963.
- [2] FURUKAWA Y, PONCE J. Carved visual hulls for image-based modeling[C]// Computer vision—ECCV 2006: 9th european conference on computer vision, Graz, Austria, May 7-13, 2006. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006: 564-577.
- [3] SCHONBERGER J L, FRAHM J-M. Structure-from-motion revisited[C]// Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. Piscataway: IEEE, 2016: 4104-4113.
- [4] YAO Y, LUO Z, LI S, et al. Mvsnet: depth inference for unstructured multi-view stereo[C]// Proceedings of the european conference on computer vision (ECCV). Cham: Springer, 2018: 767-783.
- [5] DUAN Z, CHEN Y, YU H, et al. RGB-fusion: monocular 3D reconstruction with learned depth prediction[J]. *Displays*, 2021, 70: 102100.
- [6] JUNG G, YOON S M. Monocular depth estimation with multi-view attention autoencoder[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2022, 81(23): 33759-33770.
- [7] PAN J, LI L, YAMAGUCHI H, et al. 3D reconstruction of Borobudur reliefs from 2D monocular photographs based on soft-edge enhanced deep learning[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022, 183: 439-450.
- [8] CHEN L, ZHONG G, HAN Z, et al. Binocular visual dimension measurement method for rectangular workpiece

- with a precise stereoscopic matching algorithm[J]. *Measurement Science and Technology*, 2022, 34(3): 035010.
- [ 9 ] LIU Y, WANG Y, CAI X, et al. The detection effect of pavement 3D texture morphology using improved binocular reconstruction algorithm with laser line constraint[J]. *Measurement*, 2020, 157(2): 107638.
- [ 10 ] HU G, ZHOU Z, CAO J, et al. Highly accurate 3D reconstruction based on a precise and robust binocular camera calibration method[J]. *IET Image Processing*, 2020, 14(14): 3588-3595.
- [ 11 ] 屠礼芬, 彭祺, 仲思东. 基于四目系统的真实场景三维建模[J]. *应用光学*, 2016, 37(1): 12-16.
- TU Lifen, PENG Qi, ZHONG Sidong. Real scene 3D modelling based on four-camera vision system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(1): 12-16.
- [ 12 ] 仲思东, 刘勇. 便携式四目立体摄影测量系统及方法: CN102679961A[P]. 2012-09-19.
- ZHONG Sidong, LIU Yong. Portable four-camera three-dimensional photographic measurement system and method: CN102679961A[P]. 2012-09-19.
- [ 13 ] 刘红帝, 吕睿, 田林雳, 等. 用于引导机器人定位的汇聚式双目视觉算法实现[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(14): 161-169.
- LIU Hongdi, LYU Rui, TIAN Linli, et al. Realization of convergent binocular vision algorithm for guiding robot localization[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(14): 161-169.
- [ 14 ] MARR D, POGGIO T. A computational theory of human stereo vision[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences*, 1979, 204(1156): 301-328.
- [ 15 ] 毕松林. 基于近红外三目立体视觉的口腔种植导航仪关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022.
- BI Songlin. Research on key technologies of dental implant navigator based on near-infrared trinocular stereo vision[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2022.
- [ 16 ] 唐峰. 基于图像处理的多目三维重建系统[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- TANG Feng. Multi-camera 3D reconstruction system based on image processing[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021.
- [ 17 ] Camera calibration and 3D reconstruction[EB/OL]. (2019-04-07). [2023-03-26]. [https://docs.opencv.org/4.1.0/d9/d0c/group\\_\\_calib3d.html#ga91018d80e2a93ade37539f01e6f07de5](https://docs.opencv.org/4.1.0/d9/d0c/group__calib3d.html#ga91018d80e2a93ade37539f01e6f07de5).
- [ 18 ] KAEHLER A, BRADSKI G. Learning OpenCV 3: computer vision in C++ with the OpenCV library[M]. Sebastopol: O'Reilly Media, 2017: 721-724.