

基于 ICP 算法的双目标定改进方法研究

郭清达¹ 全燕鸣¹ 于广平² 武彦林¹

¹华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641

²广州中国科学院沈阳自动化研究所分所, 广东 广州 511458

摘要 双目视觉作为一种非接触三维(3D)测量技术,其位姿标定结果的好坏将直接影响 3D 物体测量的精度。基于迭代最近点(ICP)算法获得两组点集之间平移和旋转参数的原理,提出了一种在传统双目位姿标定结果的基础上补偿双目标定矩阵改善精度的方法。介绍了摄像机模型、双目视觉测量模型和 ICP 算法的基本思想。用双目摄像机标定的外参数和相同的靶标坐标系获得双目视觉位姿矩阵,在此提出基于 ICP 算法获得两组点集的旋转平移矩阵补偿双目位姿矩阵的方法,以及相应的靶标角点坐标投影误差分析模型。双目摄像机采集 9 组 5×7 个角点的靶标标定图像,应用 ICP 算法补偿双目位姿矩阵,并采用误差模型对 9 组标定结果进行了分析,双目结构光标定改进实验结果表明,应用 ICP 算法补偿双目标定模型能显著地提高双目标定的精度。

关键词 机器视觉; 双目标定改进; 点云匹配; 迭代最近点算法

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1215003

Improved Binocular Calibration Based on ICP Algorithm

Guo Qingda¹ Quan Yanming¹ Yu Guangping² Wu Yanlin¹

¹School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China

²Shenyang Institute of Automation Guangzhou Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 511458, China

Abstract Binocular vision is a new kind of non-contact three-dimensional (3D) measurement technology, the calibration result will directly affect the precision of the 3D object measurement. Based on the iterative closest point (ICP) algorithm principle to obtain translation and rotation parameters between two point sets, a method is proposed by compensating binocular stereo calibration matrix to improve the precision on the basis of the results of traditional binocular pose calibration. The camera model, binocular vision measurement model and the basic steps of the ICP algorithm are introduced. The external parameters of binocular vision and the same target plane are used for obtaining binocular vision pose matrix, and a method is proposed by using the rotation and translation matrix of the two groups of point set to compensate binocular pose matrix based on ICP algorithm. The analysis model of corresponding target point coordinates projection error is established. Nine sets of calibration images including 5×7 points are collected, and the binocular vision calibration parameters are obtained, and the pose matrix using the ICP algorithm is compensated and nine sets of calibration error by using points coordinates projection error model are analyzed. Experimental results show that the application of ICP algorithm used to compensate the binocular calibration model could significantly improve the accuracy of binocular calibration.

Key words machine vision; improved binocular calibration; point cloud register; iterative closest point algorithm

OCIS codes 150.0155; 150.1488; 150.1135; 150.6910

1 引 言

由于单目视觉测量无法估计深度信息等方面约束,双目视觉是在单目视觉基础上发展而成的一种快速

收稿日期: 2016-06-06; 收到修改稿日期: 2016-08-02

基金项目: 广东省协同创新项目产学研合作专项(2014A090906015)

作者简介: 郭清达(1986—),男,博士研究生,主要从事机器视觉和工业机器人方面的研究。

E-mail: qingda0501@163.com

导师简介: 全燕鸣(1957—),女,博士,教授,主要从事机械制造及其自动化、检测、机器视觉应用等方面的研究。

E-mail: meymquan@scut.edu.cn(通信联系人)

非接触测量技术,多应用在深度估计、姿态测量、三维重构等场合^[1-3]。在双目视觉中,为了更精确地获得被测工件信息,需要精确地标定双目摄像机坐标系的相对位置姿态。双目姿态的标定,是由双目摄像机外参数以及参考相同靶标坐标系的角点坐标而获得。

摄像机的单目标定技术,就是在给定成像平面特征点与靶标坐标系中角点一一对应关系上,获得笛卡尔空间的摄像机模型内外参数。摄像机标定一般情况下分为传统相机标定、主动视觉标定和摄像机自标定^[4-6]。其中张氏平面标定方法,介于传统标定和自标定方法之间,分为线性求解和非线性优化,可快速地获得摄像机的内外参数及畸变系数^[7]。在具体应用场合下的双目标定方法中,孙军华等^[8]针对大视场视觉测量应用,提出了一种基于基线尺的大视场双目视觉传感器标定方法;李光乐等^[9]针对水下摄像机非线性数学模型,提出了基于张氏标定方法并结合 Jean-Yves Bouguet 灭点标定的改进标定方法。如何提高单目或双目摄像机标定精度,一直是国内外学者研究的热点。在参考物靶标,加工精度较高的靶标、应用于干扰较小的圆形标定点或利用三维精密靶标等^[10];在摄像机模型方面,应用五参数模型、多阶(2阶、4阶、6阶)径向畸变和切向畸变模型;在图像获取和角点提取方面,调整摄像机采集参数、外置均匀的光源、应用图像预处理以及角点亚像素检测等方法^[11]。

本文介绍了一种应用迭代最近点(ICP)算法提高双目标定精度技术,通过张氏标定方法获得双目摄像机内外参数,参考相同的靶标坐标系获得双目视觉的位姿矩阵,利用双目摄像机的外参数和位姿矩阵得到角点投影点集,应用ICP算法与角点原始点集匹配,获得点集旋转平移矩阵补偿双目视觉的姿态矩阵,能够得到较好的双目标定结果。

2 双目视觉数学模型

2.1 摄像机模型

摄像机数学模型采用小孔成像的原理,在笛卡尔空间中建立景物点与成像点之间的映射关系。令 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 为像素 $p(u, \nu)$ 投射在世界坐标的点,那么两个坐标关系为

$$s \cdot p = A_p [R, t] P, \quad (1)$$

式中 $p = (u, \nu, 1)^T$ 是像素坐标系的齐次坐标, $P = (X_w, Y_w, Z_w, 1)^T$ 是世界坐标系的齐次坐标, A_p 是内参数矩阵, $[R, t]$ 是外参数矩阵, R 和 t 分别是旋转矩阵和平移矩阵, s 是缩放因子。在张氏摄像机模型中,靶标的世界坐标系的 Z_w 轴设置为 0。

2.2 双目视觉模型

如图 1 所示^[12],双目立体视觉利用两台摄像机之间的位姿 ${}^{C_1}M_{C_2}$ 和图像特征匹配点对,计算出空间点 P 在摄像机 1 坐标系中的位置。设空间点 P 在摄像机 C_1 中的像素坐标为 (u_1, ν_1) ,由(1)式的内参数矩阵得到焦距归一化的坐标 $P_{1C_1}(x_{1C_1}, y_{1C_1})$,同理得到在摄像机 C_2 中的坐标为 $P_{1C_2}(x_{2C_1}, y_{2C_1})$ 。在摄像机 C_1 外的空间点 P 在光轴中心点 O_1 与点 P_{1C_1} 构成的直线上,即有方程

$$\begin{cases} x = x_{1C_1} t_1 \\ y = y_{1C_1} t_1, \\ z = t_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中 (x, y, z) 是 P 点坐标, t_1 是比例因子。将点 P_{1C_2} 在摄像机 C_2 中的坐标转换到摄像机 C_1 坐标系,表示为

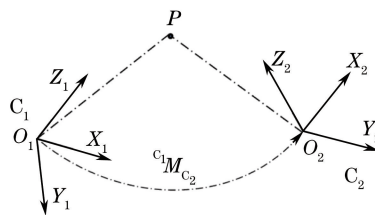


图 1 双目立体视觉示意图

Fig. 1 Schematic of binocular stereo vision model

$$[x_{2C_{11}}, y_{2C_{11}}, z_{2C_{11}}, 1]^T = {}^{C_1}M_{C_2} [x_{2C_1}, y_{2C_1}, 1, 1]^T. \quad (3)$$

由于空间点 P 同样在摄像机的光轴中心点 O_2 与点 P_{1C_2} 构成的直线上, 即有方程

$$\begin{cases} x = p_x + (x_{2C_{11}} - p_x)t_2 \\ y = p_y + (y_{2C_{11}} - p_y)t_2, \\ z = p_z + (z_{2C_{11}} - p_z)t_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中 p_x 、 p_y 和 p_z 是矩阵 ${}^{C_1}M_{C_2}$ 中的位置偏移量, t_2 是比例因子。因此, 获得 ${}^{C_1}M_{C_2}$ 位姿矩阵是实现空间点精确测量的基础。

3 ICP 算法

1992 年, Besl 等^[13-14] 提出 ICP 算法, 通过建立两个点集的对应匹配点, 计算两个点集之间的变换参数, 以满足给定的收敛精度, 获得两个点集之间的平移和旋转参数, 进行相关点集的平移和旋转, 完成点集匹配。

设第一个点集 $\{P_i | P_i \in R^3, i=1, 2, \dots, N\}$, 第二个点集 $\{Q_i | Q_i \in R^3, i=1, 2, \dots, M\}$, 两个点集的对齐配准转换为使目标函数最小, 即

$$f(\mathbf{R}, \mathbf{T}) = \min \sum_{i=1}^n \|Q_i - (\mathbf{R}P_i + \mathbf{T})\|^2, \quad (5)$$

式中 \mathbf{T} 和 \mathbf{R} 分别为两个点集之间的平移和旋转参数。

ICP 算法的目的是在满足某种度量准则下, 获得 \mathbf{T} 和 \mathbf{R} , 其计算步骤为

- 1) 计算 P_i 点中的每一个点在 Q_i 点集中的对应最近点;
- 2) 求得步骤 1) 平均距离最小的刚体变换参数, 即 \mathbf{T} 和 \mathbf{R} ;
- 3) 利用获得的 \mathbf{T} 和 \mathbf{R} 对 P_i 进行旋转平移, 得到新的点集;
- 4) 新的点集与 Q_i 点集是否满足目标函数, 满足则停止, 否则进行下一次迭代。

4 双目标定改进模型与误差

4.1 双目标定

双目标定是计算双目视觉系统中两台摄像机坐标系之间的相对位姿关系, 即(3)式中的 ${}^{C_1}M_{C_2}$ 矩阵, 包含旋转矩阵和平移矩阵^[15]。对于在靶标坐标系中的坐标点 P , 由张氏标定方法得到点 P 在双目摄像机坐标系位置, 表示为

$$\begin{cases} P_l = R_l P + T_l \\ P_r = R_r P + T_r \end{cases}, \quad (6)$$

式中 P_l 和 P_r 分别为点 P 在左右摄像机坐标系中的坐标, R_l 和 R_r 分别为左右摄像机坐标系相对于靶标坐标系的旋转矩阵, T_l 和 T_r 分别为左右摄像机坐标系相对靶标坐标系的平移矩阵。由于左右摄像机具有相同的靶标坐标系, 则(6)式可表示为

$$\begin{cases} P_l = R_l R_r^{-1} P_r + T_l - R_l R_r^{-1} T_r \\ {}^{C_1}M_{C_2} = [R_l R_r^{-1}, T_l - R_l R_r^{-1} T_r] \end{cases}, \quad (7)$$

式中 $R_l R_r^{-1}$ 表示将右摄像机坐标系转换到左摄像机坐标系的旋转矩阵, $T_l - R_l R_r^{-1} T_r$ 表示将右摄像机坐标系转换到左摄像机坐标系的平移矩阵。

4.2 标定补偿模型

对于靶标坐标系, 在张氏标定模型里 Z_w 轴设置为 0, 并按照右手坐标系规则, 如图 2 所示, 靶标有 5×7 个角点坐标。靶标坐标系角点坐标 P 的投影, 依次用右摄像机外参数矩阵 $[R_r, t_r]$ 、双目位姿矩阵 ${}^{C_1}M_{C_2}$ 和左摄像机外参数矩阵 $[R_l, t_l]$ 映射到靶标坐标系中, 并与靶标坐标系原始坐标点进行对照分析, 如图 3 所示。

靶标角点投影坐标(35 个坐标点)与靶标原始角点坐标(35 个坐标点)可看作是空间中两组点集。由图 3 可知, 两组点集对应点之间的距离(最大距离为 2 mm)远小于于点集坐标之间的距离(选用 70 mm), 两组点集不须作大幅度旋转平移就可完成匹配。由 ICP 算法的原理, 指定未作矩阵变换的靶标坐标为参考点集,

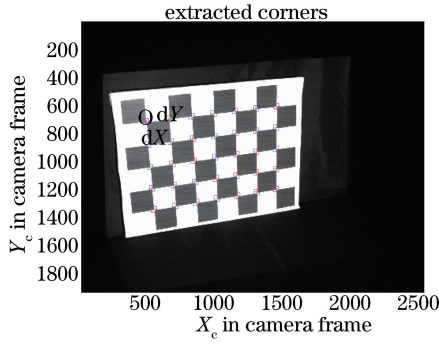


图 2 靶标坐标系与提取角点图

Fig. 2 Target coordinate system and point extraction

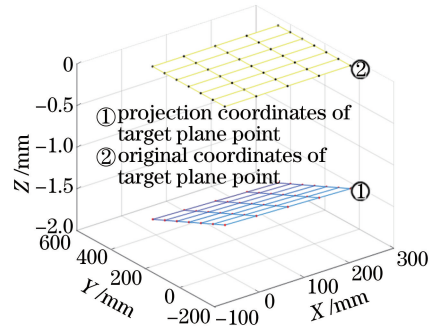


图 3 靶标角点投影点集与实际点集

Fig. 3 Projection point set and original point set

靶标角点的投影坐标为待匹配点集,待匹配点集为

$$P' = [R_1, t_1]^{-1} {}^{c_1}M_{c_2} [R_r, t_r] P. \quad (8)$$

获得两组点集之间的旋转平移矩阵 $M' = [R', T']$, 则双目摄像机的位姿矩阵可精确表示为

$${}^{c_1}M'_{c_2} = M' {}^{c_1}M_{c_2}. \quad (9)$$

4.3 误差分析模型

摄像机标定的误差分析,一般采用像素重投影分析,这里不考虑摄像机像素与坐标系之间的非线性映射(镜头畸变、内参模型等)。与此同时,双目标定的姿态矩阵是在相同靶标坐标系下的双目摄像机外参数获得,因此采用靶标坐标系投影坐标进行分析。获得双目视觉的外参数 $[R, t]$ 以及相对位姿矩阵 ${}^{c_1}M_{c_2}$, 由(8)式得到靶标坐标的投影误差为

$$\Delta E = \| P - [R_1, t_1]^{-1} {}^{c_1}M_{c_2} [R_r, t_r] P \|_2. \quad (10)$$

由(8)~(10)式,同理得到标定改进后的靶标坐标投影误差为

$$\Delta E' = \| P - [R_1, t_1]^{-1} M' {}^{c_1}M_{c_2} [R_r, t_r] P \|_2. \quad (11)$$

5 实验结果分析

5.1 双目标定改进步骤

双目标定改进流程如图 4 所示,其具体步骤为:

- 1) 安装双目摄像机并放置不同姿态的靶标,获得不少于三组的标定照片;
- 2) 按照张氏标定方法,指定靶标坐标系,如图 2 所示,提取靶标图像角点;
- 3) 根据图像角点与靶标角点的对应关系,求得双目摄像机的内参数 A_p 和外参数 $[R, t]$;
- 4) 按照(7)式,获得双目摄像机的位姿矩阵 ${}^{c_1}M_{c_2}$;

5) 对双目标定中的任意一组数据,在双目摄像机的外参数和位姿矩阵,把靶标角点坐标投影至靶标坐标系内,如图 3 所示;

- 6) 应用 ICP 算法(点到点搜索规则),获得投影坐标的点集相对于原始坐标的点集的旋转平移矩阵 M' ;

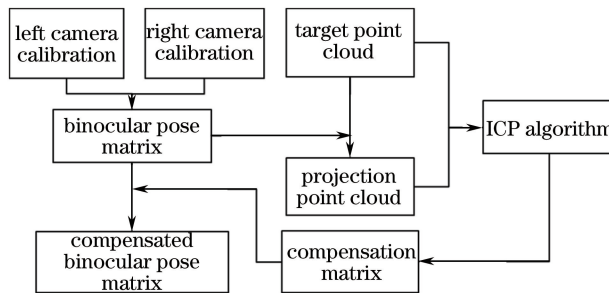


图 4 双目标定改进流程

Fig. 4 Flow chart of improved binocular calibration

7) 按照(9)式,对双目摄像机位姿矩阵进行补偿,得到 $M' {}^c_1 M {}^c_2$ 。

分析双目标定改进流程,其计算量相对传统的双目位姿标定,引入了靶标角点坐标的旋转平移投影和两组点集匹配。由于靶标角点坐标经过双目位姿矩阵的旋转平移,其投影坐标近似接近实际坐标,应用ICP算法可快速准确地对两组点集进行匹配并获得补偿矩阵。

5.2 双目标定补偿实验

在实验中摆放不同姿态的靶标(5×7个角点,矩形尺寸70 mm×70 mm),得到9组标定数据,并对双目摄像机分别进行标定,获得双目摄像机的相对姿态和双目摄像机与靶标的姿态,如图5所示。双目标定的改进采用第一组的标定数据,利用双目外参数和位姿矩阵获得靶标角点的投影坐标,采用ICP算法得到靶标角点投影坐标相对于角点原始坐标的旋转平移矩阵,对双目摄像机坐标系的姿态矩阵进行补偿,得到标定矩阵补偿后的旋转平移矩阵,如表1所示。第一组应用ICP算法的原始坐标、投影坐标以及补偿后的投影坐标,如表2所示,可以看到补偿后的投影坐标近似重合原始坐标。

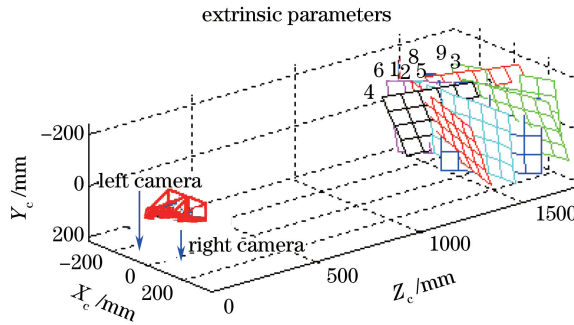


图5 双目摄像机与靶标姿态图

Fig. 5 Binocular cameras and target posture figure

表1 双目姿态矩阵、补偿矩阵与补偿后的双目姿态矩阵

Table 1 Matrix of binocular vision, compensation matrix and matrix of binocular vision after compensation

Rotation matrix and shift matrix of binocular vision	Rotation matrix and shift matrix of two sets (compensation matrix)	Compensated rotation matrix and shift matrix of binocular vision
$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.9960 & 0.0015 & 0.0892 \\ -0.0025 & 0.9999 & 0.0107 \\ -0.0892 & -0.0109 & 0.9960 \end{bmatrix}$	$\mathbf{R}_{M'} = \begin{bmatrix} 1.0000 & -0.0000 & -0.0011 \\ 0.0000 & 1.0000 & -0.0002 \\ 0.0011 & 0.0002 & 1.0000 \end{bmatrix}$	$\mathbf{R}' = \begin{bmatrix} 0.9959 & -0.0025 & -0.0902 \\ 0.0015 & 0.9999 & -0.0111 \\ 0.0902 & 0.0109 & 0.9959 \end{bmatrix}$
$\mathbf{T} = [-120.8996 \quad 0.1345 \quad 2.2038]$	$\mathbf{T}_{M'} = [0.2310 \quad 0.4639 \quad -1.1372]$	$\mathbf{T}' = [-120.6662 \quad 0.6004 \quad 1.1962]$

表2 第一组靶标角点原始坐标、投影坐标与补偿后的投影坐标

Table 2 Original coordinates, projection coordinates and projection coordinates after compensation

No.		1	2	3	4	5	...	31	32	33	34	35
Original coordinates of the first group	X	0	70	140	210	280	...	0	70	140	210	280
	Y	420	420	420	420	420	...	0	0	0	0	0
	Z	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0
Projection coordinates of the first group	X'	-0.06	69.94	139.94	209.94	279.94	...	-0.24	69.76	139.76	209.76	279.76
	Y'	418.20	418.17	418.14	418.11	418.08	...	-1.80	-1.83	-1.86	-1.89	-1.92
	Z'	-1.83	-1.85	-1.86	-1.87	-1.89	...	-1.42	-1.43	-1.45	-1.46	-1.48
Compensated projection coordinates	X ₁	0.00	70.00	140.00	210.00	280.00	...	0.00	70.00	140.00	210.00	280.00
	Y ₁	420	420.00	420.00	420	420	...	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Z ₁	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

5.3 误差分析

以第一组的点集旋转平移矩阵对双目位姿矩阵的进行补偿,由表 2 可知,补偿后的第一组靶标投影角点与实际靶标角点近似重合;由于双目视觉不确定因素的影响,其他组的双目靶标角点坐标投影仍具有一定的误差,如图 6 所示,由下至上依次为靶标角点补偿前、补偿后的投影坐标以及靶标角点原始坐标。双目位姿矩阵补偿后,靶标角点投影坐标后比未补偿的角点投影坐标更接近靶标角点原始坐标。

进一步地,对 9 组双目标定分别应用 ICP 算法获得补偿矩阵,分别计算每一个补偿矩阵在 9 组双目补偿前后的靶标角点坐标投影误差分析,如图 7 所示。任意一组双目标定补偿后的投影坐标平均误差,都显著地小于未补偿的投影坐标平均误差 2.5960 mm,每一组应用 ICP 算法获得补偿矩阵并在当前组的坐标投影残差几乎为零,如表 3 所示。

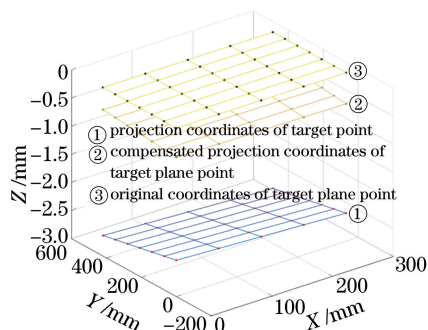


图 6 双目标定改进前后的靶标角点投影坐标图

Fig. 6 Target point projection coordinates of binocular calibration before and after improvement

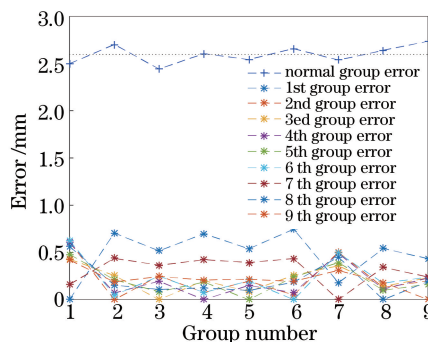


图 7 9 组靶标角点投影坐标误差图

Fig. 7 Projection coordinates errors of 9 groups of target points

表 3 9 组标定补偿后的投影平均和当前组误差

Table 3 Average errors and the current set errors after calibration compensation of 9 groups

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Comment
Average error	0.4847	0.2240	0.2185	0.2145	0.2065	0.2337	0.3110	0.2088	0.2186	
Current set error	1.5483	2.1235	9.1732	0.1692	8.4196	0.1937	6.4733	7.7585	0.1056	10^{-13}

5.4 双目结构光标定改进实验

在双目结构光系统中,左右摄像机获得两组点云,映射到同一坐标系中进行点云配准拼接,系统结构如图 8 所示。双目结构光系统采用局部单应性矩阵的方法^[16],采集双目三组标定数据,获得投影仪相对左摄像机的位姿矩阵、投影仪相对右摄像机的位姿矩阵以及左右摄像机的位姿矩阵。

采用 ICP 算法,对第一组的靶标投影后的坐标点集相对原始坐标点集进行补偿位姿矩阵求解,得到

$$\mathbf{R}_{M'} = \begin{bmatrix} 0.9999 & -0.0014 & -0.0128 \\ 0.0013 & 1.0000 & -0.0035 \\ 0.0128 & 0.0035 & 0.9999 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\mathbf{T}_{M'} = [-9.6911 \quad -1.5601 \quad 14.7942]。 \quad (13)$$

如图 9 所示,左右摄像机分别与投影仪组成结构光系统,投影仪投射正交格雷码序列,左右摄像机同步采集图像并解码获得在左右摄像机坐标系中的场景点云。把左摄像机坐标系中的点云映射到右坐标系中,可

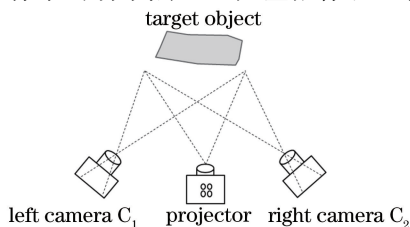


图 8 双目结构光系统图

Fig. 8 Diagram of binocular structure light system

进一步地对目标物进行拼接配准等,如图 10 所示。从映射后的两组场景点云,可以看到双目位姿矩阵经过补偿后的两组配准点云[图 10(b)]比未补偿的两组配准点云[图 10(a)]效果更好。实验验证了在获得双目位姿矩阵后,基于 ICP 算法匹配映射前后的靶标角点坐标获得位姿矩阵,补偿双目摄像机位姿矩阵以提高系统精度。

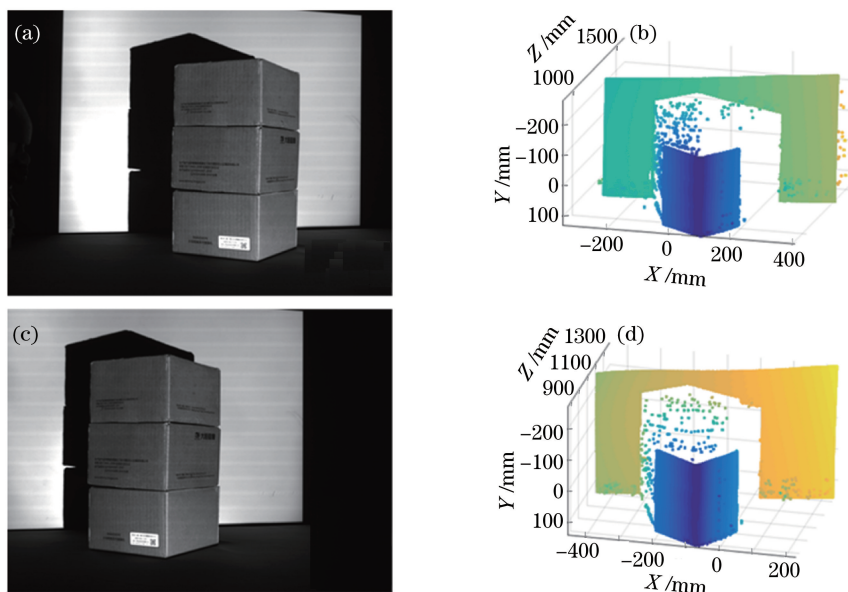


图 9 场景图及其点云。(a)左摄像机场景图;(b)左摄像机场景点云;(c)右摄像机场景图;(d)右摄像机场景点云
Fig. 9 Scene images and their point clouds. (a) Left camera scene image; (b) left camera point cloud; (c) right camera scene image; (d) right camera point cloud

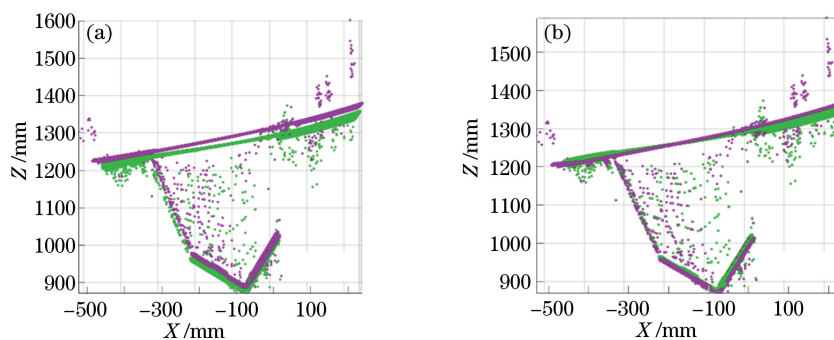


图 10 映射在右摄像机坐标系中的左右场景点云。(a)双目未补偿标定的两组点云;(b)双目已补偿标定的两组点云
Fig. 10 Left and right scene point clouds in the coordinate system of the right camera. (a) Two groups of point cloud without binocular calibration compensation; (b) two groups of point cloud with binocular calibration compensation

6 结 论

双目立体改进标定一般是通过改善单目标定或适应不同场合的标定方法或精度改进。在 ICP 算法的点集匹配思想下,提出应用双目视觉标定的姿态矩阵对靶标角点进行旋转平移投影,参考靶标角点原始坐标集应用 ICP 点集匹配获得补偿旋转平移矩阵。补偿后的 9 组靶标角点投影坐标平均误差,明显小于传统标定的靶标角点投影坐标平均误差 2.5960 mm,结构光系统的双目标定改进实验结果表明,该方法提高了标定精度。

参 考 文 献

- 1 Quan Yanming, Li Shumei, Mai Qingqun. On-machine 3D measurement of workpiece dimensions based on binocular vision[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(4): 1054-1061.
全燕鸣, 黎淑梅, 麦青群. 基于双目视觉的工件尺寸在机三维测量[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(4): 1054-1061.

- 2 Gu Cheng, Qian Weixian, Chen Qian, *et al.* Rapid head detection method based on binocular stereo vision[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0108001.
顾 骋, 钱惟贤, 陈 钱, 等. 基于双目立体视觉的快速人头检测方法[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0108001.
- 3 Zhou Jiali, Zhang Shuyou, Yang Guoping. A 3D face reconstruction and recognition method based on passive binocular stereo vision[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(2): 123-131.
周佳立, 张树有, 杨国平. 基于双目被动立体视觉的三维人脸重构与识别[J]. 自动化学报, 2009, 35(2): 123-131.
- 4 Faugeras O, Toscani G. The calibration problem for stereo[C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1986: 15-20.
- 5 Bénallal M, Meunier J. Camera calibration with simple geometry[C]. The 2003 International Conference on Image and Signal Processing, 2003.
- 6 Guillou E, Meneveaux D, Maisel E, *et al.* Using vanishing points for camera calibration and coarse 3D reconstruction from a single image[J]. The Visual Computer, 2000, 16(7): 396-410.
- 7 Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- 8 Sun Junhua, Wu Ziyang, Liu Qianzhe, *et al.* Field calibration of stereo vision sensor with large FOV[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(3): 633-640.
孙军华, 吴子彦, 刘谦哲, 等. 大视场双目视觉传感器的现场标定[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(3): 633-640.
- 9 Li Guangle, Huang Wenyong, Liu Qingsong, *et al.* Improved Zhang's calibration method and experiments for underwater binocular stereo-vision[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1215006.
李光乐, 黄文有, 刘青松, 等. 面向水下双目视觉的改进张氏标定方法及实验[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1215006.
- 10 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.
- 11 Yang Ming, Wang Haihui, Chen Jun, *et al.* Methods of accuracy improvement based on binocular calibration system[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2012, 34(1): 69-73.
杨 明, 王海晖, 陈 君, 等. 双目标定系统精度提高的方法[J]. 武汉工程大学学报, 2012, 34(1): 69-73.
- 12 Xu De, Tan Min, Li Yuan. Visual measurement and control for robots[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.
徐 德, 谭 民, 李 原. 机器人视觉测量与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- 13 Besl P J, Mckay N D. A method for registration of 3D shape[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-255.
- 14 Liu Hui, Wang Boxiong, Ren Huaiyi, *et al.* ICP algorithm for point cloud data matching in a binocular structured light system[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2012, 52(7): 946-950.
刘 辉, 王伯雄, 任怀艺, 等. ICP算法在双目结构光系统点云匹配中的应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(7): 946-950.
- 15 Liu Fengcai, Xie Minghong, Wang Wei. Stereo calibration method of binocular vision[J]. Computer Engineering and Design, 2011, 32(4): 1508-1512.
刘奉材, 谢明红, 王 伟. 双目视觉的立体标定方法[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(4): 1508-1512.
- 16 Moreno D, Taubin G. Simple, accurate, and robust projector-camera calibration [C]. 2012 Second International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization & Transmission, 2012: 464-471.