

引用格式: HOU Maosheng, CHEN Yuqing, SHI Zhengxue, et al. Self-calibration Method of Laser Scanning Projection System Combined with Monocular Vision[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(2):0212002
侯茂盛,陈雨情,史铮雪,等.融合单目视觉的激光扫描投影系统自标定方法[J].光子学报,2021,50(2):0212002

融合单目视觉的激光扫描投影系统自标定方法

侯茂盛,陈雨情,史铮雪,李竺悦

(长春理工大学 光电工程学院 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室,长春 130022)

摘 要:为解决现有激光扫描投影系统中需要手动标定的问题,提出了融合单目视觉的激光扫描投影系统自标定方法。首先建立了融合单目视觉技术的激光扫描投影系统模型,给出了融合单目视觉的激光扫描投影系统自标定方法;其次建立了单目相机与激光扫描投影系统、被投影物体之间的数学模型;最后运用 Matlab 软件进行模拟仿真,证明融合单目视觉的激光扫描投影系统自标定方法可以解决上述问题。同时为验证融合单目视觉的激光扫描投影系统自标定方法的精度是否满足激光扫描投影系统的需求,将 Matlab 软件求解的实验结果与 SA 软件求解的实验结果进行对比,并分析精度与距离、角度等外部因素的关系。仿真实验结果表明:当距离一定时,单目相机旋转角度为 55° 时,单目相机距离投影仪和被投影物体的范围为 1.5~3 m,且满足投影仪的精度要求。同时通过自主搭建新型激光扫描投影系统,证明了融合单目视觉的激光扫描投影系统自标定方法具有实际可操作性和可行性。

关键词:激光扫描投影;单目视觉;自标定;位姿转换;粒子群优化

中图分类号:TN249

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215002.0212002

Self-calibration Method of Laser Scanning Projection System Combined with Monocular Vision

HOU Maosheng, CHEN Yuqing, SHI Zhengxue, LI Zhuyue

(Key Laboratory of Optoelectronic Measurement and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to solve the problem of manual calibration in the existing laser scanning projection system, the self-calibration method of laser scanning projection system combined with monocular vision was proposed. Firstly, laser scanning projection system model combined with monocular vision technology is established, and the self-calibration method of laser scanning projection system combined with monocular vision is studied. Secondly, the mathematical model between camera and laser scanning projection system and projected object is founded. Finally, it is proved that the self-calibration method of laser scanning projection system combined with monocular vision can solve the problem by the simulation experiment. At the same time, the accuracy of the self-calibration method is verified to meet the requirement of the laser scanning projection system by comparing the experimental results of Matlab and SA. The relationship between accuracy and external factors such as distance and angle is analyzed. The simulation results show that when the distance is fixed and the rotation angle of the camera is 55° , the range of the camera from the projector and projected object is 1.5~3 m and meet the accuracy requirement of the projector. By independently building a new laser scanning projection system, the studied method has

基金项目:国家自然科学基金(No.61805022),吉林省自然科学基金(No.20200201229JC)

第一作者(通讯作者):侯茂盛(1984-),男,讲师,博士,主要研究方向为先进光学仪器与精密测量。Email:housmh@cust.edu.cn

收稿日期:2020-08-25;录用日期:2020-11-12

<http://www.photon.ac.cn>

practical operability and feasibility.

Key words: Laser scanning projection; Monocular vision; Self-calibration; Pose conversion; Particle swarm optimization

OCIS Codes: 120.4640; 140.7300; 280.3400

0 引言

激光扫描投影技术是基于零部件的三维CAD数模,通过驱动二维振镜扫描系统使激光光束被快速转折,在三维空间中任意位置的投影区域中,投影出由激光光线快速循环扫描形成的零部件外形轮廓线框。该技术现在已广泛应用在航空航天领域的复合材料的铺贴制造,制造领域的零部件装配^[1-2]等,现场工作人员根据直观有效的信息有序地进行技术操作。

2013年,RUEBK D研发了一种新型的投影方法,该方法通过激光扫描投影仪先投影到任意位置,之后用摄像机获取投影工件的位置信息,最后通过计算机建立三者的关系,从而使投影仪投影到投影工件的准确位置^[2]。此外,他还研发了一种具有运动补偿的激光投影方法,该方法通过摄像机来确定投影工件相对激光扫描投影仪的相对位置,从而对激光扫描投影仪下一个投影位置进行预测^[3]。国内重点对先进制造工业中的激光扫描投影系统进行了研究。长春理工大学课题组近年来在激光扫描投影技术与仪器研发方面开展了大量工作,先后研究了结合激光测距的新型激光扫描投影系统与标定方法^[5],研究了改进Fleury算法优化扫描投影路径^[4],再一步研究了一种基于多特征图元提取与投影文件自动生成方法^[6],基于时间补偿的激光扫描投影图形偏差矫正方法^[7]等。

目前国内开展融合视觉测量的激光扫描投影技术研究较少。现有的激光扫描投影标定技术需要反复地手动引导激光扫描光束至合作目标的中心位置,才能完成对多个合作目标的扫描并提取中心位置对应的精准振镜转角值,才能够建立激光扫描投影系统和被投影物体之间的坐标转换关系。上述过程被称之为“标定”,该过程操作复杂且消耗时间长。而更为严重的是,一旦被投影物体和投影仪器之间的相对位姿关系发生变化,还需要重新手动完成上述步骤,严重影响了激光扫描投影仪器在制造装配现场使用的可靠性和普适性。

针对上述问题,本文提出了一种融合单目视觉测量的新型激光扫描投影系统自标定方法,实现了仅需要通过单目相机分别拍摄被投影物体和激光扫描投影仪器上的多个合作目标即可自动解算并获得各坐标转换关系;解决了现有技术中存在的手动标定问题,为今后操作人员实际现场操作提供了便利。

1 系统原理

为解决激光扫描投影系统标定技术中需要手动反复多次对多个合作目标进行扫描,从而建立激光扫描投影系统和被投影物体之间坐标转换关系的问题,融合了摄影测量系统,并搭建了新型激光扫描投影系统,如图1所示为新型激光扫描投影系统的原理图。该系统主要由激光器、聚焦模块、扫描振镜模块、合作目标、CAD数模、被投影物体、探测模块、单目相机、转台等组成。图1所示的新型激光扫描投影系统中定义了4个三维坐标系:被投影物体坐标系定义为 $O_w-X_wY_wZ_w$;单目相机获取被投影物体位姿信息的坐标系定义为 $O_{C1}-X_{C1}Y_{C1}Z_{C1}$;激光扫描投影仪坐标系定义为 $O_P-X_PY_PZ_P$;单目相机获取激光扫描投影仪位姿信息的坐标系定义为 $O_{C2}-X_{C2}Y_{C2}Z_{C2}$ 。单目相机分别对被投影物体和激光扫描投影系统上的多个合作目标进行图像获取,再运用融合摄影测量的激光扫描投影系统的自标定方法进行解算,最后求解出被投影物体和激光扫描投影系统的位姿转换关系。

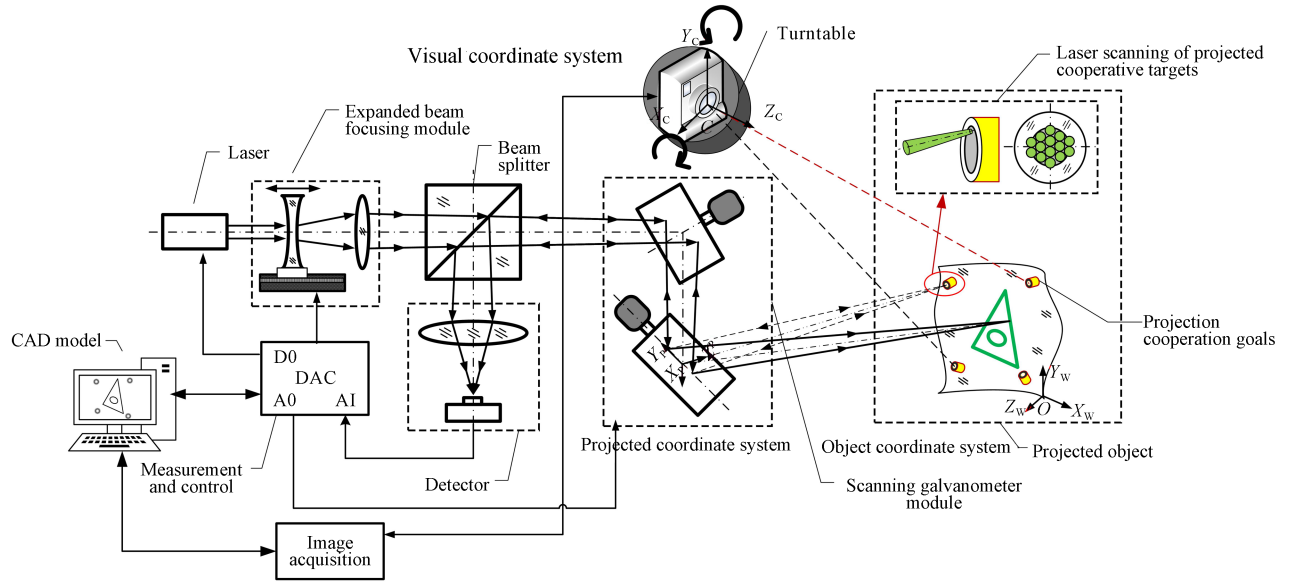


图1 新型激光扫描投影系统的原理图

Fig.1 Schematic diagram of the new laser scanning projection system

2 方法理论

为了解算被投影物体和激光扫描投影仪之间的位姿转换关系^[8-9],根据图1中定义的4个坐标系,将融合单目视觉测量的新型激光扫描投影系统分成被投影物体和单目相机。激光扫描投影仪和单目相机两个模块,分别对这两个模块进行位姿转换关系的解算;最后求解出被投影物体和激光扫描投影仪之间的位姿转换关系。

首先被投影物体上合作目标的三维坐标信息已通过激光跟踪仪等测量已知,之后通过单目相机对被投影物体上的合作目标进行图像获取,再运用粒子群算法解算出 $O_{C1}-X_{C1}Y_{C1}Z_{C1}$ 和 $O_w-X_wY_wZ_w$ 的位姿转换关系,并得到关系式

$$R_1 \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} + T_1 = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, (x_1, y_1, z_1) 为单目相机坐标系下被投影物体上合作目标的三维坐标值, (X_1, Y_1, Z_1) 为被投影物体上合作目标的三维坐标值, R_1 和 T_1 为单目相机到被投影物体的旋转和平移矩阵。

然后,旋转单目相机,对激光扫描投影仪上的合作目标进行图像获取,同样激光扫描投影仪上的合作目标的三维坐标信息也通过激光跟踪仪测量已知,之后再运用粒子群算法解算出 $O_{C2}-X_{C2}Y_{C2}Z_{C2}$ 和 $O_P-X_P Y_P Z_P$ 的位姿转换关系,并得到关系式

$$R_2 \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} + T_2 = \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, (x_2, y_2, z_2) 为单目相机坐标系下激光扫描投影仪合作目标的三维坐标值, (X_2, Y_2, Z_2) 为激光扫描投影仪合作目标的三维坐标值, R_2 和 T_2 为单目相机到激光扫描投影仪的旋转和平移矩阵。

由于单目相机在获取被投影物体和激光扫描投影的图像时,单目相机的坐标系自身产生了旋转,需要建立 $O_{C1}-X_{C1}Y_{C1}Z_{C1}$ 和 $O_{C2}-X_{C2}Y_{C2}Z_{C2}$ 位姿转换关系的数学关系式,并解算出 $O_{C1}-X_{C1}Y_{C1}Z_{C1}$ 到 $O_{C2}-X_{C2}Y_{C2}Z_{C2}$ 的旋转和平移矩阵。由于本文采用的转台为二维转台,所以单目相机在转动时在 x 轴和 y 轴都有旋转,设相机绕 x 轴的旋转角度为 φ ,绕 y 轴的旋转角度为 θ ,所以可以建立式(3)所示的 $O_{C1}-X_{C1}Y_{C1}Z_{C1}$ 和 $O_{C2}-X_{C2}Y_{C2}Z_{C2}$ 位姿转换关系的数学关系式。

$$\begin{aligned} R_3 &= R_x(\varphi)R_y(\theta) \\ T_3 &= T_{xy} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, R_3 和 T_3 为单目相机在 $O_{c1}-X_{c1}Y_{c1}Z_{c1}$ 和 $O_{c2}-X_{c2}Y_{c2}Z_{c2}$ 的两个坐标系之间的旋转和平移矩阵。

最后,建立激光扫描投影仪和被投影物体的位姿转换关系的数学模型,通过式(1)、(2)、(3)对数学模型进行求解,得到式(4)所示的激光扫描投影仪和被投影物体的位姿转换关系。

$$R_3R_2R_1^T \begin{bmatrix} X_l \\ Y_l \\ Z_l \end{bmatrix} - R_3R_2R_1^T T_1 + R_2T_3 + T_2 = \begin{bmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, (X_l, Y_l, Z_l) 为被投影物体上合作目标的三维坐标值, (X_3, Y_3, Z_3) 为激光扫描投影仪坐标系下被投影物体上合作目标的三维坐标值, R_2 和 T_2 为单目相机到激光扫描投影仪的旋转和平移矩阵, R_1 和 T_1 为单目相机到被投影物体的旋转和平移矩阵, R_3 和 T_3 为单目相机从 $O_{c1}-X_{c1}Y_{c1}Z_{c1}$ 到 $O_{c2}-X_{c2}Y_{c2}Z_{c2}$ 的旋转和平移矩阵。

3 实验

3.1 仿真实验

为了验证上述方法的可行性,通过Matlab软件对其方法进行实验仿真。首先用单目相机对被投影物体进行图像获取,利用粒子群算法求解出单目相机和被投影物体之间的位姿转换关系。激光扫描投影技术中,各个被投影合作目标在被投影物体坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 中的三维坐标值是通过激光跟踪仪测量标定为已知的。

通过式(1)利用粒子群算法^[10-12]求解出单目相机与被投影物体坐标系之间的位姿转换关系,解算出二者的旋转矩阵 R_1 和平移矩阵 T_1 ,如图2所示为粒子群算法解算单目相机与被投影物体的坐标转换关系流程图。因课题组在前期研究中得出了优化的粒子群算法控制参数^[5],所以本文在仿真实验中粒子群的优化参数选择为:学习因子为 $c_1=c_2=2.1$;权重为0.7;迭代次数为50 000;精度为 10^{-5} 。

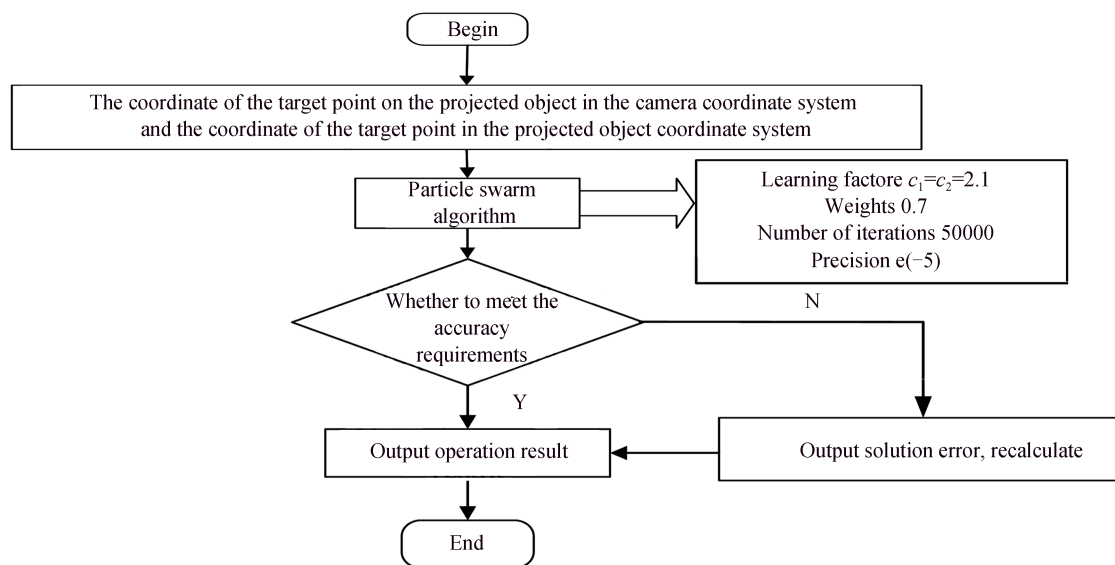


图2 粒子群算法解算单目相机与被投影物体的坐标转换关系流程图

Fig.2 The particle swarm algorithm solves the flow chart of the coordinate conversion relationship between the monocular camera and the projected object

建立激光扫描投影仪的坐标系,通过激光跟踪仪测量激光扫描投影仪上合作目标在 $O_p-X_pY_pZ_p$ 坐标系中的三维坐标值。再用单目相机对激光扫描投影仪上合作目标进行图像获取,建立单目相机和激光扫描投影仪之间的位姿转换关系。

通过式(2)利用粒子群算法求解出单目相机与激光扫描投影仪之间的位姿转换关系,解算出二者的旋转矩阵 R_2 和平移矩阵 T_2 ,表1所示为粒子群算法解算部分单目相机与激光扫描投影仪的旋转矩阵 R_2 、平移

矩阵 T_2 和精度。

表1 部分实验数据
Table 1 Part of the experimental data

Precision	R			T
$4.534\ 561\ 100\ 2 \times 10^{-5}$	0.408 383	-0.816 704	-0.407 697	-1 491.742 914
	0.3807 02	-0.253 54	0.889 256	-1 491.474 369
	-0.829 631	-0.518 369	0.207 376	-1 841.039 585
$4.693\ 004\ 083\ 4 \times 10^{-5}$	0.407 792	-0.816 523	-0.408 649	-1 490.942 924
	0.381 775	-0.254 076	0.888 646	-1 492.320 221
	-0.829 429	-0.518 39	0.208 117	-1 841.664 945
$4.185\ 484\ 991\ 9 \times 10^{-5}$	0.4082 74	-0.816 306	-0.408 602	-1 491.368 014
	0.381 003	-0.254 376	0.888 892	-1 494.469 798
	-0.829 546	-0.518 591	0.207 160	-1 840.628 105
$4.343\ 792\ 082\ 2 \times 10^{-5}$	0.408 060	-0.816 640	-0.408 148	-1 491.825 969
	0.3812 97	-0.253 756	0.888 942	-1 491.981 940
	-0.829 516	-0.518 368	0.207 835	-1 841.223 313

最后通过式(3)解算出激光扫描投影仪与被投影物体之间的位姿转换关系,得到旋转矩阵 R 和平移矩阵 T 。

为了验证上述 Matlab 算法仿真的正确性,采用 SA 软件进行验证。将数据导入 SA 软件中,它可直接获取激光扫描投影仪与被投影物体之间的位姿转换关系,即获取旋转矩阵 R 和平移矩阵 T 。

将 Matlab 和 SA 软件获得数据进行对比,为了更好地分析单目相机移动距离和旋转角度对新型激光扫描投影系统的精度影响,本文定义误差公式为

将旋转矩阵的误差定义为

$$Q_{\theta} = \sqrt{\Delta \text{rot}x^2 + \Delta \text{rot}y^2 + \Delta \text{rot}z^2} \quad (5)$$

同理,将平移矩阵的误差定义为

$$Q_r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (6)$$

3.1.1 角度分析

单目相机在获取被投影物体和激光扫描投影仪的图像时,单目相机坐标系会产生旋转,为了分析单目相机旋转是否会影响新型激光扫描投影系统的精度,本文在激光扫描投影系统、被投影物体和单目相机三者距离一定的情况下,选取单目相机旋转角度为 $40^{\circ} \sim 75^{\circ}$,每隔 5° 进行一次仿真实验,表 2~3 所示为单目相机在不同角度的平移和旋转矩阵误差。

表2 单目相机旋转不同角度的平移矩阵的误差

Table 2 Errors of the translation matrix when the monocular camera rotates at different angles

Angle	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°
Error	2.323 8	2.070 5	2.144 7	1.319 3	2.411 0	1.400 0	0.762 3	1.050 4

表3 单目相机旋转不同角度的旋转矩阵的误差

Table 3 Errors of the rotation matrix of the monocular camera at different angles

Angle	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°
Error	0.045 0	0.026 4	0.026 0	0.032 7	0.087 4	0.018 6	0.030 7	0.058 6

根据表 2 给出平移矩阵的误差图,如图 3 所示。根据表 3 给出旋转矩阵的误差图,如图 4 所示。单单通过观察图 3~4 无法确定单目相机自身旋转的最适角度。又因较小的旋转角度会给距离带来很大的影响,因此在此在 $0.01^{\circ} \sim 0.09^{\circ}$ 的范围,每隔 0.01° 观察 1.5~3 m 距离方向上的偏移量,如图 5 所示。

由图 5 分析可知,在 $0.01^{\circ} \sim 0.09^{\circ}$ 的范围内,每隔 0.01° 在 1.5~3 m 距离方向上的偏移量误差影响较大,因

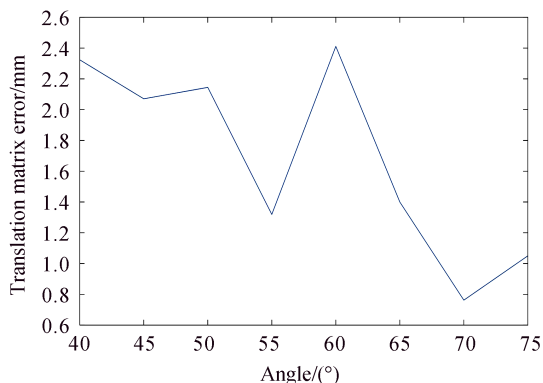


图3 单目相机旋转不同角度的平移矩阵的误差
Fig.3 Errors of the translation matrix when the monocular camera rotates at different angles

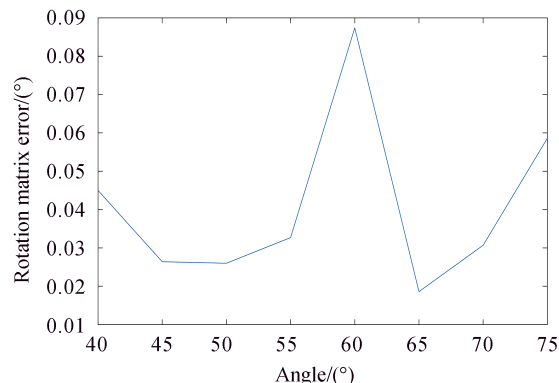


图4 单目相机旋转不同角度的旋转矩阵的误差
Fig.4 The error of the rotation matrix of the monocular camera rotating at different angles

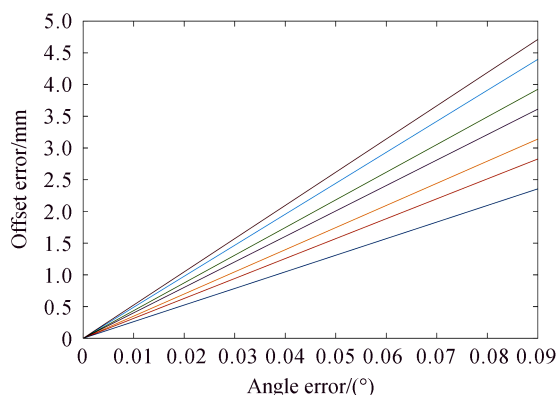


图5 角度误差在1.5~3 m范围的偏移量
Fig.5 Angular error within the range of 1.5~3 meters offset

此选取旋转角度偏差在 0.04° 以下较为合适。又结合图5观察可得最适角应为 55° 和 70° 。但是结和实际实验可知,相机偏转的角度过大,会导致被投影物体上合作目标拍摄不全的现象,所以相机旋转的最适角应为 55° 。

3.1.2 距离分析

为了寻找单目相机距离投影仪和被投影物体最佳范围,本文控制单目相机的旋转角度为 55° ,移动范围在1.5~4 m左右。如表4~5所示为单目相机在不同距离的平移和旋转矩阵误差。

表4 单目相机在不同距离的平移矩阵的误差
Table 4 Error of translation matrix of monocular camera at different distances

Distance/m	1.5	1.8	2	2.3	2.5	2.8	3	3.3	3.5	3.8	4
Error	0.197 7	0.108 8	1.102 4	1.251 2	0.369 1	1.319 3	0.587 6	1.108 3	2.789 3	1.833 8	4.338 9

表5 单目相机在不同距离的旋转矩阵的误差
Table 5 Rotation matrix errors of monocular cameras at different distances

Distance/m	1.5	1.8	2	2.3	2.5	2.8	3	3.3	3.5	3.8	4
Error	0.003 9	0.003 7	0.050 7	0.032 2	0.027 2	0.032 7	0.116 3	0.053 4	0.043 4	0.075 8	0.101 9

根据表4给出平移矩阵的误差图,如图6所示。根据表5给出旋转矩阵的误差图,如图7所示。通过图6~7可以得到单目相机移动的距离在1.5~3 m的范围内,误差较小并且满足投影系统的精度要求。

由上述仿真实验可知,单目相机旋转的角度和移动的距离都会降低激光扫描投影系统的精度,为了减小单目相机带来的误差,在实际投影的过程中,采取了扩大扫描范围的方法。

为了具体分析单目相机移动距离与旋转角度之间的关系,通过仿真得到如表6所示的单目相机移动距离与最适旋转角度的关系。

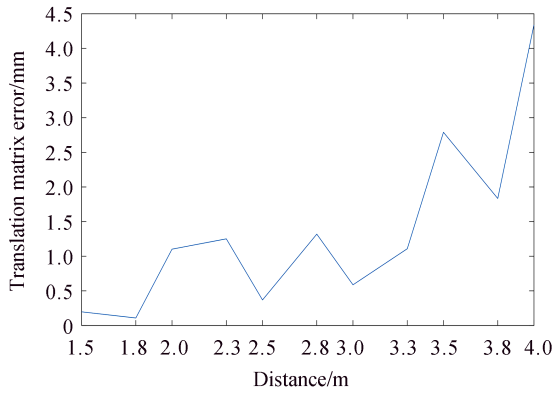


图6 单目相机在不同距离的平移矩阵的误差图

Fig.6 Error graph of translation matrix of monocular camera at different distances

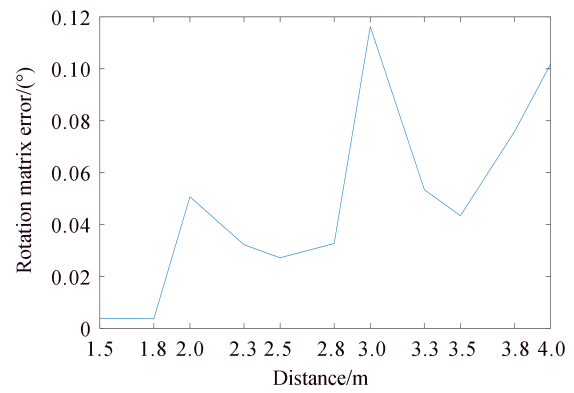


图7 单目相机在不同距离的旋转矩阵的误差

Fig.7 Error of rotation matrix of monocular camera at different distances

表6 单目相机移动距离与最适旋转角度的关系

Table 6 The relationship between the moving distance of the monocular camera and the optimal rotation angle

Distance/m	1.5	1.8	2	2.3	2.5	2.8	3	3.3	3.5	3.8	4
Angle/(°)	65	65	60	60	55	55	55	55	50	50	50

由表6可知,移动范围在1.5~2 m左右单目相机的最适旋转角度为65°,移动范围在2~2.5 m左右单目相机的最适旋转角度为60°,移动范围在2.5~3.5 m左右单目相机的最适旋转角度为55°,移动范围在3.5~4 m左右单目相机的最适旋转角度为50°。

3.2 实验

为了验证该新型激光扫描投影系统的自标定方法的可行性,搭建了如图8所示的实验系统,该实验系统主要由投影仪、被投影物体、相机和转台组成。其中将相机和转台看作一个整体,并对这个整体进行了坐标系的标定,在本实验中只考虑了相机绕着y轴旋转,并且没有发生平移。

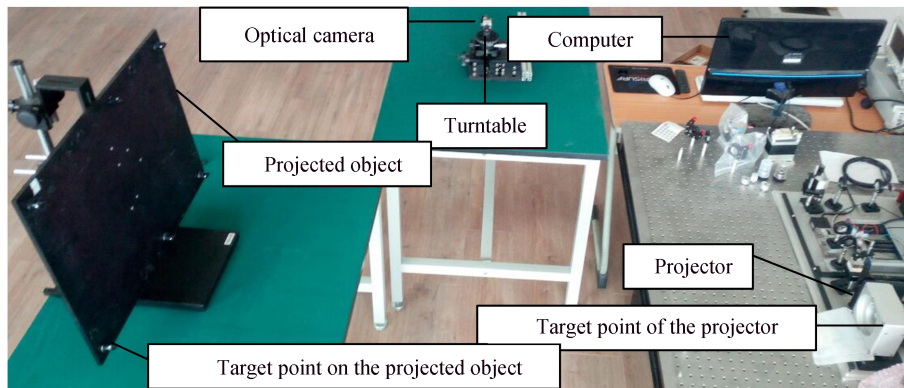


图8 新型激光扫描投影实验系统

Fig.8 New laser scanning projection experiment system

由上述仿真实验可知,相机最佳的旋转角度为55°,移动范围在1.5~3 m之间。因此,在实验中设定相机与被投影物体和投影仪的距离为1.5 m,相机首先对被投影物体进行拍摄,其次相机旋转55°后再对投影仪进行拍摄,最后运用新型激光扫描投影系统的自标定方法进行解算,验证该方法的可行性。表7为激光扫描投影系统和新型激光扫描投影系统一组实验数据。

通过以上两组数据进行对比可知,激光扫描投影系统和新型激光扫描投影系统的旋转矩阵的误差值为0.003 9;平移矩阵的误差值为1.878 7,最终证明了融合单目视觉的激光扫描投影系统自标定方法具有可行性。

表7 激光扫描投影系统和新型激光扫描投影系统的实验数据
Table 7 Experimental data of laser scanning projection system and new laser scanning projection system

Matrix	Laser scanning projection system			New laser scanning projection system		
R	0.408 248	-0.816 496	-0.408 248	0.408 264	-0.816 455	-0.408 314
	0.381 000	-0.254 000	0.889 001	0.381 032	-0.254 047	0.888 973
	-0.829 56	-0.518 475	0.207 390	-0.829 538	-0.518 517	0.207 377
T	-551.135 19	-1 200.151 20	-1 244.342 03	-552.742 93	-1 199.474 37	-1 245.039 57

4 结论

本文提出融合单目视觉的激光扫描投影系统自标定方法,建立了激光扫描投影仪、单目相机和被投影物体的位姿转换关系的数学模型。该方法实现了仅仅通过单目相机分别拍摄被投影物体和激光扫描投影仪器上的多个合作目标便能自动进行解算,从而获得被投影物体和激光扫描投影仪器的坐标转换关系,解决了现有激光扫描投影系统中需要手动标定的问题,提高了激光扫描投影技术的效率。通过SA软件进行验证,证明此方法的精度能满足激光扫描投影系统的精度要求。更进一步地,还分析了距离、角度等外部因素对新型激光扫描投影系统精度的影响。仿真结果表明:单目相机在1.5~3 m的范围内移动时可满足投影系统的精度要求;当投影系统、被投影物体和单目相机三者的距离一定时,单目相机自身旋转最适角度为55°,此时新型激光扫描系统的精度最高。最后还搭建了实验系统,验证了融合单目视觉的激光扫描投影系统自标定方法具有实际可行性。

参考文献

- [1] KAUFMAN S P, SAVIKOVSKY A, MOHAZZAB M. Virtual laser projection system and method; U.S. Patent 9,410,793[P]. 2016-8-9.
- [2] WANG Sheng, WU Junhao, NIU Runjun, et al. Research and application of laser projection technology in aircraft conduit mounting [J]. Navigation and Control, 2018, 17(3): 48-54.
王声,吴军豪,牛润军,等.激光投影技术在飞机导管支架安装中的研究与应用[J].导航与控制,2018,17(3):48-54.
- [3] RUEB K D, KITCHNER. Laser projection system and method; U.S. Patent 9,200,899[P]. 2013-3-22.
- [4] RUEB K D, KITCHNER. Laser projection system with motion compensation and method. US 9,881,383[P]. 2014-12-3.
- [5] HOU Maosheng, LIU Jiqiang, LIU Dali, et al. Research on calibration technology of laser scanning projection system based on laser ranging [J]. Chinese Journal of Laser, 2019, 46(10): 237-245.
侯茂盛,刘继强,刘大礼,等.基于激光测距的激光扫描投影系统标定技术研究[J].中国激光,2019,46(10):237-245.
- [6] HOU Maosheng, SUN Mingli, YANG Fan, et al. Laser scanning projection path planning method based on improved Fleury algorithm [J]. Applied Optics, 2019, 40(3): 493-499.
侯茂盛,孙明利,杨帆,等.基于改进Fleury算法的激光扫描投影路径规划方法[J].应用光学,2019,40(3):493-499.
- [7] FAN Chengbo, ZHANG Mengmeng, LIU Jiqiang, et al. Research on IGES-based laser scanning projection file analysis method[J]. Applied Optics, 2020, 41(3): 611-617.
范成博,张梦梦,刘继强,等.基于IGES的激光扫描投影文件解析方法研究[J].应用光学,2020,41(3):611-617.
- [8] HOU Maosheng, CHEN Yuqing, LIU Dali, et al. Study on the deviation correction of laser scanning projection based on time compensation[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(4): 0411002.
侯茂盛,陈雨晴,刘大礼,等.基于时间补偿的激光扫描投影图形偏差校正研究[J].光子学报,2020,49(4): 0411002.
- [9] YE Shenghua, ZHU Jigui. Visual inspection technology and application [J]. Chinese Engineering Science, 1999, 1(1): 262-263.
叶声华,郑继贵.视觉检测技术及应用[J].中国工程科学,1999,1(1): 262-263.
- [10] HUANG Guiping, LI Guangyun, WANG Baofeng, et al. Study on monocular vision measurement technology [J]. Acta Metrology, 2004(4): 314-317.
黄桂平,李广云,王保丰,等.单目视觉测量技术研究[J].计量学报,2004(4): 314-317.
- [11] XU Chengyi, LIU Ying, XIAO Yi, et al. Optimization method of camera internal parameters based on improved particle swarm algorithm [J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2020, 57(4): 346-352.
徐呈艺,刘英,肖轶,等.基于改进粒子群算法的相机内参优化方法[J].激光与光电子学进展,2020,57(4):346-352.
- [12] GUO Tongying, LI Ningning, LIU Yong. Optimization method of camera parameters based on particle swarm algorithm [J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2017, 54(11): 320-325.
郭彤颖,李宁宁,刘雍.基于粒子群算法的摄像机内参数优化方法[J].激光与光电子学进展,2017,54(11):320-325.