

相机与简单激光间外参标定的一种有效方法

唐庆博^{1**}, 谭尚真^{2*}, 陈亚南², 王飞^{2***}

¹中国运载火箭技术研究院研究发展中心, 北京 100076;

²西安交通大学电子信息学院, 陕西 西安 710049

摘要 近年来对非合作目标的重建需求越来越高。现有的将激光与相机结合的视觉系统大都是结合相机与激光测距仪, 这样的视觉系统不仅应用不方便, 而且成本偏高。因此, 提出了一种新的视觉系统, 采用一个简单的单点激光替换激光测距仪。这种视觉系统也能对目标激光点进行高精度的三维重建, 但普通激光相对于激光测距仪的成本要降低很多。并且, 提出了一种能够有效标定相机与简单单点激光之间外参的方法, 首先获取相机坐标系下激光的方向和坐标, 然后通过标定算法求出激光相机系统的外参, 之后演示了如何用标定好的激光相机系统进行三维重建获取目标激光点的三维坐标。实验结果表明, 用该方法重建出的目标点三维坐标精度较高, 其重建精度与基于激光测距仪的视觉系统相当。

关键词 机器视觉; 外部标定; 简单激光; 三维重建; 非合作目标

中图分类号 TP39 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP55.081501

An Efficient Solution for Extrinsic Calibration of a Vision System with Simple Laser

Tang Qingbo^{1**}, Tan Shangzhen^{2*}, Chen Yanan², Wang Fei^{2***}

¹Research and Development Center, China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China;

²School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

Abstract Increasing demands for accurate reconstruction of the non-cooperative target are arising recent years. The existing methods which combine cameras and laser range finders (LRF) are inconvenient and costly. A new vision system is proposed that the widely used laser range finder is replaced with a simple laser. The combination of a camera and a simple calibrated laser is also highly accurately enough to reconstruct the three-dimensional position of the laser spot, while the cost much less than LRF. Also, a method to calibrate the extrinsic parameters between a camera and a simple laser is proposed. First, the direction and the position of the simple laser under the coordinate system of the camera are attained, and the extrinsic parameters of the camera and laser system are gotten using the calibration algorithm. Then how to use it to reconstruct a laser spot's three-dimensional position is displayed. The experimental results show that the accuracy of the proposed method is comparable to the state-of-the-art LRF-based methods.

Key words machine vision; extrinsic calibration; simple laser; three-dimensional reconstruction; non-cooperative target

OCIS codes 150.1488; 110.3010

1 引言

近年来, 有许多结合相机与激光测距仪的系统和应用出现, 这种系统可用于非合作目标的重建。这种基于激光测距仪的视觉系统能够广泛的应用于

城市模型的获取^[1]、目标绘制^[2-4]、目标跟踪^[5-7]、增强现实^[8]和移动机器人^[2-7]。基于激光测距仪的重建方法都需要预先获知相机与激光的相对外置关系, 即外参。因此, 有越来越多的研究者来研究这种视觉系统的外参标定。Unnikrishnan 等^[9-13]对激光

收稿日期: 2017-12-06; **修回日期:** 2018-01-05; **录用日期:** 2018-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(61231018, 61273366)、国家科技部科技支撑计划项目(2015BAH31F01)、高等学校学科创新引智计划(B13043)

* **E-mail:** 252962475@qq.com; ** **E-mail:** 13910695360@163.com; *** **E-mail:** wfx@mail.xjtu.edu.cn

测距仪与相机的外参标定方法进行了研究。其中,最流行的标定方法是由 Zhang^[11] 提出的,这种标定方法能够对单线激光进行标定。他们在相机与激光测距仪的视野中放置一个平面的棋盘格标定板,之后通过不停的移动标定板来进行标定。2005年,Unnikrishnan 等^[9] 开发了一套很容易上手的软件来对这个外参进行标定。Vasconcelos 等^[10] 提出了一个需求最小的方法来标定单线激光与相机的外参,这种方法需要移动至少 5 次标定板就能完成整个标定过程。2013年,Nguyen 等^[8] 又提出了标定单点激光测距仪与相机外参的方法,并给出了标定板不在激光视野中的解决方案。

在本文中,把激光测距仪替换为简单的激光,这种配置不仅造价更低而且能提供与激光测距仪精度相当的结果。并且,提出了一种能够有效标定相机与简单单点激光的外参的方法,同时演示了如何用标定好的系统获取目标点的三维坐标。

在本文标定方法中,假设相机的内参已经通过张正友标定法^[11] 获得,因此只需要标定相机与激光之间的外部参数。在整个标定过程中,只需要一个标定板,并在整个过程中多次移动。之后,就可以用这个标定结果对目标激光点的三维坐标进行重建。实验结果表明,本文方法能够重建出一个精确的目标点三维坐标。与 Nguyen 等^[8] 提出的激光测距仪与相机的标定方法相比,本文标定方法能够取得更好的结果。

2 基本原理

如图 1(a)所示,整个系统由相机和简单激光两部分组成,图中红线为相机坐标系下激光的方向 D_L ,红点为相机坐标系下激光的坐标 P_{XOY} 。标定方法需要借用一个棋盘格标定板,在标定过程中,标定板的 4 个位置如图 1(b)所示。标定的目的是要精确获取相机坐标系下的 D_L 和 P_{XOY} 。

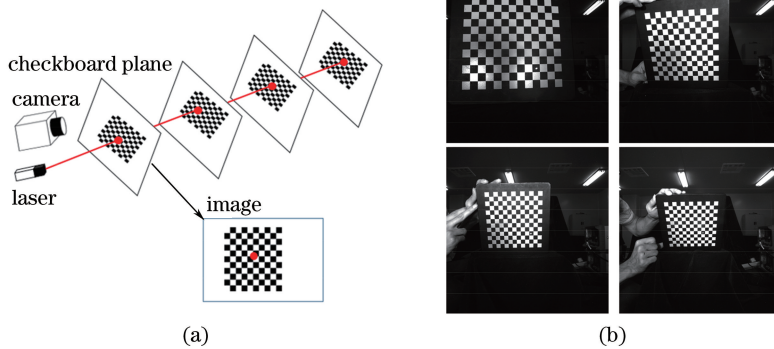


图 1 (a) 标定方法示意图; (b) 实验中相机捕捉到的标定板 4 个不同位置的图像

Fig. 1 (a) Design of the proposed calibration method; (b) four checkboard settings captured by the camera

整个标定系统包括 3 个不同的坐标系:世界坐标系、相机坐标系和图像坐标系。其中,世界坐标系的原点在棋盘格的左上角;相机坐标系的原点在相

机的光心,图像坐标系的原点在图像平面的左上角。图 2(a)为这 3 个坐标系的示意图。图 2(b)为现场所用激光-相机系统的三维模型示意图。

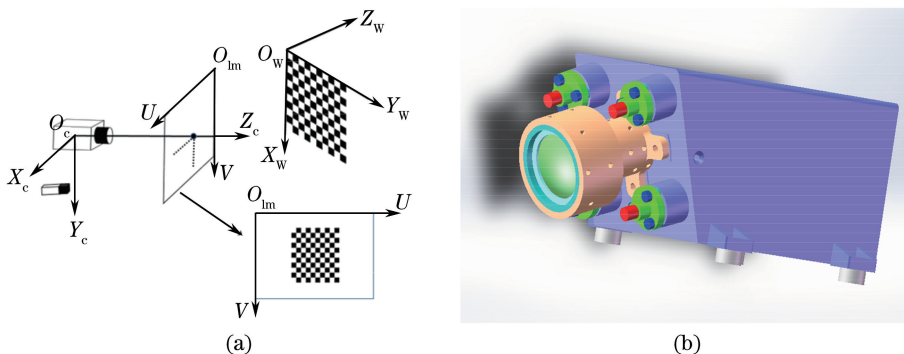


图 2 系统图示。(a) 各个参考坐标系的示意图; (b) 现场所用激光-相机系统的三维模型

Fig. 2 Diagram of systems. (a) Diagram of reference coordinate frames and labels;

(b) 3D model of the laser used in the field

2.1 外参标定算法

假设相机的内参矩阵 \mathbf{A} 已经提前获得,并且相机的径向畸变已经纠正过。激光束的外参可以表示为激光束所在直线在相机坐标系下的方程,即

$$[x \ y \ z]^T = k \cdot \mathbf{D}_L + \mathbf{P}_{XOY}, \quad (1)$$

式中 k 是一个正的尺度参数, \mathbf{D}_L 是激光束的方向向量, \mathbf{P}_{XOY} 是激光束所在直线与图像平面的虚拟交点坐标。

标定板放置在 n 个不同的位置,在每个位置下,必须要保证激光束能落在标定板平面上,并形成一激光点。这个激光点在相机坐标系下的坐标表示为 $\mathbf{P}_{Li} = [X \ Y \ Z]^T, i=1, 2, \dots, n$ 。如果得到了每个位置下激光点的坐标,那么就能够计算出激光束直线的方程。为了计算每个位置下激光点的坐标,需要考虑以下两个约束:1)激光点与相机光心形成了一条直线,激光点在这条直线上。为了表示方便,称这条直线为激光-光心线;2)激光点在标定板所在的平面上。

考虑第一个约束,激光-光心线方程的计算方式如下。

用针孔模型来近似相机,那么三维激光点 $\mathbf{P}_{Li} = [X \ Y \ Z]^T$ 对应的二维图像坐标 $\mathbf{p}_{Li} = [u \ v]^T$ 可以表示为

$$\mathbf{p}_{Li} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{P}_{Li}, \quad (2)$$

式中 \mathbf{A} 是相机的内参矩阵。

假设激光点 \mathbf{P}_{Li} 对应的图像像素点坐标 $\mathbf{p}_{Li} = [u \ v]^T$ 已经检测到了,那么通过点 \mathbf{P}_{Li} 的激光-光心直线的方向向量可以表示为

$$\mathbf{D}_O = \mathbf{A}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} p_{Li} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

于是,激光-光心直线的方程可以表示为

$$[x \ y \ z]^T = k \cdot \mathbf{D}_O. \quad (4)$$

把(3)式代入(4)式,可以得到

$$\mathbf{P}_{Li} = k \cdot \mathbf{D}_O = k \cdot \mathbf{A}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} p_{Li} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

考虑第二个约束,棋盘格标定板所在平面的方程可以按照下式计算。

关联世界坐标系和相机坐标系的旋转平移矩阵 $[\mathbf{R} \ \mathbf{T}]$ 可以按照文献[4]中的方法计算,其基本原理来源于文献[11]中张正友的标定法。

标定板所在平面的方向向量可以表示为

$$\mathbf{N} = -\mathbf{R}_3 \cdot (\mathbf{R}_3^T \cdot \mathbf{T}), \quad (6)$$

式中 \mathbf{R}_3 是旋转矩阵 \mathbf{R} 的第3列。因此,这个平面的方程可以表达为

$$[\mathbf{N}^T \ \| \ \mathbf{N} \ \|_2] \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{Li} \\ 1 \end{bmatrix} = 0. \quad (7)$$

把(6)式代入(7)式,棋盘格平面的方程可以表示为

$$[\mathbf{N}^T \ \| \ \mathbf{N} \ \|_2] \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{Li} \\ 1 \end{bmatrix} = [-\mathbf{R}_3 \cdot (\mathbf{R}_3^T \cdot \mathbf{T}) \ \| \ -\mathbf{R}_3 \cdot (\mathbf{R}_3^T \cdot \mathbf{T}) \ \|_2]^T \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{Li} \\ 1 \end{bmatrix} = 0. \quad (8)$$

结合(5)式和(8)式,就能够计算出激光点 \mathbf{P}_{Li} 的坐标。

因为标定过程中多次移动了标定板,可以得到一系列的激光三维点坐标 $\bar{\mathbf{P}}_L = \{\mathbf{P}_{L1}, \mathbf{P}_{L2}, \dots, \mathbf{P}_{Ln}\}$ 。需要特别说明的是在展示基本原理时提出在标定过程中将标定板移动到4个位置,选取移动次数为4次是最小配置,目的是为了说明本文方法的简单性。该方法本身位置数可以为大于等于4的任意整数。在激光固定的前提下,所有这些激光点均应该在同一条直线上。因此,通过这些激光点的三维点坐标就可以计算出激光束所在直线的方程。为了得到最优的激光束直线参数,采用主成分分析(PCA)方法来最小化所有这些点到直线的投影误差。

在求解激光束所在直线方程,理论上由两个三维点即可求解直线方程,为了得到一个最优解,则可以采用更多的三维点来求解。PCA方法和最小二乘法都能够实现优化,其中PCA方法可优化各点到直线的垂直距离,而最小二乘法是优化各点到直线的上下距离,图上可以看出两者清晰的区别,明显PCA方法更适合本文的需求。由于最小二乘法与PCA方法的求解精度区别并非本文的创新重点,所以在此不加以特别的对比分析。计算步骤如下。

- 1) 计算所有激光点的中心 $\bar{\mathbf{P}}_L = \frac{\sum \bar{\mathbf{P}}_L}{n}$ 。

- 2) 对所有激光点的坐标归一化,即 $\bar{\mathbf{P}}_L = \frac{\bar{\mathbf{P}}_L - \bar{\mathbf{P}}_L}{\max(\bar{\mathbf{P}}_L)}$ 。

- 3) 计算协方差矩阵 $\boldsymbol{\Sigma} = \frac{\bar{\mathbf{P}}_L^T * \bar{\mathbf{P}}_L}{n}$, 并对其奇异值分解 $[\mathbf{U} \ \mathbf{S} \ \mathbf{V}] = \text{svd}(\boldsymbol{\Sigma})$ 。

- 4) 激光束直线的方向向量可以表示为 $\mathbf{D}_L = \mathbf{U}(:, 1)$ 。

因此,激光束的方程为

$$[x \ y \ z]^T = k \cdot \mathbf{D}_L + \bar{\mathbf{P}}_L. \quad (9)$$

但是这个方程的参数并不唯一,为此可定下如下规则来确保得到唯一的直线方程:方向向量 \mathbf{D}_L 归一化为 $\frac{\mathbf{D}_L}{\|\mathbf{D}_L\|}$;点 \bar{P}_L 用激光束与图像平面的虚拟交点 $\mathbf{P}_{XOY} = [x_0 \ y_0 \ 0]^T$ 替代。最后,把转化过的结果作为最终的标定结果。

2.2 三维重建方法

在得到激光与相机的标定结果后,对激光点 P_L 的三维坐标进行重建。激光点必须满足以下两个约束:1)激光点在激光-光心线上;2)激光点在激光束所在的直线上。

考虑第一个约束,首先在图像中检测激光点的二维图像点坐标 $\mathbf{p}_L = [u \ v]^T$ 。之后,激光-光心线的直线方程可以通过第 2.1 小节介绍过的方法得到,即表示为

$$[x \ y \ z]^T = k_1 \cdot \mathbf{D}_O. \quad (10)$$

考虑第二个约束,利用第 2.1 小节的标定结果,激光束可以表示为

$$[x \ y \ z]^T = k_2 \cdot \mathbf{D}_L + \mathbf{P}_{XOY}. \quad (11)$$

综合以上两个约束来对激光点的三维坐标进行重建。激光点的三维坐标就是上述两条直线的交点。结合(10)式和(11)式,激光点的坐标可以通过最小二乘法计算得到。这等效于最小化以下表达式

$$\|k_1 \cdot \mathbf{D}_O - (k_2 \cdot \mathbf{D}_L + \mathbf{P}_{XOY})\|_2, \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = - \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{D}_O^T \\ \mathbf{D}_L^T \end{bmatrix} \cdot [\mathbf{D}_O \ \mathbf{D}_L] \right\}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{D}_O^T \\ \mathbf{D}_L^T \end{bmatrix} \cdot \mathbf{P}_{XOY}. \quad (13)$$

因此,激光点的三维重建结果为

$$P_L = \frac{1}{2} \cdot (k_1 \cdot \mathbf{D}_O + k_2 \cdot \mathbf{D}_L + \mathbf{P}_{XOY}). \quad (14)$$

3 实验结果

设计实验从对噪声的稳健性和精度两方面对本

文方法进行评估。为了模拟接近于真实应用场景的环境,仿真参数设计如下:1)外参设计为 $\mathbf{D}_L = [-5 \ -5 \ 100]$ 和 $\mathbf{P}_{XOY} = [40 \text{ mm} \ 40 \text{ mm} \ 0]$;2)棋盘格在相机前面的移动范围为 $[200 \text{ mm}, 1200 \text{ mm}]$;3)相机的内参矩阵按照现场实验中的一个真实相机来生成,分辨率为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$,径向畸变设置为 0。

3.1 标定结果

为了验证所提出的标定方法,按照以下规则生成真值:棋盘格的方格数量定义为 12×12 ,每个方格的边长定义为 20 mm ;棋盘格距离相机的距离范围为 200 mm 到 1200 mm ;在每个距离下,在 $[-10^\circ, 10^\circ]$ 的角度范围和 $[-20 \text{ mm}, 20 \text{ mm}]$ 的平移范围内随机产生多组数据。之后,计算激光束与标定板平面的交点坐标并计算出该交点与棋盘格角点的投影点坐标。

为了验证所提出的标定方法的稳健性,将具有均值 0 和标准差 1 的高斯噪声叠加于每个投影点上。针对不同幅度的噪声,对高斯噪声在 $[0.25, 3.0]$ 的尺度范围内进行尺度缩放。

在用所提出的方法得到标定结果后,把该结果与真值相比较。方向误差用标定结果与真值之差的绝对值来衡量,平移误差用标定结果与真值之间的欧氏距离来衡量。在两种不同的情况下验证了本文标定方法:1)同样的标定板位置数量,不同幅度的重投影叠加噪声;2)不同的标定板位置数量,相同幅度的重投影叠加噪声。

在每个不同幅度的噪声及不同个数的标定板位置下,都进行了 100 次标定。首先,在 3 个不同的标定板位置下,对第一种情况进行了评估,标准方差为 1 的高斯噪声在 $[0.25, 3.0]$ 的范围内进行缩放,结果如图 3 所示,其中方框的 quantiles 参数设为 25%~75%。

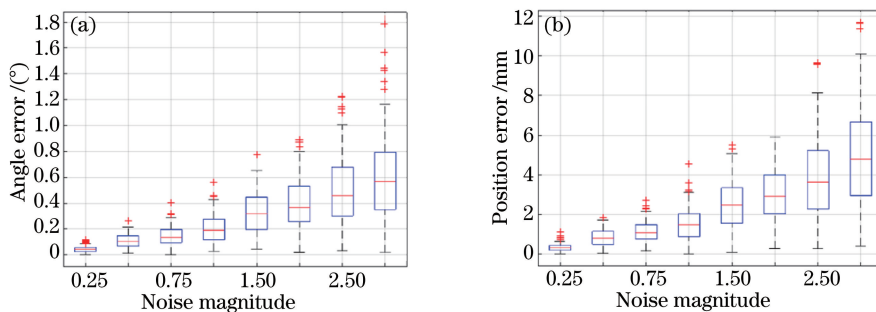


图 3 在人工生成数据的仿真实验下,噪声幅度在 $[0.25, 3.0]$ 范围内的误差分布。(a)角度误差分布;(b)平移误差分布

Fig. 3 Error distribution under noise levels in the range of $[0.25, 3.0]$ simulated on synthetic data.

(a) Angle distribution error; (b) position distribution error

whiskers 参数设为0.993。之后,对第二种情况进行了评估,标定板位置的数量在 $[2,20]$ 的范围内进行变化,结果如图4所示,其中方框的 quantiles 参数设为25%~75%,whiskers 参数设为0.993。

图3表明,标定误差随着噪声幅度的增加变得越来越大。与 Nguyen 等提出的方法相比,本文方

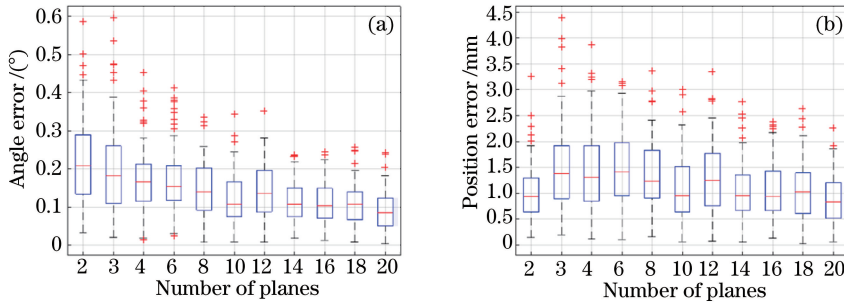


图4 在人工生成数据的仿真实验下,标定板位置数量在 $[2,20]$ 范围内的误差分布。(a)角度误差分布;(b)平移误差分布

Fig. 4 Error distribution under different numbers of poses in the range of $[2,20]$ simulated on synthetic data.

(a) Angle distribution error; (b) position distribution error

3.2 重建结果

对所提出的重建方法进行验证,其中相机与激光的外参按照本文方法进行标定。

真值按照以下规则生成:在 $[200\text{ mm}, 1000\text{ mm}]$ 范围内的每个距离下,计算激光点在相机坐标系下的三维坐标并计算出激光点对应的图像坐标系下的重投影坐标。

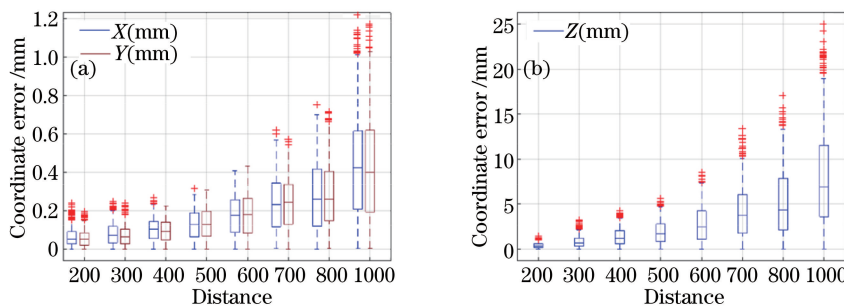


图5 不同距离下的(a)角度误差范围和(b)平移误差的范围

Fig. 5 (a) Angle distribution error and (b) position distribution error under different distances

重建误差用重建结果与真值之间的欧氏距离来衡量,以 mm 为单位。实验结果如图5所示,其中方框的 quantiles 参数设为25%~75%,whiskers 参数设为0.993。随着距离增加,重建误差越来越大。与 Z 轴的误差相比,X 轴与 Y 轴的误差很小。另外,从图5还可以看出,重建误差对距离特别敏感,近距离下能够得到精确的结果。在距离小于1000 mm 时,重建误差均小于20 mm。在许多的应用场景下,这个精度已经足够。

法无论在角度还是平移上都能得到更好的结果。图4表明,标定误差随着标定板位置个数的增加变得越来越小。Nguyen 等提出的方法在标定板位置个数不小于10时,所得到的平移误差小于10 mm,角度误差小于 0.1° 。与之相比,本文方法的平移误差更小(小于3 mm),角度误差与之相当。

为了验证本文方法的稳健性,每一个棋盘格角点和激光点的重投影坐标都叠加了随机噪声,即在200 mm 到1000 mm 的距离范围内,叠加 $[-0.4, 0.4]$ 幅度的像素点随机噪声。

本文方法按照以下步骤进行评估:1)用20个标定板位置计算出激光束的外参;2)在每个距离下,运行重建过程500次。

4 结论

提出了一种能有效标定相机与普通激光之间外参的方法。首先获取相机坐标系下激光的方向和坐标,然后通过标定算法求出激光相机系统的外参,与此同时,也提出了利用标定结果进行重建的方法。与基于激光测距仪的视觉融合系统相比,所提出的基于简单激光的系统更加经济实用。本文标定方法只需要一个棋盘格标定板就能够得到精确的标定结

果。实验表明,本文方法能够同时提供精确的标定结果与重建结果,该视觉系统具有足够的精度,因此能够广泛应用于许多实际场景。

参 考 文 献

- [1] Früh C, Zakhor A. An automated method for large-scale, ground-based city model acquisition [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60 (1): 5-24.
- [2] Chou Y S, Liu J S. A robotic indoor 3D mapping system using a 2D laser range finder mounted on a rotating four-bar linkage of a mobile platform [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2013, 10(45): 1-10.
- [3] Droschel D, Stuckler J, Behnke S. Local multi-resolution representation for 6D motion estimation and mapping with a continuously rotating 3D laser scanner [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2014: 5221-5226.
- [4] Sheng J, Tano S, Jia S. Mobile robot localization and map building based on laser ranging and PTAM[C]. IEEE International Conference on Mechatronics & Automation, 2011: 1015-1020.
- [5] Jung E J, Lee J H, Yi B J, *et al.* Development of a laser-range-finder-based human tracking and control algorithm for a marathoner service robot[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 19(6): 1963-1976.
- [6] Aguirre E, Garcia-Silvente M, Plata J. Leg detection and tracking for a mobile robot and based on a laser device, supervised learning and particle filtering[C]. Springer International Publishing, ROBOT2013: First Iberian Robotics Conference, 2014, 252: 433-440.
- [7] Chen T C, Li J Y, Chang M F, *et al.* Multi-robot cooperation based human tracking system using laser range finder [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011: 532-537.
- [8] Nguyen T, Grasset R, Schmalstieg D, *et al.* Interactive syntactic modeling with a single-point laser range finder and camera[C]. IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 2013: 107-116.
- [9] Unnikrishnan R, Hebert M. Fast extrinsic calibration of a laser rangefinder to a camera [R]. Carnegie Mellon University, 2005, CMU-RI-TR-05-09.
- [10] Vasconcelos F, Barreto J P, Urbano N. A minimal solution for the extrinsic calibration of a camera and a laser-rangefinder[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2012, 34 (11): 2097-2107.
- [11] Zhang Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]. IEEE, 1999: 666.
- [12] Scaramuzza D, Harati A, Siegwart R. Extrinsic self calibration of a camera and a 3D laser range finder from natural scenes [C]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2007: 4164-4169.
- [13] Song J H, Ren Y J, Yang S R, *et al.* Extrinsic parameter calibration method based on substitutable target sphere for vision sensors [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(9): 0915003.
宋佳慧,任永杰,杨守瑞,等.基于合作靶球的视觉传感器外参标定方法[J].光学学报,2017,37(9): 0915003.