

轮式移动机器人单目视觉的目标测距方法

肖大伟, 翟军勇

(东南大学 自动化学院 复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室, 南京 210096)

摘 要: 为减小特征匹配以及摄像机光轴倾斜对单目测距造成的误差, 提出一种基于单目视觉的轮式移动机器人目标测距方法, 将测距目标从平面物体推广到立体物体, 在无须经校正的情况下提高测量精度。通过对摄像机进行标定测量其内外参数, 建立小孔平面成像模型得到世界坐标系与像素坐标系的对应关系。针对坐标变换矩阵奇异的情况, 引入面积这一特性进行求解, 推导特定矩阵奇异情况下目标距离与像素面积的关系。实验结果表明, 该方法可将综合误差率控制在 0.7% 以内, 能够满足轮式移动机器人单目视觉测距实时性和可靠性的要求。

关键词: 轮式移动机器人; 摄像机标定; 单目测距; 立体物体; 小孔平面成像

中文引用格式: 肖大伟, 翟军勇. 轮式移动机器人单目视觉的目标测距方法[J]. 计算机工程, 2017, 43(4): 287-291.

英文引用格式: Xiao Dawei, Zhai Junyong. Target Distance Measurement Method with Monocular Vision for Wheeled Mobile Robot[J]. Computer Engineering, 2017, 43(4): 287-291.

Target Distance Measurement Method with Monocular Vision for Wheeled Mobile Robot

XIAO Dawei, ZHAI Junyong

(Key Laboratory of Measurement and Control of Complex Engineering System, Ministry of Education,
School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

[Abstract] In order to reduce the deviation brought by feature points matching and optical axis inclination, this paper proposes a new method to measure the target distance for wheeled mobile robot based on the monocular vision, which can extend the plane objective to the three-dimensional one and achieve high measurement accuracy without adjustments. Firstly, it extracts internal and external camera parameters by camera calibration. Secondly, by establishing the pinhole imaging model, it sets up the corresponding relationship between world coordinate system and pixel coordinate system. Then, with respect to the singularity caused by matrix transformation, it introduces the concept of area and obtains the relationship between target distance and size of pixel area under a specific singularity case. Experimental results indicate that the comprehensive error ratios of the proposed method are all under 0.7%, which can satisfy the system requirements of instantaneity and reliability for monocular distance measurement of wheeled mobile robot.

[Key words] wheeled mobile robot; camera calibration; monocular distance measurement; three-dimensional object; pinhole plane imaging

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2017.04.049

0 概述

在移动机器人的测距技术中, 测距方式主要分为以下 2 种: 主动式测距与被动式测距。主动式测距通过计算能量波的发射与接收时间的间隔来测量距离, 例如超声波测距^[1]和激光测距^[2]; 被动测距则是根据一定的几何物理特性进行处理后得到距离的测量方式。视觉测距是被动测距中一个

比较重要的分支, 主要分为单目式测距、双目式测距以及结构光测距。双目视觉测距测量精度高, 但是算法复杂, 运算时间长, 特征匹配难, 工作环境要求严苛, 因此, 其研究重点主要集中在特征的匹配以及降低算法复杂度上^[3-5]。结构光测距因受光源的限制, 适用场合比较固定^[6-7]。单目视觉测距结构简单, 适用场合广, 成本低廉, 因此得到广泛应用。单目摄像机将三维空间的信息成像到平面上,

基金项目: 国家自然科学基金(61473082)。

作者简介: 肖大伟(1990—), 男, 硕士研究生, 主研方向为机器视觉; 翟军勇, 教授、博士、博士生导师。

收稿日期: 2015-12-29 **修回日期:** 2016-03-16 **E-mail:** 768506858@qq.com

单目视觉测距就是基于像素平面上物体的信息以及部分已知条件还原目标的三维空间信息。文献[8]结合了单目视觉中的离焦法和聚焦法,利用单目视觉算法确定摄像机相对于被测点的聚焦位置方法,提出一种新的单目测距方法。文献[9]在轴向距离测距以及面积计算的基础上进行点特征的提取,提高了测量的精度。文献[10]针对平面上目标的定位及长度测量等问题,提出一种基于单目视觉测量平面上物体位置的方法。文献[11]为提高摄像机光轴方向上的位移测量精度,在摄像机光轴方向上加装激光测距传感器进行辅助测距。文献[12]将单目测距应用到双足机器人中,提出一种简单易行、运算量较小的单目几何定位测距方法。文献[13-14]将单目测距应用到即时定位与地图构建(Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)中,降低了系统运行消耗。

但相关研究中也存在一些不足:文献[9]提出的方法要求矫正偏差角,而每次实验的偏差角不同,导致步骤过于繁琐;文献[10]虽然测距精度较高,但仅适用于固定场合,无法应用到其他复杂环境;文献[11]通过加装激光测距传感器来提高精度,大幅提高了测距成本。

本文在视觉跟踪目标物体的背景下,提出一种解决移动机器人跟踪问题的单目视觉测距方法。通过小孔平面成像模型得到世界坐标系与像素坐标系下的坐标的转换关系,再对摄像机进行标定得到坐标系转换的参数。针对转换关系中可能遇到的矩阵奇异问题,引入目标物体的面积特性进行求解,从而得到测距表达式。该方法能克服文献[9-11]中单目测距需要目标物体为平面物体的缺陷,消除光轴偏差所带来的误差。

1 小孔平面成像模型

单目视觉系统利用小孔平面成像模型描述三维空间中的点到摄像机图像上的点的关系,在不考虑镜头畸变的条件下,基本能满足测距的要求。小孔成像模型中需要建立4个坐标系,分别是世界坐标系、摄像机坐标系、成像平面坐标系和像素坐标系,空间中的点 P 在4个坐标系下的坐标分别为 (X_w, Y_w, Z_w) , (X_c, Y_c, Z_c) , (x, y) , (u, v) ,如图1所示。

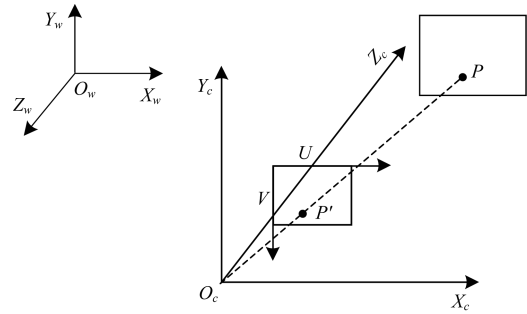


图1 坐标系对应关系

由图1中比例可知,世界坐标系下坐标与摄像机坐标系下坐标的关系如下:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = [R \quad T] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, R 为 3×3 的旋转矩阵; T 为 3×1 的平移向量。

空间中的点透过透镜从摄像机坐标系投影到成像平面坐标系,其映射关系如下:

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, f 为摄像机的焦距。

摄像机将成像平面上的图像转化为数字图像,通过像素坐标 (u, v) 来进行存储,其对应关系如下:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & 1/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, d_x, d_y 表示每个像素在 x 轴和在 y 轴上的物理尺寸; (u_0, v_0) 表示摄像机光轴在图像平面上的坐标。

将式(2)、式(3)代入式(1),得到像素平面坐标系下坐标与世界坐标系下坐标的关系:

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & f/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [R \quad T] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

令 $s = Z_c$ 为比例因子, $\alpha_x = f/d_x, \alpha_y = f/d_y$,得:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [R \quad T] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \mathbf{M} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, \mathbf{A} 为 3×3 的摄像机内参矩阵; \mathbf{M} 为 3×4 的摄像机外参矩阵。由式(5)可知,若事先对摄像机进行标

定,确定摄像机的内参矩阵 \mathbf{A} 以及外参矩阵 \mathbf{M} ,则可以通过其在世界坐标系下的坐标 (X_w, Y_w, Z_w) 唯一确定其在图像平面下的坐标 (u, v) ,但仅从图像平面坐标 (u, v) 无法推出其唯一的世界坐标 (X_w, Y_w, Z_w) 。

2 单目测距原理

本文作如下假设:小球半径 r 已知,且其在水平面上运动,在小球球心运动平面建立 $Z_w = 0$ 的世界坐标系。令 $\mathbf{M} = [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{r}_3 \ \mathbf{T}]$,其中 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3$ 为 3×1 的列向量,则式(5)转化为:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \mathbf{M}_1 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, $\mathbf{M}_1 = [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{T}]$ 。

接下来分2种情况来讨论。

1) 矩阵 \mathbf{M}_1 非奇异。

由于摄像机内参矩阵 \mathbf{A} 为非奇异矩阵,因此由式(6)得:

$$s \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1^{-1} \mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ s \end{bmatrix} \quad (7)$$

从而得到小球球心在世界坐标系下的坐标:

$$\begin{cases} X_w = \frac{u_1}{s} \\ Y_w = \frac{v_1}{s} \end{cases} \quad (8)$$

2) 矩阵 \mathbf{M}_1 奇异。

本文考虑如下奇异情况:摄像机坐标系的原点同世界坐标系的原点重合,同时摄像机坐标系为世界坐标系沿 X 轴正方向顺时针旋转 90° 所得,即平移向量 \mathbf{T} 和旋转矩阵 \mathbf{R} 分别为:

$$\begin{cases} \mathbf{T} = [0 \ 0 \ 0]^T \\ \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (9)$$

显然,矩阵 \mathbf{M}_1 是奇异的,将矩阵 \mathbf{R} 和向量 \mathbf{T} 代入式(5),得:

$$Y_w \begin{bmatrix} u - u_0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x X_w \\ 0 \\ Y_w \end{bmatrix} \quad (10)$$

因此,通过图像坐标系下的坐标 (u, v) ,只能得到世界坐标系下坐标值的比例,即:

$$\frac{u - u_0}{\alpha_x} = \frac{X_w}{Y_w} \quad (11)$$

由于通过一个变量 u 无法解出 X_w, Y_w 的值,因此需要引入面积这一特性来求解。由文献[15]可知,对于垂直于摄像机光轴中心线的平面内的目标,其平面面积 S 和像素平面的面积 S_1 存在如下关系:

$$S = S_1 \frac{d^2}{\alpha_x \alpha_y} \quad (12)$$

其中, d 为平面到小孔的垂直距离。

立体物体“球”的小孔平面成像模型(俯视图)如图2所示。

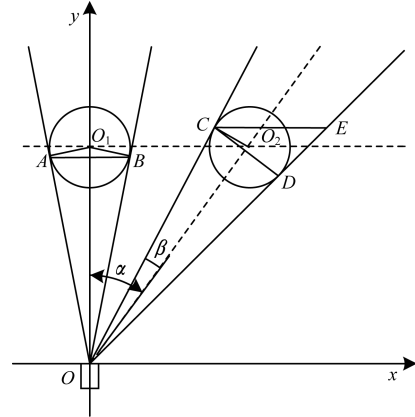


图2 小球小孔平面成像模型

考虑上述模型,分以下2种情形来讨论:

情形1 小球球心在摄像机光轴上,球心在世界坐标系下的坐标为 $(0, Y_w, 0)$ 。此时小球的等效成像平面为图2中的线段 AB ,实际投影面积 S 和垂直距离 d 分别为:

$$\begin{cases} S = \pi \left(r^2 - \frac{r^4}{Y_w^2} \right) \\ d = Y_w - \frac{r^2}{Y_w} \end{cases} \quad (13)$$

将上式代入式(12),得:

$$Y_w = \sqrt{r^2 + \frac{\pi r^2 \alpha_x \alpha_y}{S_1}} \quad (14)$$

情形2 小球球心不在摄像机光轴上,球心在世界坐标系下的坐标为 $(X_w, Y_w, 0)$ 。此时小球的等效成像平面为图2中的线段 CE ,其长度为 L_{CE} ,令式(11)中 $(u - u_0)/\alpha_x = a$,其中 u 是通过图像处理所得像素平面内目标形心的 u 轴坐标值,图2中角度 α, β 可得: $\alpha = \arctan a, \beta = \arcsin(r/(\sqrt{1+a^2} Y_w))$,画一根垂直于 OO_2 的直线 CD ,由正弦定理可得:

$$\begin{aligned} L_{CE} &= L_{CD} \frac{\sin \angle CDE}{\sin \angle CED} \\ &= 2 \sqrt{r^2 - \frac{r^4}{(1+a^2) Y_w^2}} \times \frac{\cos b}{\cos(a+b)} \\ &= \frac{2r}{Y_w} \frac{(1+a^2) Y_w^2 - r^2}{\sqrt{(1+a^2) Y_w^2 - r^2} - ar} \end{aligned} \quad (15)$$

其中, $\angle CDE = \pi/2 + \beta$; $\angle CED = \pi/2 - \alpha - \beta$; $L_{CD} = \sqrt{r^2 - r^4 / ((1 + a^2) Y_w^2)}$ 。

因此, 投影面积 S 为:

$$S = \pi \sqrt{r^2 - \frac{r^4}{Y_w^2}} \times \frac{r}{Y_w} \times \frac{(1 + a^2) Y_w^2 - r^2}{\sqrt{(1 + a^2) Y_w^2 - r^2} - ar} \quad (16)$$

而投影面 S 到小孔的垂直距离 d 实际为切点 C 的纵坐标 y , 令切线 CO 的方程为 $y = bx (b \neq 0)$, 观察三角形 OCO_2 , 得到以下方程组:

$$\begin{cases} y = bx \\ x^2 + y^2 + r^2 = (1 + a^2) Y_w^2 \end{cases} \quad (17)$$

消去 x 得:

$$d^2 = y^2 = \frac{(1 + a^2) Y_w^2 - r^2}{\frac{1}{b^2} + 1} \quad (18)$$

由于 b 又是切线 CO 的斜率, 因此:

$$\begin{aligned} b = \frac{y}{x} &= \tan(\frac{\pi}{2} - \alpha + \beta) = \frac{\cot \alpha \cot \beta + 1}{\cot \beta - \cot \alpha} \\ &= \frac{\sqrt{(1 + a^2) Y_w^2 - r^2} + ar}{a \sqrt{(1 + a^2) Y_w^2 - r^2} - r} \end{aligned} \quad (19)$$

将式(16)、式(18)和式(19)代入式(12), 得:

$$\sqrt{Y_w^2 - r^2} (\sqrt{(1 + a^2) Y_w^2 - r^2} + ar) = \frac{\pi r^2 \alpha_x \alpha_y (1 + a^2)}{S_1} \quad (20)$$

令 $\sqrt{Y_w^2 - r^2} = \xi (\xi > 0)$, $\pi r^2 \alpha_x \alpha_y (1 + a^2) / S_1 = c (c > 0)$, 将其代入式(20)整理得到:

$$(1 + a^2) \xi^4 = -2acr\xi + c^2 \quad (21)$$

在等式左右两边各加上 $2\sigma\sqrt{1 + a^2}\xi^2 + \sigma^2$ 后 可得:

$$(\sqrt{1 + a^2}\xi^2 + \sigma)^2 = 2\sigma\sqrt{1 + a^2}\xi^2 - 2acr\xi + c^2 + \sigma^2 \quad (22)$$

其中, $\sigma (\sigma \geq 0)$ 由参数 a, c, r 组成。现需找到一个 σ , 使得上式右边为一个关于 ξ 的一元二次方程, 所以, σ 需满足:

$$2\sigma\sqrt{1 + a^2} (c^2 + \sigma^2) = (acr)^2 \quad (23)$$

即:

$$\sigma^3 + c^2\sigma - \frac{(acr)^2}{2\sqrt{1 + a^2}} = 0 \quad (24)$$

令 $c^2 = p$, $-(acr)^2 / (2\sqrt{1 + a^2}) = q$, 则可以将

式(24)看作一个关于 σ 的一元三次方程, 由塔塔利亚公式可求得其中一个实数根:

$$\begin{aligned} \sigma &= \left(-\frac{q}{2} - \left(\left(\frac{q}{2} \right)^2 + \left(\frac{p}{3} \right)^3 \right)^{\frac{1}{3}} \right)^{\frac{1}{3}} \\ &+ \left(-\frac{q}{2} + \left(\left(\frac{q}{2} \right)^2 + \left(\frac{p}{3} \right)^3 \right)^{\frac{1}{3}} \right)^{\frac{1}{3}} \end{aligned} \quad (25)$$

求得 σ 后, 对式(22)同时在等式两边开方 得到:

$$\sqrt{1 + a^2}\xi^2 + \sigma = \left| \sqrt{2\sigma\sqrt{1 + a^2}\xi} - \sqrt{c^2 + \sigma^2} \right| \quad (26)$$

令 $\sqrt{1 + a^2} = m$, 分别解出上式中 2 条一元二次 方程的 4 个根:

$$\begin{aligned} \xi_{1,2} &= \frac{-\sqrt{2\sigma m} \pm \sqrt{2\sigma m - 4m(\sigma - \sqrt{c^2 + \sigma^2})}}{2\sqrt{1 + a^2}} \\ \xi_{3,4} &= \frac{-\sqrt{2\sigma m} \pm \sqrt{2\sigma m - 4m(\sigma + \sqrt{c^2 + \sigma^2})}}{2m} \end{aligned} \quad (27)$$

舍去其中 1 个负数根和 2 个复数根, 得到 ξ 的 唯一正数解:

$$\xi = \frac{\sqrt{2\sqrt{c^2 + \sigma^2} - \sigma} - \sqrt{\sigma}}{\sqrt{2}(1 + a^2)} \frac{1}{4} \quad (28)$$

从而得到小球在世界坐标系下的坐标:

$$\begin{cases} Y_w = \sqrt{\xi^2 + r^2} \\ X_w = aY_w \end{cases} \quad (29)$$

3 测量实验与结果分析

本文实验采用 Logitech WebCam C525 型号的 摄像机采集图片, 摄像机固定在移动机器人机身上。 利用 VS2003 以及 OpenCV 对采集的图片进行目标 识别, 返回目标像素面积 S_1 以及像素形心坐标 (u, v) 用于测距计算。

首先对摄像机进行标定, 标定所得的摄像机内 参矩阵如下:

$$A = \begin{bmatrix} 721.319 & 0 & 316.556 \\ 0 & 719.727 & 233.821 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (30)$$

外参矩阵如下:

$$\begin{aligned} M &= [R \quad T] \\ &= \begin{bmatrix} 0.999 0 & 0.119 6 & 0.009 0 & -27.852 0 \\ 0.012 5 & -0.480 3 & -0.877 0 & 502.914 0 \\ 0.004 1 & 0.877 1 & -0.480 3 & 3149.693 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (31)$$

小球所在世界坐标系的实际值、测量值、综合误 差(由 $\sqrt{X_w^2 + Y_w^2}$ 计算而来)以及综合误差率如表 1 所示。

表 1 小球测距实验数据

测量数据组号	Y_w 实际值/cm	X_w 实际值/cm	Y_w 测量值/cm	X_w 测量值/cm	综合误差/cm	综合误差率/%
1	80	0	80.31	-0.51	0.31	0.39
2	90	0	90.17	0.25	0.17	0.19
3	100	0	100.48	-0.30	0.48	0.48
4	110	0	110.39	0.17	0.39	0.35
5	120	0	120.19	0.28	0.19	0.16
6	130	0	129.59	-0.24	0.41	0.32
7	140	0	139.06	-0.30	0.94	0.67
8	150	0	149.40	0.20	0.60	0.40
9	150	10	150.33	10.40	0.36	0.24
10	150	20	150.16	19.80	0.13	0.09

由表 1 可知,本文方法的综合误差率均在 0.7% 以内,误差率较小。误差产生的原因主要是由相机标定误差以及外参矩阵的测量误差引起,其次相机的非线性畸变也造成了一定的误差,图像处理过程中识别不精确也给像素平面定位带来了误差。文献[9]中提出的单目测距方法在同样利用物体面积与像素面积的比例关系,不考虑相机非线性畸变以及标定误差的情况下,实验结果最大误差率为 1.68%,高于本文方法的综合误差。本文方法相较于文献[9]方法,其优点是可应用至立体目标测距,且不同测距实验无需矫正,步骤简便,但缺点就是计算繁琐,对计算机硬件要求较高。

4 结束语

本文根据轮式移动机器人目标跟踪任务的需要,提出一种基于单目摄像机的视觉测距方法。标定摄像机以及测量摄像机的安装位置以获得坐标变换时摄像机的内外参数,从而降低测量误差。考虑摄像机安装位置可能带来的奇异性,分 2 种情况推导目标距离与像素点或像素面积的关系。实验结果表明,本文方法综合误差率控制在 0.7% 以内,可满足轮式移动机器人的实时目标测距要求。

参考文献

[1] 李 戈,孟祥杰,王晓华,等. 国内超声波测距研究应用现状[J]. 测绘科学,2011,36(4):60-62.
 [2] 施智勇,潘晓声,张 谦. 利用延时法进行高精度脉冲激光测距[J]. 光学精密工程,2014,22(2):252-258.
 [3] 石春琴,张丽艳,韦 虎,等. 随机模式投影双目测量

系统中的单目测量[J]. 光学精密工程,2010,18(1):257-265.
 [4] 沈 彤,刘文波,王 京. 基于双目立体视觉的目标测距系统[J]. 电子测量技术,2015,38(4):52-54.
 [5] 祝 琨,杨唐文,阮秋琦,等. 基于双目视觉的运动物体实时跟踪与测距[J]. 机器人,2009,31(4):327-334.
 [6] Yang Rongqian, Cheng Sheng, Yang Wei, et al. Robust and Accurate Surface Measurement Using Structured Light[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(6):1275-1280.
 [7] Zhang Chi, Xu Jing, Xi Ning, et al. A Robust Surface Coding Method for Optically Challenging Objects Using Structured Light[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2014, 11(3):775-788.
 [8] 祝世平,强锡富. 用于摄像机定位的单目视觉方法研究[J]. 光学学报,2001,21(3):339-343.
 [9] 韩延祥,张志胜,戴 敏. 用于目标测距的单目视觉测量方法[J]. 光学精密工程,2011,19(5):1110-1117.
 [10] 尹英杰,徐 德,张正涛,等. 基于单目视觉的平面测量[J]. 电子测量与仪器学报,2013,27(4):347-352.
 [11] 晁志超,伏思华,姜广文,等. 单目摄像机-激光测距传感器位姿测量系统[J]. 光学学报,2011,31(3):85-91.
 [12] 于乃功,黄 灿,林 佳. 基于单目视觉的机器人目标定位测距方法研究[J]. 计算机测量与控制,2012,20(10):2654-2656.
 [13] Civera J, Davison A J, Montiel J. Inverse Depth Parametrization for Monocular SLAM [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2008, 24(5):932-945.
 [14] Bresson G, Feraud T, Aufrere R, et al. Real-time Monocular SLAM with Low Memory Requirements[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(4):1827-1839.
 [15] 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,2011.

编辑 金胡考