

基于 MEMS 的自校准双目测距方法

李伟伟, 于纪言

(南京理工大学 智能弹药国防重点学科实验室, 南京 210094)

摘要:提出了一种基于 MEMS 自校准双目测距方法。利用 IMU 姿态传感器与三轴伺服电机作为摄像头光轴自校准平台,采用双目相机成像模型进行测距。结果表明,该方法利用 IMU 姿态传感器可以有效地校准摄像头光轴,使其完全平行,同时双目相机成像模型测距精确度和速度较高,满足视觉测距的精确性、快速性需求。

关键词:观察设备;双目视觉;双目测距;自校准;MEMS;双目相机成像模型

本文引用格式:李伟伟, 于纪言. 基于 MEMS 的自校准双目测距方法[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(S2): 215-217.

Citation format: LI Weiwei, YU Jiyan. Self-Calibration Binocular Ranging Method Based on MEMS[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(S2): 215-217.

中图分类号: TP23

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2019)S2-0215-03

Self-Calibration Binocular Ranging Method Based on MEMS

LI Weiwei, YU Jiyan

(Minsterial Key Laboratory of ZNDY, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to solve the problem of camera alignment error in binocular ranging method, a self-calibration binocular ranging system based on MEMS is proposed. The method uses IMU attitude sensor and three-axis servo motor as the camera optical axis self-calibration platform, and uses binocular camera imaging model for ranging. The results show that the method can effectively calibrate the camera optical axis by using IMU attitude sensor, and make it completely parallel. At the same time, the binocular camera imaging model has high ranging accuracy and speed, which meets the requirements of visual ranging accuracy and rapidity.

Key words: observation equipment; binocular vision; binocular ranging; self-calibration; MEMS; binocular camera imaging model

随着计算机技术的飞速发展,视觉测距广泛应用于社会各个行业和领域。常用的视觉测距方法有单目测距^[1]、双目测距^[2]、结构光测距^[3]等。罗时光^[4]提出了一种单目测距技术,将单目视觉系统简化为摄像机投影模型。通过建立相应的测距模型,将图像坐标转换成世界坐标系中的坐标,最后通过几何关系运算得到被测距离,但此方案缺少光轴对准过程。张丽娟等^[5]提出基于双目 CCD 测距的目标图像匹配算法研究,利用基于模板的灰度互相关算法进行亚像素级匹配,采用三次曲面拟合方法,得到对应的亚像素级坐标。但缺少光轴对准过程,且匹配算法易受像素点拍摄效果影响。

张永举等^[6]提出了一种结构光与双目视觉相结合的三维测量方法,通过向物体投射编码结构光,使得待测物体在结构光的照射下生成特殊图像,提供了很多的特征匹配角点,可以很方便的进行特征点的匹配,提高了匹配的精度,但是该方案结构光由于光源的限制,应用的场合比较固定。因此本文提出一种基于 MEMS^[7]的双目测距方法,利用 IMU 姿态传感器^[8-9]配合伺服电机进行摄像头自校准,采用双目相机成像模型^[10]进行测距,最终实现精确、有效、快速的双目测距。

收稿日期: 2019-06-24; 修回日期: 2019-07-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(11602111)

作者简介: 李伟伟(1994—), 硕士研究生, 主要从事嵌入式技术研究; 于纪言(1979—), 博士, 副研究员, 主要从事智能弹药研究。

1 双目测距原理

通过摄像头获得的二维成像平面得出深度信息,直接对目标物体进行距离测量。双目摄像头的原理与人眼相似,人眼能够感知物体的远近,是由于两只眼睛对同一个物体呈现的图像存在差异,也称“视差”。物体距离越远,视差越小;反之,视差越大。视差的大小对应着物体与眼睛之间距离的远近。

1.1 理想双目相机成像模型

如图 1 所示,根据三角形相似定律得:

$$\frac{z}{f} = \frac{y}{y_1} = \frac{y}{y_2} = \frac{x}{x_1} = \frac{b-x}{x_2} \quad (1)$$

由式(1),解方程得:

$$x = \frac{x_1 * b}{x_1 + x_2}, y = \frac{b * y}{x_1 + x_2}, z = \frac{b * f}{x_1 + x_2} \quad (2)$$

令 $x_1 + x_2 = d$, 则:

$$z = b * f / d, x = z * x_1 / d, y = z * y / d \quad (3)$$

根据上述推导,再结合相机焦距 f , 左右相机基线 b , 从而求得空间点 T 离相机的距离 z 。

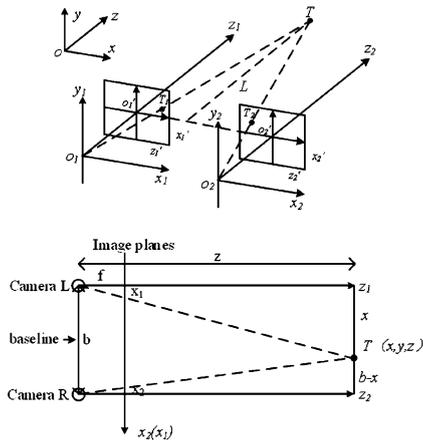


图 1 理想双目相机成像模型

1.2 非理想情况

上面是两摄像头共面且光轴平行,参数相同的理想情况,但是在实际测量过程中由于存在摄像头安装误差,光轴对准误差,很难保证光心完全水平,光轴完全平行,其成像模型如图 2 所示。

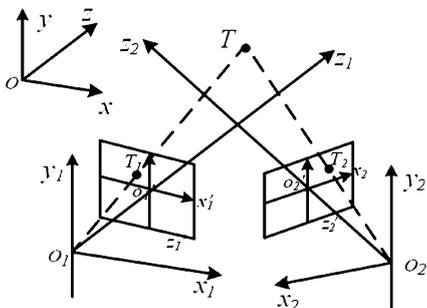


图 2 非理想双目相机成像模型

摄像头光轴是否完全平行对最终的测距结果有很大影响,因此本文利用 IMU 姿态传感器配合三轴伺服电机来作为摄像头光轴自校准平台。

2 IMU 姿态传感器模型

2.1 IMU 姿态传感器坐标轴关系

姿态传感器与摄像头固连,传感器 z 轴方向与摄像头竖直向上轴线保持重合, x 轴方向与摄像头光轴方向保持重合, y 轴方向且同时与 x, z 轴保持垂直。其中坐标关系如下:世界坐标系为 $Oxyz$,摄像头坐标系为 $Ox_1y_1z_1$ 。定义世界坐标系 $Oxyz$ 为参考坐标系, x_1y_1 与 xy 平面相交形成交点线 N ,则摄像头偏航角 ϕ 为 x 轴与交点线 N 的夹角,横滚角 γ 为 z_1 轴与 z 轴的夹角,俯仰角 φ 为 x_1 轴与交点线 N 的夹角。各坐标系关系如图 3 所示。

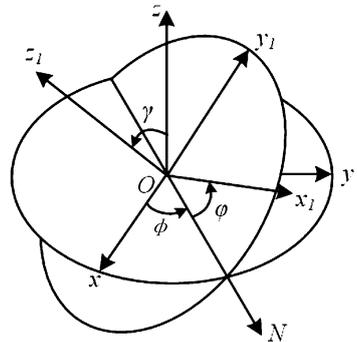


图 3 IMU 姿态传感器各坐标轴关系

2.2 姿态解算

假设世界坐标系 $Oxyz$ 作为参考系 n ,摄像头坐标系 $Ox_1y_1z_1$ 为 b ,摄像头坐标系 b 在世界坐标系 n 中运动,产生俯仰、偏航与滚转的变化。由姿态传感器的三轴陀螺仪数据进行对时间积分,求得上述三个姿态角,同时引入加速度计/磁力计的融合校正,最终求得摄像头相对于世界坐标系的 3 个姿态角:俯仰角 φ 、偏航角 ϕ 和滚转角 γ ^[14]。

2.2.1 四元数与姿态矩阵

本文采用四元数法作为姿态更新算法,其具有计算量小、精度高、可用于全姿态解算等优点,四元数的定义如下:

$$Q(q_0, q_1, q_2, q_3) = q_0 + q_1 \vec{i} + q_2 \vec{j} + q_3 \vec{k} \quad (4)$$

其中, q_0, q_1, q_2, q_3 是实数, i, j, k 既是互相正交的单位向量。

假设初始时刻 b 系与 n 系重合,摄像头坐标系 b 相对于世界坐标系 n 作定点转动。则用四元数可确定出 b 系至 n 系的坐标转换矩阵 C_n^b ,其公式如下。

$$C_n^b = \begin{pmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

由于摄像头的偏航角为 Ψ (北偏东为正),俯仰角为 θ ,横滚角为 γ ,则从 b 系至 n 系经过三次基本变换后可得到坐标变换矩阵 C_n^b ,由于从 n 至 b 的旋转过程中坐标系始终是直

角坐标系,所以 C_b^c 的正交矩阵为 C_b^a ,其公式如下。

$$C_b^a = \begin{pmatrix} \cos\psi\cos\theta + \sin\psi\sin\theta\sin\theta & -\sin\psi\cos\theta + \cos\psi\sin\theta\sin\theta & -\sin\psi\cos\theta \\ \sin\psi\cos\theta & \cos\theta\cos\psi & \sin\theta \\ \sin\psi\cos\theta - \cos\psi\sin\theta\sin\theta & -\sin\psi\sin\theta - \cos\psi\cos\theta\sin\theta & \cos\psi\cos\theta \end{pmatrix} \quad (6)$$

结合式(2)和式(3)可得姿态角公式如下:

$$\begin{aligned} \theta &= \sin^{-1}(2(q_2q_3 + q_0q_1)) \\ \psi &= \tan^{-1}\left(\frac{2(q_1q_2 - q_0q_3)}{q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2}\right) \\ \gamma &= \tan^{-1}\left(-\frac{2(q_1q_3 - q_0q_2)}{q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

2.2.2 互补滤波

互补滤波的具体步骤为:

- (1) 重力加速度归一化;
- (2) 向量叉积得出姿态误差;
- (3) 对误差进行积分;
- (4) 互补滤波,用叉积误差做 PI 修正陀螺零差,即抵消陀螺读数中的偏移量,修正角速度积分漂移;
- (5) 一阶 Runge-Kutta 法更新四元数,其公式如下;

$$\begin{aligned} q_0^+ &= (-q_1 \text{Last} * \text{gyrox} - q_2 \text{Last} * \text{gyroy} - \\ &\quad q_3 \text{Last} * \text{gyroz}) * \text{halfT} \\ q_1^+ &= (q_0 \text{Last} * \text{gyrox} + q_2 \text{Last} * \text{gyroz} - \\ &\quad q_3 \text{Last} * \text{gyroy}) * \text{halfT} \\ q_2^+ &= (q_0 \text{Last} * \text{gyroy} - q_1 \text{Last} * \text{gyroz} + \\ &\quad q_3 \text{Last} * \text{gyrox}) * \text{halfT} \\ q_3^+ &= (q_0 \text{Last} * \text{gyroz} + q_1 \text{Last} * \text{gyroy} - \\ &\quad q_2 \text{Last} * \text{gyrox}) * \text{halfT} \end{aligned} \quad (5)$$

- (6) 四元数归一化;
- (7) 提取四元数的等效余弦矩阵中的重力分量;
- (8) 四元数转欧拉角。

3 实验结果

首先进行摄像头光轴自校准,输入摄像头的目标姿态即:俯仰角 $\varphi_1 = 0$ 、偏航角 $\phi_1 = 0$ 、滚转角 $\gamma_1 = 0$,姿态传感器测量得出摄像头的实际姿态角:俯仰角 φ_2 、偏航角 ϕ_2 和滚转角 γ_2 ,计算得到两者姿态差(φ_1 、 φ_2 差为 $\Delta\varphi_{12}$, ϕ_1 、 ϕ_2 差为 $\Delta\phi_{12}$, γ_1 、 γ_2 差为 $\Delta\gamma_{12}$),驱动与摄像头固连的三轴伺服电机,分别在俯仰角 φ 、偏航角 ϕ 和滚转角 γ 方向上对摄像头进行调整,使得摄像头最终达到预定目标姿态,即两摄像头光轴完全平行。校准后,摄像头拍摄得到图像,得到相应数据代入测距公式,最终求出被测目标到摄像头的距离。

本方案进行了自校准与手动校准的对比测试,其实验结果如表 1 所示。

表 1 测距实验结果比较

组别	实际距离 L/m	自校准测量 结果 L_1/m	手动校准测量 结果 L_2/m	误差/ %
1	10	10.16	10.31	1.56
2	20	20.56	20.89	2.80
3	30	30.39	31.09	1.30

4 结论

利用 IMU 姿态传感器配合伺服电机可以快速、有效实现双目摄像头自校准,同时双目相机成像模型可以较为精准地实现测距功能,具有较高的工程实践价值。

参考文献:

- [1] 李贤辉,高盈,钱恭斌.基于瞳孔定位的单目测距系统[J].智能计算机与应用.2016,6(2):70-73.
- [2] 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.
- [3] 张鑫,习俊通.基于随机编码结构光的双目立体三维测量系统[J].机电一体化,2013(3):61-65.
- [4] 罗时光.基于单目测距技术的道路障碍物检测方法[J].软件,2013,34(9):100-102.
- [5] 张丽娟,杨进华,姜雨彤,等.基于双目 CCD 测距的目标图像匹配算法研究[J].激光与光电子学进展,2014,51:091002.
- [6] 张永举,顾旭波,张健,等.结构光与双目视觉相结合的三维测量[J].计算机与现代化,2018(2):118-121.
- [7] 陈孟元,谢义建,陈跃东.基于四元数改进型互补滤波的 MEMS 姿态解算[J].电子测量与仪器学报,2015,29(9):1931-1936.
- [8] 何松,陈兴武.基于 MPU9250 的无人机姿态信息采集及处理[J].福建工程学院学报,2016,14(6):587-592.
- [9] 王焱春,张新英,梁芬.多传感器信息融合的四旋翼姿态解算研究[J].单片机与嵌入式系统应用,2018(8):39-42.
- [10] 李双全,章国宝.基于 ORB 算法的双目立体视觉测距系统[J].工业控制计算机,2017,30(6):42-44.

(责任编辑 杨继森)