doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.010

基于单目高速相机的平地铲位姿参数动态测量方法

郭胜君 赵祚喜 张智刚 谈 婷 冯 荣 宋俊文 (华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室,广州 510642)

摘要:为研究水田激光平地机动力学模型,提高控制算法精度,优化机械结构设计,提出一种基于单目高速相机的 平地铲位姿参数动态测量方法。该方法利用直接线性变换(Direct linear transformation,DLT)分别建立单目相机与 平地铲局部坐标系、单目相机与平地铲台架之间的对应关系方程,通过高斯--牛顿迭代法间接求解出平地铲上两个 坐标系之间的转换关系,从而实现平地铲空间位置和姿态角的测量。利用单目高速相机进行了试验验证,并与 AHRS(Attitude and heading reference system)传感器进行数据对比。试验结果表明:本文方法可以实现平地铲的位 姿参数测量,与 AHRS 传感器相比,姿态角平均绝对误差为0.687°、标准差为0.543°,最大绝对误差为 - 1.92°,出 现在平地铲运动到3.76 s 处;测得的质心位置在 X、Y、Z 轴方向上的变化与平地铲实际运动相符。 关键词:平地铲;位姿参数;高速相机;动态测量;高斯牛顿法;AHRS 传感器

中图分类号: TP391.4; S222.29 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)S0-0062-05

Dynamic Measurement Method of Position and Attitude Parameters of Flat Shovel Based on Monocular High-speed Camera

GUO Shengjun ZHAO Zuoxi ZHANG Zhigang TAN Ting FENG Rong SONG Junwen (Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In order to study the dynamic model of laser grader in paddy field, improve the accuracy of control algorithm and optimize the design of mechanical structure, a dynamic measurement method of position and attitude parameters of grader based on monocular high-speed camera was proposed. Direct linear transformation (DLT) was used to establish the corresponding equations between monocular camera and local coordinate system, monocular camera and flat shovel platform respectively, and indirectly solve the transformation relationship between the two coordinate systems on flat shovel by Gauss – Newton iteration method, so as to realize the measurement of spatial position and attitude angle of flat shovel. Experiments were carried out with a monocular high-speed camera, and the data were compared with that of the attitude and heading reference system (AHRS) sensor. The experimental results showed that this method can measure the position and attitude parameters of the flat shovel. Compared with the AHRS sensor, the average absolute error of attitude angle was 0. 687° and the standard deviation was 0. 543°. The maximum absolute error occurred when the flat shovel was moved to a limit position of 3. 76 s, which was -1.92° . The measured position of the center of mass in the *X*, *Y* and *Z* axes was in accordance with the actual movement of the flat shovel.

Key words: flat shovel; position and attitude parameters; high-speed camera; dynamic measurement; Gauss - Newton method; AHRS sensor

收稿日期: 2019-04-23 修回日期: 2019-05-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700101 - 02)、省级重大科研项目(2016KZDXM027)和广东省自然科学基金项目 (2016A030310448)

作者简介:郭胜君(1981—),男,博士生,主要从事机器视觉在农业上的应用研究,E-mail: 38701858@ qq. com

通信作者:赵祚喜(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事机器人及精准农业作业车辆自动导航技术应用研究,E-mail:zhao_zuoxi@hotmail.com

0 引言

目前,水田激光平地机的研究虽然取得了很大 进展,但在实际推广过程中仍存在高速工况作业不 稳定的问题,当平地机速度较快时,平地精度及整机 平顺性变差^[1-2]。从水田平地机基本结构出发,研 究其动力学模型、提高控制算法精度、优化机械结构 设计是解决该问题的有效途径。

水田激光平地机是刚柔耦合多体系统,其动力学 模型的验证往往需要对机械系统的刚体动态参数进 行测量,包括点的位置(速度、加速度)及刚体姿态角 (角速度、角加速度)等。这些参数往往需要不同时间 段重复测量,从而验证多体系统的性能。动力学模型 的验证虽取得一定进展,但还存在一定问题,尤其对 空间运动的多刚体系统目前还没有方便、有效的测试 手段。如文献[3]根据水田平地机的物理系统结构搭 建了简化的平地铲调平系统模型,但简化后的机构无 法真实反映原机构的动力学特性,同时并未对模型的 正确性进行试验验证。文献[4-5]提出的水田平地 机动力学模型是将机械系统视为多刚体系统,根据理 论分析建立微分--代数方程组并对方程组求解,但需 要用多个 AHRS (Attitude and heading reference system)传感器实时测量相关参数,增大了验证成本。 文献[6]对水田激光平地机刚柔一体平地铲总成进行 了机构分析与动力学建模,使用两台高速相机和配套 的高速图像分析软件测量平地铲质心位置与姿态角. 并对动力学模型仿真结果进行了验证。但该方法需 要用两个高速相机,且由于高速图像分析软件的限 制,只能同时测量5个点的运动变化,远远不能满足 参数测量要求。而在基于单目相机实时测量空间目 标位置和位姿测量方面,国内外已有大量研究^[7-11]。 如文献[12-14]对机器人和飞行器的位姿测量进行 研究,包括标靶的设计、标记点的特征提取、合作目标 的位置和姿态角测量方法、非合作目标的位置和姿态 角测量方法等,对基于机器视觉位姿测量的研究全面 且深入,但是仅停留在理论研究阶段,成熟的工程应 用案例很少见诸报道:文献[15-16]对视觉位姿测量 技术的研究主要以算法为主,科研成果较多,且在天 宫二号得到了成功应用,精确引导机械手圆满完成了 抓取漂浮物体、拆卸隔热材料和旋拧电连接器、电动 工具旋拧螺丝等各项空间试验任务:美国航空航天局 "洞察号"火星探测器[17]于2018年5月发射升空,其 上搭载的地震仪上布置了宝马标记点,用来实现火星 探测器对地震仪的位姿测量。以上研究都是应用在 飞机、航天器测量方面,在农业机械姿态测量方面还 鲜有报道,且这些方法大多以标靶作为合作目标的位 姿测量方法,该方法存在标靶高精度制作和安装偏差 等不可忽视的问题,且这两点在平地机上很难实现。

为此,寻求一种不需事先标定,简单、高效的平 地铲运动参数测量方法非常必要。本文在深入研究 直接线性变换(DLT)算法的基础上,利用建立在世 界坐标系和局部坐标系下的标记点,实现平地铲位 姿的动态测量。

1 材料与方法

1.1 测量设备

测量相关设备主要有 Phantom M310 型高速相 机及配套的尼康 F 型镜头、AHRS 传感器。其中 Phantom M310 型高速相机由美国 Vision Research 公司生产,3 200 f/s 拍摄速度下分辨率可达 1 280 像素×800 像素,相机分辨率、拍摄速率、曝光 时间可调,可生成 avi、JPEG 等多种视频、图像格式 并可相互转换;配套的尼康 F 型镜头可变焦距为 24~85 mm;AHRS 传感器选择 MTi-300 AHRS。

1.2 测量方法

1.2.1 平地铲位姿测量理论推导

为了能简单、高效地分析出平地铲运动的动态 变化过程,采用单目高速相机,结合人工布置标记点 的先验信息进行平地铲位姿测量。平地铲位姿测量 简易图如图1所示。



Fig. 1 Sketch for position and posture measurement of flat shovel

*O*_w、*A*、*B*、*C*点固定在试验台架上,*AJ* 是高程油 缸,用来控制平地铲的高度;*CH* 是水平油缸,用来控 制平地铲的水平位置。建立坐标系 B 系和 W 系,其 上分别布置 6 个以上已知先验信息的标记点,图像 的像素坐标可以通过图像处理软件事后处理得到。 本文的目的是利用已知标记点空间先验信息和像素 坐标计算出平地铲的动态姿态角变化,以及平地铲 质心在 W 系下的动态变化。

若相机与 W 系的外部参数用 R_1 、 T_1 表示,相机

(4)

与 B 系的外部参数用 R_2 、 T_2 表示, B 系与 W 系之间 转换关系用 R、T 表示; 平地铲上任一点在 W 系、B 系、相机坐标系下的坐标为 P^{W} 、 P^{B} 、 P^{C} ,则由成像公 式有

$$\boldsymbol{P}^{\mathrm{W}} = \boldsymbol{T}_{1} + \boldsymbol{R}_{1} \boldsymbol{P}^{\mathrm{C}} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{P}^{\mathrm{B}} = \boldsymbol{T}_{\mathrm{c}} + \boldsymbol{R}_{\mathrm{c}} \boldsymbol{P}^{\mathrm{C}} \tag{2}$$

由式(1)、(2)可得

$$\boldsymbol{P}^{\mathrm{W}} = \boldsymbol{T}_{1} + \boldsymbol{R}_{1}\boldsymbol{R}_{2}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{P}^{\mathrm{B}} - \boldsymbol{T}_{2})$$
(3)

$$\boldsymbol{R} = \boldsymbol{R}_1 \boldsymbol{R}_2^{\mathrm{T}}$$

其中

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

平地铲上点的空间位置可由式(3)求出,运动 姿态可由 *R* 解算出来。其中 *r*₁₁、*r*₁₂、…、*r*₃₃为矩阵 *R* 内的元素。

由文献[18]得刚体姿态角为

$$\begin{cases}
Q_z = \arctan(r_{21}, r_{11}) \\
Q_y = \arctan(-r_{31}, \sqrt{r_{32}^2 + r_{33}^2}) \\
Q_x = \arctan(r_{32}, r_{33})
\end{cases} (5)$$

其中 Q_z, Q_y, Q_x 分别为绕 Z, Y, X 轴的转角,旋转顺 序为 $Z - Y - X_o$

以上推导可以看出,观测平地铲空间位置和姿态角的动态变化需测量 R_1 、 T_1 、 R_2 、 T_2 ,而这 4 个参数实际就是相机的外部参数,本文结合所选相机焦距可变、标定困难的实际,选择 DLT 方法实现外部参数的测量。

1.2.2 DLT 方法理论

DLT 方法是 ABDEL – AZIZ 和 KARARA 首先于 1971 年提出的^[19],是在像点坐标和对应物点空间 坐标之间建立直接线性关系的算法,通过求解线性 方程的手段就可以求得摄像机内外参数。DLT 方法 的特点是不需要内方位元素的近似初始值,在非量 测数码相机的相机标定处理中非常适合^[20]。

若标记点 $P_i(i=1,2,\dots,N)$ 的空间坐标为 (X_i, Y_i, Z_i) ,对应的像素坐标为 (u_i, v_i) ,由 DLT 方法的 共线方程可知

$$\begin{cases} u_{i} = \frac{L_{1}X_{i} + L_{2}Y_{i} + L_{3}Z_{i} + L_{4}}{L_{9}X_{i} + L_{10}Y_{i} + L_{11}Z_{i} + 1} \\ v_{i} = \frac{L_{5}X_{i} + L_{6}Y_{i} + L_{7}Z_{i} + L_{8}}{L_{9}X_{i} + L_{10}Y_{i} + L_{11}Z_{i} + 1} \end{cases}$$
(6)

其中, L_i (*i*=1,2,…,11)是由相机内外参数表示的 系数。

由式(6)可知,11 个未知数 L_i,至少需要6 个点 才能求出 L_i,因方程数大于未知数个数,可用最小二 乘法来求解 L_i,进而求出相机外部参数。 该方法得到的外部参数没有完全考虑旋转矩阵 的约束条件,结果误差必然偏大。为提高精度,采用 高斯-牛顿迭代法对 11 个 *L*_i等式以及旋转矩阵的 6 个约束方程进行迭代优化,然后对求出的旋转矩 阵进行奇异值分解。经高斯-牛顿迭代和奇异值分 解处理后使估计得到的姿态矩阵严格满足旋转矩阵 的固有约束,有效降低了估计误差。

2 试验及数据分析

试验选用华南农业大学研制的 1PJ-3.0 型水 田激光平地机为平台。

2.1 试验准备

在平地铲上安装 AHRS 传感器,高速相机放置 在平地铲前方 2.1 m 处。坐标系定义如图 2 所示, 世界坐标系的原点定在后座油箱位置,局部坐标系 的原点定在平地铲的旋转中心,原点与平地铲的质 心存在固定的平移位置关系,可通过测量得到。在 平地铲的两个坐标系上布置标记点,用全站仪和其 他辅助测量工具测出各个标记点在各自坐标系下的 空间坐标值。



Fig. 2 Coordinate system definition diagram of horizontal laser flat shovel

2.2 数据分析

试验相机参数设定为:拍摄速度1000帧/s,分 辨率1280像素×800像素。AHRS 传感器的采样 频率为50Hz。试验现场如图3所示。

启动拖拉机,控制平地铲绕 Z 轴做往复运动, 用高速相机和 AHRS 传感器同时记录平地铲运动过 程并存储,因高速相机存储容量限制,试验共采集时 长为7.68 s 的视频图像。事后用配套的高速图像分 析软件确定所有标记点的像素坐标,用 Matlab 软件 编写前面推导的测量方法程序,处理图像序列得到 位姿参数值。平地铲绕 Z 轴旋转的实时姿态角如 图 4 所示,不同时刻平地铲姿态角数据对比如表 1 所示;质心位置的实时变化如图 5~7 所示。



Fig. 3 Field map of experiment

1. AHRS 传感器 2. Phantom M310 型高速相机



图 4 平地铲绕 Z 轴旋转的姿态角 Q₂ 变化曲线 Fig. 4 Changing curves of attitude angle Q₂ of flat

shovel rotating around Z-axis

表1 不同时刻平地铲姿态角 Q. 对比

Tab. 1Contrast of attitude angle Q_z of flat

snovel at different time			(°)
时间/s	本文方法测得的 Q_z	AHRS 测得的 Q_z	绝对误差
1	- 13. 78	- 13. 84	0.06
2	- 8.10	- 8. 43	0.33
3	1.40	2.04	-0.64
3.76	- 22. 62	- 20. 70	- 1. 92
4	- 13. 99	- 13. 34	-0.65
5	- 15.69	- 13.96	- 1. 73
6	11.48	12.28	-0.80
7	3.76	4.50	-0.74









变化,试验姿态角的平均绝对误差为0.687°,标准 差为0.543°,最大绝对误差出现在平地铲运动到一 个极限位置即3.76 s时,为-1.92°;该极限位置是 从相机位置看平地铲左侧最高右侧最低位置,此时 平地铲与相机平面倾斜最大,标记点不共面约束变 差,这导致了误差变大。

图 5~7 表明,本文方法测得的质心位置在 X、 Y、Z 轴方向上的变化与平地铲运动实际相符,为平 地铲动力学模型仿真及验证提供了方法。

3 结论

(1)提出了一种基于单目高速相机的平地铲位 姿参数动态测量方法。该方法利用 DLT 分别建立 单目相机与平地铲局部坐标系、单目相机与平地铲 台架之间的对应关系方程,通过高斯-牛顿迭代法间 接求解出平地铲上两个坐标系之间的转换关系,从 而实现平地铲空间位置和姿态角的测量。

(2)试验表明,本文方法可以实现平地铲的位 姿参数测量,与 AHRS 传感器相比,姿态角平均绝对 误差为 0. 687°、标准差为 0. 543°,最大绝对误差为 -1. 92°,出现在平地铲运动到 3. 76 s 处;测得的质 心位置在 *X*、*Y*、*Z* 轴方向上的变化与平地铲实际运 动相符。本研究为平地铲动力学模型仿真及验证提 供了方法。

2019年

参考文献

- [1] 艾建军,杨英芸,高韶坤. 我国农田激光平地机的研究进展及发展趋势[J]. 东北农业大学学报,2013,44(11):155-160.
 AI Jianjun, YANG Yingyun, GAO Shaokun. Research statusand development trend of farmland laser land leveling machine in China[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2013, 44(11): 155-160. (in Chinese)
- [2] 罗锡文,廖娟,胡炼,等.提高农业机械化水平促进农业可持续发展[J].农业工程学报,2016,32(1):1-11.
 LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Improving agricultural mechanization level to promote agricultural sustainable development[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(1):1-11. (in Chinese)
- [3] 陈君梅. 水田激光平地机实用技术[J]. 现代农业装备,2013(6):43-46.
- [4] 陈君梅,赵祚喜,陈嘉琪.水田激光平地机非线性水平控制系统[J].农业机械学报,2014,45(7):79-84. CHEN Junmei, ZHAO Zuoxi, CHEN Jiaqi. Design of nonlinear leveling control system for paddy land leveler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(7): 79-84. (in Chinese)
- [5] 陈嘉琪,赵祥喜,施垒,等.水田激光平地机调平系统动力学建模[J].农业工程学报,2015,31(7):18-23.
 CHEN Jiaqi, ZHAO Zuoxi, SHI Lei, et al. Dynamic modeling of leveling system of paddy field laser leveler[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(7): 18-23. (in Chinese)
- [6] 赵祚喜,涂海,冯荣,等.水田平地机刚柔耦合多体动力学建模及验证[J].农业工程学报,2017,33(19):27-33.
 ZHAO Zuoxi, TU Hai, FENG Rong, et al. Dynamic modeling and verification of paddy leveler based on rigid flexible coupling multibody systems[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(19):27-33. (in Chinese)
- [7] 李晶,袁峰,胡英辉. 基于多点合作目标的多线阵 CCD 空间物体姿态测量[J]. 光学精密工程,2013,21(6):1635-1641. LI Jing, YUAN Feng, HU Yinghui. Attitude measurement of space objects based on multi-linear CCD and multi-point cooperation target[J]. Optics and Precision Engineering,2013,21(6):1635-1641. (in Chinese)
- [8] WEN F X, BIN L, CHENG L, et al. Autonomous rendezvous and robotic capturing of non-cooperative target in space [J]. Robotica, 2010, 28(5):14.
- [9] LENG D W, SUN W D. Iterative three-dimensional rigid object pose estimation with contour correspondence [J]. IET Image Processing, 2012,6(5): 569-579.
- [10] 赵丽科,郑顺义,王晓南,等. 单目序列的刚体目标位姿测量[J]. 浙江大学学报(工学版),2018,52(12):2372-2381.
 ZHAO Like, ZHENG Shunyi, WANG Xiaonan, et al. Rigid object position and orientation measurement based on monocular sequence[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science),2018,52(12):2372-2381. (in Chinese)
- [11] PAN H, HUANG J, QIN S. High accurate estimation of relative pose of cooperative space targets based on measurement of monocular vision imaging[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(13): 3127 - 3133.
- [12] 王珂,于占海,刘宏,等. 基于立体视觉 Tri-EKF 算法的空间非合作目标运动与结构估计[J]. 宇航学报,2017,38(9): 936-945.

WANG Ke, YU Zhanhai, LIU Hong, et al. Motion and structure estimation of non-cooperative space target based on Tri – EKF algorithm and stereo vision[J]. Journal of Astronauties, 2017, 38(9):936 – 945. (in Chinese)

- [13] 刘俊. 基于单目视觉的物体位姿估计方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016. LIU Jun. Study on object pose estimation based on monocular vision[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2016. (in Chinese)
- [14] 夏庆. 非合作相对位姿测量跟踪研究及设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014. XIA Qing. Research and design of non-cooperative relative posture measurement and tracking[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2014. (in Chinese)
- [15] 郝颖明,朱枫,欧锦军,等. P3P 位姿测量方法的误差分析[J]. 计算机工程与应用,2008,44(18):239-242.
 HAO Yingming, ZHU Feng, OU Jinjun, et al. Error analysis of P3P pose estimation [J]. Computer Engineering and Applications,2008,44(18):239-242. (in Chinese)
- [16] 朱枫,郝颖明,周静,等. 合作目标姿态对视觉位姿测量精度的影响分析[J]. 仪器仪表学报,2007,28(4):130-134. ZHU Feng, HAO Yingming, ZHOU Jing, et al. Analysis of the effect of cooperative target attitude on the accuracy of visual posture measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2007,28(4):130-134. (in Chinese)
- [17] 季江徽,黄秀敏. "洞察号"启程探索火星内部世界[J]. 科学通报,2018,63(26):2678 2685.
 JI Jiangwei, HUANG Xiumin. "Insight" sets off to explore the inner world of Mars[J]. Chinese Science Bulletin,2018, 63(26):2678 2685. (in Chinese)
- [18] 李若尘,叶树霞. 一种单目物体六自由度位姿检测方法[J]. 光学与光电技术,2019,17(1):56-62.
 LI Ruochen, YE Shuxia. A monocular method of pose detection for SDOFA[J]. Optics & Optoelectronic Technology,2019, 17(1):56-62. (in Chinese)
- [19] ABDEL-AZIZ Y I, KARARA H M. Direct linear transformation from comparator coordinates intoobject space coordinates in close-range photogrammetry [C] // Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry, Falls Church, V A: American Society of Photogrammetry, 1971: 1-18.
- [20] 王青山. 一种基于 DLT 模型改进的三维相机标定算法研究[J]. 测绘与空间地理信息,2016,39(12):207-210.
 WANG Qingshan. A model based on DLT improved three-dimensional camera calibration algorithm research[J]. Geomatis & Spatial Information Technology, 2016,39(12):207-210. (in Chinese)