

摄像机内参数误差对姿态测量精度的影响分析

曾涛¹, 刘维藩²

(1. 中航飞机股份有限公司西安飞机分公司, 西安 710000; 2. 中航飞机研发中心, 西安 710000)

摘要: 为了研究摄像机内参数误差对姿态测量精度的影响, 将焦距、成像中心、畸变系数等参数作为蒙特卡罗方法的输入量, 以姿态测量成功率度量了各个输入量对姿态测量精度的影响程度, 并仿真统计了同一输入误差值在多个像面区域内产生的姿态测量误差值。仿真结果表明, 随着特征点像点偏离像面中心, 焦距误差对姿态测量结果的影响逐渐增大; 成像中心误差对姿态测量结果的影响在整个像面区域内变化不明显; 姿态测量误差随着像面区域畸变的增大而增大。因此, 在姿态测量系统中, 提高焦距与畸变系数的精度能有效改善像面边缘区域的姿态测量精度, 而整个像面区域的姿态测量精度会随着成像中心误差的减小而提高。

关键词: 姿态测量; 摄像机内参数; 蒙特卡罗; 测量精度

中图分类号: TB853.1⁺9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)03-0063-04

Effects of Camera Inner Parameter Error on Pose Measuring Precision

ZENG Tao¹, LIU Wei-fan²

(1. AVIC Aircraft Co. Ltd. Xi'an Branch, Xi'an 710000, China;

2. AVIC Aircraft Research and Development Center, Xi'an 710000, China)

Abstract: In order to investigate the influence of camera inner parameters to the measuring precision, the camera inner parameters such as focal length, imaging center and distortion coefficient were taken as input variables of the Monte Carlo Method (MCM), and success rates of pose determination was used to measure the influence degree of each input variable to the measuring precision. Statistics was made through simulation for the pose measuring errors caused by the same input error in multiple image surfaces. The simulation result shows that: 1) The impact of focus error on measuring precision increases as the imaging point of target feature deviates from the imaging center; 2) The impact of the imaging center error on the measuring precision has no obvious change in the whole image surface; and 3) The error of pose measuring increases with the distortion of image regions. Therefore, improving the precision of focal length and distortion coefficient would increase the pose measuring precision of outer imaging regions, while the measuring precision in the entire imaging surface region would be increased by decreasing the imaging center error.

Key words: pose determination; camera inner parameter; Monte Carlo Method (MCM); measuring precision

0 引言

在基于视觉的姿态测量领域, 单目姿态测量利用摄像机对目标特征点成像, 结合目标特征点的已知信息来解算目标特征点与摄像机之间的相对位置与姿态

关系。国内外很多学者都提出了基于单目视觉位姿测量的解算算法^[1-5]。在实际工程应用中, 影响姿态测量系统精度的误差源包括特征点信息误差、摄像机内参数误差、图像点坐标提取误差、测量算法误差等。文献[6-7]研究了姿态测量误差与输入参数误差的关系, 指出图像坐标误差和摄像机内参数误差是影响测量位姿误差的主要因素; 文献[8]构建了基于CMOS传感器的姿态测量系统, 试验了被测目标和亚像元图像点坐标误差等因素对定位测量精度的影响; 文献

收稿日期: 2015-03-23

修回日期: 2015-04-24

作者简介: 曾涛(1979—), 男, 安徽宿州人, 硕士, 高工, 研究方向为航空电子。

[9]证明了优化特征点尺寸能够提高测量解算准确度;文献[10]分析了6个因素对系统精度的影响程度,指出对测量精度影响最大的因素是测量距离,而解算算法不是引入误差的主要因素。但是,上述文献均没有对摄像机内参数的焦距、成像中心、畸变系数等对姿态测量系统精度的影响做详细的分析与仿真。而在图像坐标提取误差较小时,摄像机内参数的误差是直接作用在图像坐标值上,且当目标特征点与摄像机在相对不同距离或者不同角度情况下,对系统精度可能有不同程度的影响。

本文采用基于单目视觉的四元数姿态测量方法^[5],先利用蒙特卡罗误差分析方法,将摄像机内参数误差作为输入量,根据目标特征点成像分布区域,设定了10个不同的位姿,计算各个位姿处不同输入误差情况下姿态测量计算的成功率,进而探讨这些输入量对姿态测量计算成功率的影响程度。再对每个输入量设置固定误差值,且设定多个目标特征点与摄像机的相对位姿使得特征点成像在像面不同区域,分析了不同区域内输入量误差值对姿态测量精度误差值的影响。

1 姿态测量模型

姿态测量模型是基于单目视觉的四元数姿态测量方法,目标物体为一个T型四面体,4个特征点坐标为 $S_1 = (0, a, 0)$, $S_2 = (0, b, 0)$, $S_3 = (0, 0, c)$ 和 $S_4 = (d, 0, 0)$ 。四元数表达式的详细推导与姿态求解过程见文献[6]。在四元数表达式中涉及的摄像机内参数为摄像机焦距 f 以及图像像面坐标 (x_{id}, y_{id}) 。假定仅存在一个径向畸变系数,则 (x_{id}, y_{id}) 的计算式为

$$x'_{id} = (x_y - x_c) \times d_{px} \quad (1)$$

$$y'_{id} = (y_y - y_c) \times d_{py} \quad (2)$$

$$x_{id} = x'_{id} \times [1 + k \times (x_{id}^2 + y_{id}^2)] \quad (3)$$

$$y_{id} = y'_{id} \times [1 + k \times (x_{id}^2 + y_{id}^2)] \quad (4)$$

式中: (x_y, y_y) 为特征点图像坐标; (x_c, y_c) 为摄像机成像中心; (d_{px}, d_{py}) 为摄像机像元尺寸; k 为摄像机径向畸变系数。

在姿态测量模型中,输入参数有目标信息 (a, b, c, d) ,特征点图像坐标 (x_y, y_y) 与摄像机内参数 $(x_c, y_c, d_{px}, d_{py}, k)$ 。本文中假定目标特征点信息与特征点图像坐标无误差,重点分析摄像机内参数误差对姿态测量精度的影响程度。

2 基于测量成功率的仿真分析

蒙特卡罗方法能利用概率分布实现对非线性测量系统中各测量组成要素误差的分析。本文将姿态测量模型中摄像机焦距、成像中心、镜头畸变系数等误差源

作为误差分析的目标输入量 x_i ,输入量的PDF采用正态分布,即

$$F(x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x_i^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

式中, σ 为输入量 x_i 误差的方差。

建立输入量 x_i 的正态分布概率函数,产生65535个样本数据,从中抽取 $N = 1000$ 个样本值,代入到姿态测量模型中,得到姿态测量输出结果,估计出输入量 x_i 对姿态测量精度的影响。定义姿态测量成功率为理论角度与姿态测量模型计算角度的误差值在角度阈值 0.2° 范围内。

摄像机内参数和特征点 (a, b, c, d) 的理论值已知,见表1。设置摄像机与特征点之间不同的六自由度姿态,暂不考虑横滚角,见表2,序号为1的位姿处,目标特征点成像大约在像面中心区域。

表1 已知内参数与特征点信息

Table 1 Camera inner parameters and information of feature points

参数	标定值
焦距 f/mm	4.72
径向畸变系数 k/mm^{-2}	6.0×10^{-3}
成像中心 $(x_c, y_c)/\text{mm}$	(640, 512)
a/mm	-40
b/mm	40
c/mm	-69.2820
d/mm	-15

表2 测量位姿

Table 2 Different pose measurements

序号	X/mm	Y/mm	Z/mm	方位角/ $(^\circ)$	俯仰角/ $(^\circ)$
1	300	0	35	0	0
2	300	0	35	10	20
3	300	-50	35	-20	-5
4	300	50	35	-20	-5
5	300	-100	35	-10	10
6	300	100	35	-10	10
7	300	0	10	-20	-5
8	300	0	60	-20	-5
9	300	0	-40	10	20
10	300	0	110	10	20

针对焦距对姿态测量精度的影响程度,设定PDF正态分布的期望值为0,方差为0.01~0.05 mm,不同方差下各个位姿处姿态测量成功率见图1。对于序号为1~2的测量位姿,焦距误差的增大并未引起成功率的明显变化,即当成像图像位于图像中心区域附近时,焦距误差对姿态测量误差影响较小。

针对成像中心对姿态测量误差的影响分析,设定PDF正态分布的期望值为0,方差为0.5~4像素,不同方差下各个位姿处成功率见图2。当成像中心误差的

方差为 0.5 像素时,任一测量位姿处成功率均为 100%,随着成像中心误差方差值的增大,测量位姿处成功率出现不同程度的下降,且成像图像位于图像右下方区域的位姿处成功率下降程度小于成像图像位于图像左上方区域的位姿。

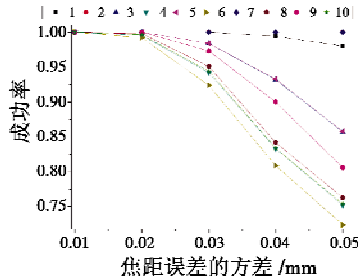


图1 成功率随焦距误差的变化图
Fig.1 Success rate vs focus error

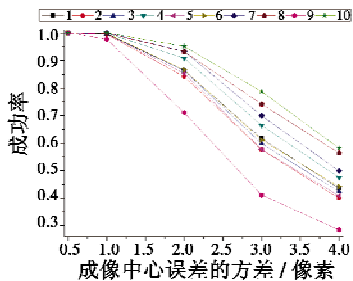


图2 成功率随成像中心误差的变化图
Fig.2 Success rate vs imaging center error

针对径向畸变系数对姿态测量精度的影响分析,设定 PDF 正态分布的期望值为 0,方差为畸变系数值的 2%~10%,不同方差下各个位姿处成功率见图 3。序号 5,6 位姿处特征点的像点比序号 3,4 位姿处特征点的像点更偏离像面中心,且随着畸变系数误差的方差值的增大,序号 5,6 位姿处的成功率也明显小于序号 3,4 位姿处的成功率。

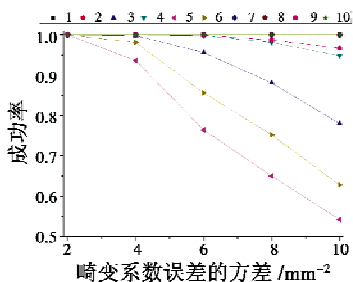


图3 成功率随畸变系数误差的变化图
Fig.3 Success rate vs distortion error

从图 1~图 3 可以看出,序号 1 位姿处特征点成像于像面中心区域,畸变系数误差对成功率的影响程度较小,序号 5 位姿处特征点成像于像面边缘处,畸变系

数误差对成功率的影响较大。对于序号 1 位姿,焦距误差与畸变系数误差对成功率的影响不明显,但是成像中心误差对成功率的影响明显。

3 基于测量误差值的仿真分析

姿态测量模型用于实际系统测量时,若系统需实现大活动范围测量,则目标特征点必然成像于像面的不同区域。为了分析不同像面区域内同一输入误差对测量误差值的影响,在不同位姿处进行了姿态测量误差值的统计分析。

当目标特征点与摄像机相对位移固定时,其相对角度在方位 $\pm 50^\circ$ 与俯仰 $\pm 50^\circ$ 的范围内,按照 5° 的间隔,设置一系列不同的姿态。在摄像机焦距、成像中心、畸变系数上增加固定大小的误差值,计算姿态测量误差值为

$$R_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i^2} \quad (6)$$

式中, $E_i = \sqrt{E_{\psi_i}^2 + E_{\theta_i}^2}$, E_{ψ_i} 与 E_{θ_i} 分别是方位角误差与俯仰角误差。

设置焦距误差值为 0.05 mm,在不同的相对位置处计算姿态测量误差值,见表 3。当目标特征点成像在像面中心区域时,比较表 3 中前 3 个位置处的姿态测量误差值可知,目标特征点与摄像机之间距离越远,像点越接近像面中心,姿态测量误差值越小。而当像点越远离像面中心时,姿态测量误差值越大。该计算结果与基于蒙特卡罗的焦距对姿态测量模型成功率的仿真分析基本一致。

表 3 焦距-姿态测量误差

Table 3 Focus - pose measuring errors

X/mm	Y/mm	Z/mm	姿态测量误差/(°)
300	0	35	0.0902
500	0	35	0.0507
700	0	35	0.0357
300	-100	35	0.1808
500	250	35	0.2501
700	-350	35	0.2568
700	350	35	0.2568

设置成像中心误差值为 $(\pm 2, \pm 2)$ 像素,在不同的相对位置处计算姿态测量误差值见表 4。可以看出,若以像面中心及误差值两点构成一条直线,该直线将像面划分为两部分,则姿态测量误差值较大的成像区域在该直线的上半部分。该计算结果进一步完善了基于蒙特卡罗的成像中心对姿态测量模型成功率的仿真分析。

表 4 不同成像中心的姿态测量误差
Table 4 Pose measuring errors of different
imaging centers

X/mm	Y/mm	Z/mm	不同成像中心的姿态测量误差/(°)			
			(2,2)	(-2,-2)	(2,-2)	(-2,2)
300	0	35	0.1410	0.1459	0.1459	0.1432
300	-100	10	0.1321	0.1323	0.1528	0.1529
300	-50	10	0.1380	0.1381	0.1496	0.1497
300	50	10	0.1497	0.1496	0.1381	0.1380
300	100	10	0.1529	0.1528	0.1323	0.1321
300	-100	60	0.1280	0.1283	0.1354	0.1356
300	-50	60	0.1304	0.1303	0.1344	0.1346
300	50	60	0.1346	0.1344	0.1303	0.1304
300	100	60	0.1356	0.1354	0.1283	0.1282

设置畸变系数误差值为畸变系数值的 10%，在不同的相对位置处计算姿态测量误差值，见表 5。一阶径向畸变是一种典型的对称型畸变，成像中心畸变小，远离成像中心的畸变大。比较位置(300 mm, ±50 mm, 35 mm)或者(300 mm, ±100 mm, 35 mm)处的姿态测量误差值，可发现两个位置处姿态测量误差值相等，且目标特征点的像点越远离成像中心，姿态测量误差值越大，这些均与对称型畸变的特点相符。

表 5 畸变系数 - 姿态测量误差

Table 5 Distortion coefficients-pose measuring errors

X/mm	Y/mm	Z/mm	姿态测量误差/(°)
300	0	35	0.0165
300	0	10	0.0160
300	0	60	0.0317
300	-50	35	0.0908
300	50	35	0.0908
300	-100	35	0.2125
300	100	35	0.2125

4 结论

本文将摄像机内参数误差作为输入量误差，采用蒙特卡罗方法统计了各个输入量误差对应的姿态测量成功率，并详细分析了当特征点成像于不同像面区域时，同一输入量误差对姿态测量精度的影响，以及同一像面区域内，不同输入量误差对姿态测量精度的影响。仿真实验验证了摄像机内参数误差对测量结果的影响，即目标特征点的像点越接近像面中心，焦距误差对姿态测量结果的影响越小，且在不同像面区域姿态测量误差值变化显著。成像中心误差对姿态测量结果的影响在整个像面区域内变化值不大。在小畸变像面区域，畸变系数误差对姿态测量结果几乎无影响，但姿态测量误差在畸变较大的像面区域会明显增大。根据这些结论，在实际位姿测量系统中，可结合特征点成像区域的应用情况，侧重于提高光轴附近的标定精度。

参考文献

- [1] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. Communications of the ACM, 1981, 24(06):381-395.
- [2] ROBERT M. HARALICK, LEE C N. Analysis and solutions of the three point perspective pose estimation problem [C]//Computer Vision and Pattern Recognition, Proceedings CVPR'91. IEEE Computer Society Conference on, 1991:29-598.
- [3] SCHWEIGHOFER G, PINZ A. Robust pose estimation from a planar target[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 2006, 28(12):2024-2030.
- [4] LEPETIT V F, MORENO N, FUA P. EPnP: an accurate O(n) solution to the PnP problem[J]. International Journal of Computer Vision, 2009, 81(2):55-166.
- [5] CHEN J, ZHANG Q, ZHANG B. A quaternion pose determination solution based on monocular vision model[C]//International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2011: Space Exploration Technologies and Applications, 819605.
- [6] 朱枫, 郝颖明. 合作目标位姿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 F, HAO Y M. The analysis of collaborative object attitude's effect on visual pose's accuracy [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(4):130-134.)
- [7] 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 Y M, ZHU F, OU J J, et al. Error analysis of P3P pose measurement[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(18):239-242.)
- [8] 曾桂英, 解源. CMOS 成像系统亚像元定位精度研究[J]. 光电工程, 2011, 7(38):69-80. (ZENG G Y, XIE Y. Sub-pixel locating accuracy for a CMOS imaging system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 7(38):69-80.)
- [9] 霍炬, 崔家山, 王伟兴. 基于共面特征点的单目视觉位姿测量误差分析[J]. 光子学报, 2014, 43(5):150-156. (HUO J, CUI J S, WANG W X. Error analysis of monocular visual position measurement based on coplanar feature points[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(5):150-156.)
- [10] 赵连军, 刘恩海. 单目三点位置测量的精度分析[J]. 光学精密工程, 2014, 22(5):1190-1196. (ZHAO L J, LIU E H. Analysis of position estimation precision by cooperative target with three feature points [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(5):1190-1196.)