

P3P 位姿测量方法的误差分析

郝颖明^{1,2}, 朱 枫¹, 欧锦军¹, 吴清潇¹, 周 静¹, 付双飞¹

HAO Ying-ming^{1,2}, ZHU Feng¹, OU Jin-jun¹, WU Qing-xiao¹, ZHOU Jing¹, FU Shuang-fei¹

1.中国科学院 沈阳自动化研究所 光电信息研究室, 沈阳 110016

2.中国科学院 研究生院, 北京 100039

1.Department of Optical-Electronics and Information Processing, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

2.Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

E-mail: ymhao@sia.cn

HAO Ying-ming, ZHU Feng, OU Jin-jun, et al. Error analysis of P3P pose estimation. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(18): 239-242.

Abstract: In this paper, from the view of engineering application, under the condition that three control points formed an isosceles triangle, the relationship is studied between the error of P3P pose estimation methods and the input parameters. Firstly, the relationship can be obtained by theoretical deduction. After that, through error statistical analysis and direct simulation validation, the following conclusion can be gotten. In the input parameter errors, the error of image coordinates and the calibration error of camera intrinsic parameters have more influence on the error of final pose estimation than the metrical error of objective model, which can be negligible. This conclusion is significant for the design and realization of pose estimation system.

Key words: pose estimation; error analysis; P3P

摘 要: 从工程应用的角度出发, 在三个控制点构成等腰三角形的条件下, 研究 P3P 位姿测量方法的误差与输入参数误差的关系。首先在理论上推导出测量位姿误差与输入参数误差间的关系, 在此基础上通过误差统计分析和直接仿真验证的方式得到在输入误差中, 图像坐标的检测误差和像机内参数标定误差对测量位姿误差的影响较大, 而目标模型的测量误差对测量位姿误差的影响可以忽略不计的结论。这对位姿测量系统的设计与实现具有一定的指导意义。

关键词: 位姿测量; 误差分析; P3P

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2008.18.075 文章编号: 1002-8331(2008)18-0239-04 文献标识码: A 中图分类号: TP391.4

1 引言

三维位姿测量指求解两个坐标系间的三维位姿关系, 包括三个平移量(t_x, t_y, t_z)和分别绕三个坐标轴的旋转量(α, β, γ)。在视觉位姿测量领域, 基于点特征的单目位姿测量以其结构简单、易于实现等特点成为研究热点之一。该方法通过控制点间位置关系的约束来求解观察目标与摄像机间的相对位置和相对姿态。M.A.Fishler and R.C.Bolles 在 1981 年将其定义为 n 点透视问题(Perspective- n -Point Problem, 简称 PnP 问题)^[1], 从此引起了极大的关注, 特别是对控制点最少的 P3P 问题。由于 P3P 问题存在多解、算法复杂性高和鲁棒性差等问题, 长期以来, 专家学者们都试图从纯数学的角度出发研究 P3P 问题如何求解和在什么情况下有多少个解^[2-3], 这些研究对实际工程应用的指导意义并不大。而对于 P3P 问题测量精度和鲁棒性的研究

尚停留在采用多个特征点来进行迭代运算, 在迭代过程中运用一些优化策略的鲁棒估计阶段^[4-5]。

中科院沈阳自动化所从工程应用的角度出发, 开展 P3P 问题的相关研究, 并取得了很好的研究成果。2002 年, 郝颖明等提出了 P3P 问题的迭代求解方法^[6]。2003 年, 周鑫等人证明了当三个特征点为等腰三角形, 且特征点与摄像机间满足某些约束条件时, P3P 问题具有唯一解^[7]。2005 年, 这些研究成果被用于水下机器人的悬停定位^[8]。2007 年朱枫等人分析了俯仰角对位姿测量精度的影响, 得到了当合作目标构成的三角形所在平面与摄像机像平面垂直时测量精度最高, 当两个平面平行时测量精度最差的结论^[9]。同年郝颖明等分析了测量系统参数对 P3P 问题鲁棒性的影响, 得到了测量位姿鲁棒性与摄像机内参数、目标模型参数及测量距离等参数间的关系。但前面的分析都是

基金项目: 国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60705011)。

作者简介: 郝颖明(1966-), 女, 硕士, 副研, 研究方向: 图像处理、计算机视觉、三维测量; 朱枫(1962-), 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 视觉理论、视觉应用系统; 欧锦军(1975-), 男, 硕士, 副研, 研究方向: 计算机视觉、工业检测; 吴清潇(1978-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 计算机视觉、工业检测; 周静(1975-), 女, 博士生, 研究方向: 摄像机标定、三维建模; 付双飞(1980-), 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 计算机软件、视景仿真。

收稿日期: 2008-01-07 修回日期: 2008-03-31

在仅考虑图像坐标的检测误差的前提下进行的。

本文仍旧从实际工程应用出发,直接利用文献[7]的结论,仅在 P3P 问题有唯一解即三个特征点为等腰三角形的前提下,讨论 P3P 问题的测量精度,重点分析各种输入参数误差对位姿测量结果误差的影响。同时针对多数实际工程应用只关心最大误差而不关心平均误差的特点,仅分析测量系统的最大误差。

2 测量位姿误差与输入参数误差

单目视觉位姿测量系统常常将摄像机固定在一个物体上,而将由三个控制点组成的观察目标固定在另外一个物体上,由于摄像机和观察目标在两个物体上的位置和姿态固定,只要测量出摄像机坐标系与观察目标坐标系间的相对位姿关系,就可以计算出两个物体间的相对位姿关系。因此,本文仅分析摄像机坐标系与观察目标坐标系间的 6 个相对位姿量的误差。设观察目标上的三个控制点在目标坐标系下的坐标为 $p_0=(x_0, y_0, z_0)^T$,在摄像机坐标系下的坐标为 $p_i=(x_i, y_i, z_i)^T$,其中 $i=1\sim3$,则有:

$$p_0=Rp_i+T \quad (1)$$

其中, $T=[t_x, t_y, t_z]^T$, R 可以分解为姿态角 (a_x, a_y, a_z) ,当旋转顺序为 z, y, x 时,有:

$$R=R_z R_y R_x = \begin{bmatrix} \cos a_z & -\sin a_z & 0 \\ \sin a_z & \cos a_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos a_y & 0 & \sin a_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin a_y & 0 & \cos a_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos a_x & -\sin a_x \\ 0 & \sin a_x & \cos a_x \end{bmatrix} \quad (2)$$

因此,只要求出三个控制点在摄像机坐标系下的坐标,就可以计算出摄像机坐标系与目标坐标系间的相对位姿关系。

设目标模型的三个控制点构成等腰三角形(如图 1 所示),目标坐标系的 XOY 平面为三角形所在平面,其坐标原点取在三角形顶角到底边垂线与底边的交点上,高线为 X 轴,正方向由顶角指向底边,底边为 Y 轴,正方向从左向右, Z 轴满足右手定则。设顶角为 P_1 , P_2, P_3 分别在 Y 轴的负方向和正方向,三角形的高为 a ,底边长度为 $2b$,则有:

$$\begin{bmatrix} x_{01} \\ y_{01} \\ z_{01} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} x_{02} \\ y_{02} \\ z_{02} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -b \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} x_{03} \\ y_{03} \\ z_{03} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ b \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

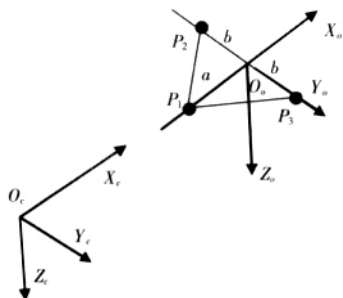


图1 坐标系的定义

设像机坐标系原点为像机光心,光轴为 X 轴, Y 轴与图像坐标系 U 轴平行, Z 轴与图像坐标系 V 轴平行。则当旋转顺序为 z, y, x 时,有:

$$\begin{cases} (u_1 - u_0)(t_x - a \cos a_z \cos a_y)/f_u = t_y - a \sin a_z \cos a_y \\ (v_1 - v_0)(t_x - a \cos a_z \cos a_y)/f_v = t_z + a \sin a_z \\ (u_2 - u_0)(t_x - b \cos a_z \sin a_y \sin a_x + b \sin a_z \cos a_x)/f_u = \\ \quad t_y - b \sin a_z \sin a_y \sin a_x - b \cos a_z \cos a_x \\ (v_2 - v_0)(t_x - b \cos a_z \sin a_y \sin a_x + b \sin a_z \cos a_x)/f_v = t_z - b \cos a_z \sin a_x \\ (u_3 - u_0)(t_x + b \cos a_z \sin a_y \sin a_x - b \sin a_z \cos a_x)/f_u = \\ \quad t_y + b \sin a_z \sin a_y \sin a_x + b \cos a_z \cos a_x \\ (v_3 - v_0)(t_x + b \cos a_z \sin a_y \sin a_x - b \sin a_z \cos a_x)/f_v = t_z + b \cos a_z \sin a_x \end{cases} \quad (4)$$

式(4)表示了相对位姿 $N=(t_x, t_y, t_z, a_x, a_y, a_z)^T$ 与目标模型参数 $M_0=[a, b]^T$ 、像机内参数 $C_{in}=[f_u, f_v, u_0, v_0]^T$ 、控制点图像坐标 $I=[u_1, v_1, u_2, v_2, u_3, v_3]^T$ 间的关系。其中,相对位姿 N 为待求参数,控制点图像坐标 I 、像机内参数 C_{in} 、目标模型参数 M_0 为输入参数。该方程组共有 6 个未知数, 6 个方程,可以求解。但由于方程组的非线性,其解无法写成解析式。为分析测量位姿的误差,将式(4)简记为:

$$F=[F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6]^T=0 \quad (5)$$

对上式进行泰勒级数展开并忽略高次项,设 $DI=(du_1, dv_1, du_2, dv_2, du_3, dv_3)^T$, $DC_{in}=(du_0, dv_0, df_u, df_v)^T$, $DM_0=(da, db)^T$, $DN=(dt_x, dt_y, dt_z, da_x, da_y, da_z)^T$, 则有:

$$DN = - \left[\frac{\partial F}{\partial N} \right]^{-1} \times \left(\frac{\partial F}{\partial I} \times DI + \frac{\partial F}{\partial C_{in}} \times DC_{in} + \frac{\partial F}{\partial M_0} \times DM_0 \right) \quad (6)$$

式(6)给出了位姿参数的误差 DN 与图像坐标检测误差 DI 、像机标定误差 DC_{in} 、目标模型测量误差 DM_0 三类输入误差的关系。由于 F 是像机内参数 C_{in} 、目标模型参数 M_0 、控制点图像坐标 I 和相对位姿 N 的函数,而 I 可以由 N 、 C_{in} 和 M_0 来求得,因此,相对位姿的误差 DN 除了与输入参数误差 DI 、 DC_{in} 、 DM_0 有关外,还与像机内参数 C_{in} 、目标模型参数 M_0 以及位姿量 N 有关。

3 各输入参数误差的影响比较

理论上,只要将式(6)写成解析式,就可以直接利用该式分析各输入参数误差对 6 个测量位姿量误差的影响。但由于相对位姿的误差 DN 与输入参数误差 DI 、 DC_{in} 、 DM_0 的关系是像机内参数 C_{in} 、目标模型参数 M_0 以及位姿量 N 的函数,式(6)写成的解析表达式非常复杂,很难根据公式直接分析出误差的变化规律。为此,本文采用统计分析的方式来获得测量位姿误差的变化规律。即给定像机内参数 C_{in} 、目标模型参数 M_0 以及输入参数误差 DI 、 DC_{in} 、 DM_0 ,则可以求出任意理想位姿下的测量位姿误差,在一定的位姿变化范围内进行大量的数据统计,就可以得到不同输入参数误差对测量位姿误差 DN 的影响规律。

统计实验中,设目标模型为 $M_0=[300 \text{ mm } 400 \text{ mm}]$,像机视场角为 $20^\circ \times 20^\circ$,分辨率为 512×512 像素,则像机内参数 $C_{in}=[256, 256, 1, 451, 1, 451]^T$ 。由于三类输入参数误差的量纲不同,其误差大小也不同,如果不考虑量纲的因素直接进行比较,结果没有任何参考价值,因此,首先必须保证三类输入误差是在同等当量的前提下进行比较。为此,根据三类输入参数误差在实际测量系统中的具体情况,以其实际误差的经验值作为基准进行比较。在实际测量系统中,图像坐标检测误差可以限制在 ± 0.25 像素内,像机焦比误差可以限制在 $\pm 5\%$ 内,主点坐标误差可限制在 $\pm 2.5\%$ 像素内,而目标模型的测量误差则可以限制在 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 范围内。这样,设图像坐标的检测误差最大值为 $duv_{\max}=0.25$,像机焦比误差最大值为 $fuv_{\max}=7.255$,主点坐标误差的最大值为 $duv0_{\max}=12.8$,目标模型测量误差的最大值为 $dab_{\max}=$

0.1 mm。当输入参数误差都取最大值时,各位姿处测量位姿误差也取得最大值,为分析方便,将像机内参数标定误差分解为焦距误差与主点坐标误差两部分。此时,式(6)表示为:

$$DN_{\text{mek}} = \left[\frac{\partial F}{\partial N} \right]^{-1} \times \frac{\partial F}{\partial l} \times DI_{\text{mek}} + \frac{\partial F}{\partial C_{\text{fuv}}} \times DC_{\text{fuvmek}} + \frac{\partial F}{\partial C_{\text{u0}}} \times DC_{\text{u0mek}} + \frac{\partial F}{\partial M_0} \times DM_{0\text{mek}} = DN_{\text{fuvmek}} + DN_{\text{u0mek}} + DN_{\text{abmek}} \quad (7)$$

其中: $DI_{\text{mek}} = [du_{1\text{mek}}, dv_{1\text{mek}}, du_{2\text{mek}}, dv_{2\text{mek}}, du_{3\text{mek}}, dv_{3\text{mek}}]^T = [0.25, 0.25, 0.25, 0.25, 0.25, 0.25]^T$ $DC_{\text{fuvmek}} = [df_{\text{fuvmek}}, df_{\text{vuvmek}}]^T = [7.225, 7.225]^T$ $DC_{\text{u0mek}} = [du_{0\text{mek}}, dv_{0\text{mek}}]^T = [12.8, 12.8]^T$ $DM_{0\text{mek}} = [da_{\text{mek}}, db_{\text{mek}}]^T = [0.1, 0.1]^T$ 。

统计实验中,对每个理想位姿,分别计算出由图像坐标检测误差引起的测量位姿误差 DN_{fuvmek} ,由像机焦距误差引起的测量位姿误差 DN_{u0mek} ,由像机主点坐标误差引起的测量位姿误差 DN_{abmek} ,由目标模型测量误差引起的测量位姿误差 DN_{abmek} ,并将位置误差用绝对误差与光轴方向的平移量的相对值来表示,姿态角误差用绝对误差表示,各位姿量的误差最大值记为: $(|dt_x/t_x|_{\text{mek}}, |dt_y/t_y|_{\text{mek}}, |dt_z/t_z|_{\text{mek}}, |da_{\text{mek}}|, |db_{\text{mek}}|, |da_{\text{mek}}|, |db_{\text{mek}}|)$ 。设初始姿态角都为 0° ,变化范围为 $\pm 6^\circ$,测量距离 t_x 的变化范围为 3~12 m, t_y 的变化范围为目标满视场。将测量距离平均分为 10 段,对每个距离段,在 t_x 方向变化 3 次, t_y 方向各变化 5 次,每个姿态角变化 5 次,得到 9 375 组位姿误差数据,对于不同的位姿量,分别计算所有测量结果中误差绝对值的最大值,得到各距离段、各输入参数误差引起的各位姿量误差的最大值。图 2 给出了统计实验结果,其中横坐标为测量距离,单位为 m,纵坐标为各测量位姿量的最大误差。

根据图 2 的统计实验结果,可以得到各输入参数误差对测量位姿误差的影响具有如下规律:

(1) 图像坐标检测误差所引起的位姿量误差明显随着测量距离的增大而增大,其它参数误差所引起的位姿量误差与测量

距离的关系不大,有的甚至与测量距离无关。

(2) 所有位姿量误差受目标模型测量误差的影响都很小,几乎可以忽略不计。

(3) $|dt_x/t_x|_{\text{mek}}$ 主要受像机焦距误差和图像坐标检测误差的影响,在近距离,受图像坐标检测误差的影响要小于受像机焦距误差的影响,在远距离则相反。

(4) $|dt_x/t_x|_{\text{mek}}, |dt_y/t_y|_{\text{mek}}$ 受像机主点坐标误差的影响远大于受其它输入参数误差的影响。

(5) $|da_{\text{mek}}|$ 受输入参数误差影响从大到小的顺序依次为:图像坐标、主点坐标、焦距、目标模型。其中由图像坐标检测误差对 $|da_{\text{mek}}|$ 的影响要远大于其它三类输入误差的影响,特别是在远距离。

(6) $|da_{\text{mek}}|, |db_{\text{mek}}|$ 受 4 类输入参数误差影响的规律相同,图像坐标检测误差和像机主点坐标误差是影响 $|da_{\text{mek}}|, |db_{\text{mek}}|$ 的主要因素。当测量距离较远时,图像坐标检测误差的影响大于主点坐标的影响,当测量距离较近时则相反。

4 直接仿真实验结果

前面从误差理论的角度分析了输入参数对测量位姿误差的影响规律,为验证分析结果的正确性,这里直接利用 P3P 算法进行了误差仿真实验。实验中像机参数、目标模型参数、相对位置和相对姿态的变化范围都与上章完全相同,输入参数误差范围也相同,只是在图像检测误差的模拟上采用 ± 0.25 像素的量化误差。实验中,首先根据系统参数和相对位姿计算出各控制点的理想图像坐标,对图像坐标检测误差直接按 0.25 像素的量化范围进行量化,得到图像坐标的实际值,对其它种类的输入误差,以理想图像坐标作为实际图像坐标,分别按加入的输入参数误差用 P3P 方法计算出测量位姿,测量位姿与理想位姿的差值即为位姿误差。为比较各类输入参数的影响,每次仅

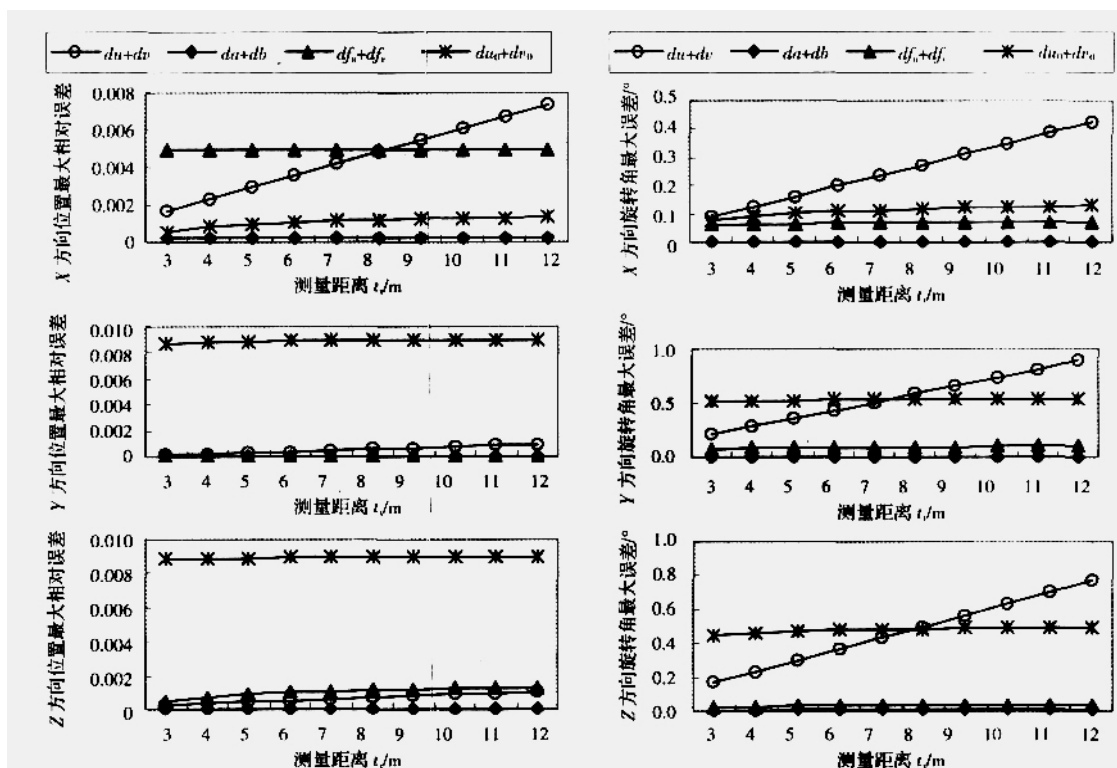


图2 一般情况下的统计分析结果

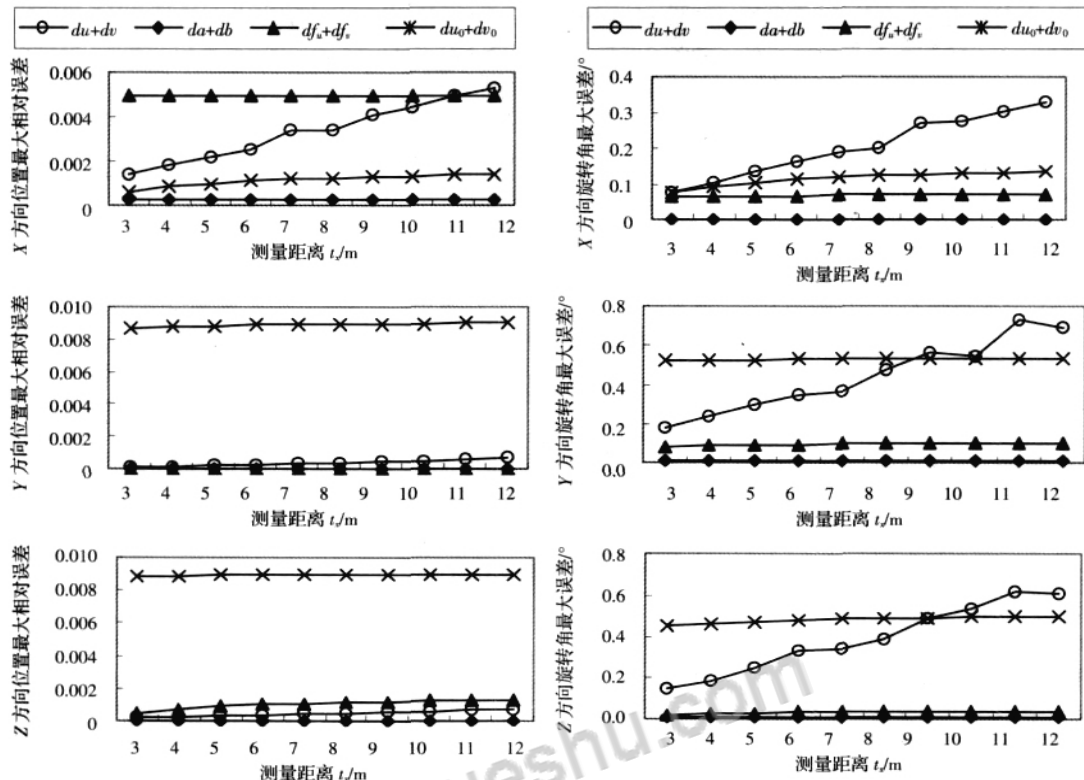


图3 直接仿真实验结果

加入一类输入参数的误差,对各类输入参数误差分别统计。对于目标模型测量误差、焦比误差和主点坐标误差的影响,由于输入参数误差的正、负组合,统计数据量是前1章的4倍。对图像坐标检测误差,由于量化误差的随机性,必须经过大量的统计数据才能得到,因此对每个距离段采用30~375组位姿数据进行统计。图3分别给出了对6个位姿量在不同条件下的仿真实验结果,其中横坐标为测量距离 t_x ,单位为m,纵坐标为各位姿量的最大误差。比较图2和图3可以看出,两者变化规律完全相同,只是直接仿真实验中,变化曲线没有误差分析统计实验中那样规整。

5 结束语

本文从实际工程应用出发,分析了当3个控制点构成等腰三角形时各类输入误差对P3P方法测量位姿误差的影响。通过对误差分析统计实验和直接仿真实验验证,得到了图像坐标检测误差和像机内参数标定误差是影响测量位姿误差的主要因素,而目标模型测量误差对测量位姿的影响几乎可以忽略不计,像机主点坐标误差对 $|dt/t_{x|_{\max}}|$ 、 $|dt/t_{y|_{\max}}|$ 的影响远远大于其它输入误差的影响,而其余位姿量误差在远距离主要受图像坐标检测误差的影响,而在近距离主要受像机内参数标定误差的影响。

根据这些结论,在实际位姿测量系统中,应该从提高图像坐标的检测误差和像机内参数标定误差两个方面来提高测量位姿的精度,而在像机内参数标定中,更应侧重于提高主点坐标的标定精度。

参考文献:

- [1] Fishler 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(6): 381-395.
- [2] Haralick R M, Lee C, Ottenberg K, et al. Analysis and solutions of the three point perspective pose estimation problem[C]//Proc of the Int Conf on Computer Vision and Pattern Recognition, 1991: 592-598.
- [3] Gao X S, Hou X R, Tang J L, et al. Complete solutions classification for the perspective-three-point problem[C]//MM- preprint, MM-RC 2001, 20: 23-47.
- [4] Haralick R M, Joo H, Lee C N, et al. Pose estimation from corresponding point data[J]. IEEE Trans on System, Man and Cybernetics, 1989, 19(6): 1426-1445.
- [5] Zhang Xin-hua, Huang Yan. Robust 3D-3D pose estimation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(8): 818-824.
- [6] 郝颖明, 朱枫, 欧锦军. 目标位姿测量中的三维视觉方法[J]. 中国图象图形学报, 2002, 7(12): 1247-1251.
- [7] 周鑫, 朱枫. 关于P3P问题解的唯一性条件的几点讨论[J]. 计算机学报, 2003, 26(12): 1696-1701.
- [8] 吴清潇, 李硕, 郝颖明, 等. 基于模型的水下机器人视觉悬停定位技术[J]. 高技术通讯, 2005, 15(10): 27-32.
- [9] 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)增刊: 130-134.
- [10] Hao Ying-ming, Zhu Feng, Ou Jin-jun, et al. Robust analysis of P3P pose estimation[C]//IEEE Robio 2007, Sanya, China, 2007: 222-226.



知网查重限时 7折 最高可优惠 120元

本科定稿，硕博定稿，查重结果与学校一致

立即检测

免费论文查重: <http://www.paperyy.com>

3亿免费文献下载: <http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重: http://www.paperyy.com/reduce_repetition

PPT免费模版下载: <http://ppt.ixueshu.com>

阅读此文的还阅读了:

1. [电工测量误差及消除方法](#)
2. [对测量水表误差方法的分析](#)
3. [电子信号频率测量方法误差分析](#)
4. [并联Stewart机构位姿误差分析](#)
5. [电阻的测量方法和误差分析](#)
6. [GPS测量误差的削弱方法](#)
7. [浅谈沉降测量中的误差分析及其控制误差方法](#)
8. [P2P流的测量与识别方法研究](#)
9. [煤矿贯通测量误差与分析](#)
10. [噪声系数的测量方法及测量误差分析](#)
11. [电子测量误差的分析与减小方法](#)
12. [GPS测量误差来源及削弱方法](#)
13. [GPS测量的误差分析](#)
14. [二等水准测量误差分析及消除方法刍议](#)
15. [电阻的测量方法和误差分析](#)
16. [P2P流量识别方法的分析研究](#)
17. [电工仪表的测量误差及其消除方法分析](#)
18. [水准测量误差分析及控制方法](#)
19. [水准测量的误差来源及消减方法分析](#)
20. [一种新型3-PRS并联机构的位姿误差分析](#)
21. [P2P直播系统及P2P直播方法](#)
22. [水文测量误差的相关分析](#)
23. [横滚角对P3P位姿测量方法鲁棒性的影响分析](#)
24. [P3P位姿测量方法的误差分析](#)
25. [不同测绘方法在地形测量的误差及消除对策分析](#)

- [26. 目标动态位姿激光跟踪测量方法研究](#)
- [27. 减小仪表测量误差的方法](#)
- [28. 四坐标位姿测量仪设计研究与误差分析](#)
- [29. 低电阻的测量方法及误差分析](#)
- [30. 一种单目视觉位姿测量系统的误差分析方法](#)
- [31. 探究二等水准测量误差分析及消除方法](#)
- [32. 齿向误差的测量方法及误差分析](#)
- [33. 误差分析在测量中应用](#)
- [34. 偏航角对P3P位姿测量鲁棒性的影响分析](#)
- [35. 高程测量的误差分析与控制方法](#)
- [36. 水准测量误差及减弱其误差的方法](#)
- [37. 三坐标测量机测量误差分析及补偿方法](#)
- [38. 测量误差分析](#)
- [39. GPS测量误差的削弱方法](#)
- [40. P2P网络电视拓扑测量方法研究与特性分析](#)
- [41. 工程测量中三角高程测量的误差分析及解决方法](#)
- [42. 测量系统中的误差分析及解决方法](#)
- [43. 哪一种测量方法误差小](#)
- [44. 偏航角对P3P位姿测量鲁棒性的影响分析](#)
- [45. 水准测量误差及减弱其误差的方法](#)
- [46. 机器人的空间位姿误差分析方法](#)
- [47. 三角高程测量方法及误差分析](#)
- [48. 圆度误差测量方法解析](#)
- [49. 时间间隔测量方法及误差分析](#)
- [50. 分析GPS测量误差的因素](#)