

文章编号:1002-2082(2019)01-0079-07

一种单目视觉位姿测量系统的误差分析方法

郝仁杰,王中宇,李亚茹

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院,北京 100191)

摘要:针对单目视觉位姿测量传统误差分析方法中只考虑单一误差因素,分析结果与工程实际有较大差异的问题,提出一种考虑多误差因素共同作用的误差分析方法。根据单目视觉系统的测量范围和相机参数建立其位姿测量模型;综合考虑相机内参、镜头畸变、图像点、靶标三维点等误差因素,将其同时引入位姿测量模型进行分析;分析抑制不同参数误差及提高相机分辨率等在多误差因素共同作用下对位姿测量结果的影响,找到最有效的精度优化方法。采用小型机械臂手眼定位中的单目视觉位姿测量系统进行实验,结果表明通过抑制相机径向畸变误差和提高相机分辨率,能够有效地提升该系统的位姿测量精度,位姿精度分别提升6.57%、4.21%和5.88%、5.54%。

关键词:单目视觉;位姿测量;误差分析;精度优化

中图分类号:TN206;TB92

文献标志码:A

DOI:10.5768/JAO201940.0103001

Error analysis method for monocular vision pose measurement system

HAO Renjie, WANG Zhongyu, LI Yaru

(School of Instrumentation Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The traditional error analysis of monocular vision pose measurement only considers a single error factor, which causing the problem that there is a large difference from the actual project. An error analysis method considering multiple error factors was proposed. Firstly, a pose estimation model for monocular vision was established based on the measurement range and camera parameter. Secondly, the camera internal error, lens distortion error, image points detection error and target error were introduced into the measurement model simultaneously based on actual error levels. Finally, the influence of suppressing parameter errors, improving camera resolution on the pose measurement results were obtained, and the most effective precision optimization method was found. In addition, a monocular vision pose measurement system for small manipulator hand-eye location was adopted for experiment. The analysis results indicate that reducing the radial distortion error and improving the camera resolution can effectively improve both the position and attitude measurement accuracy of this system. The pose accuracy is increased by 6.57%, 4.21% and 5.88%, 5.54%, respectively.

Key words: monocular vision; pose measurement; error analysis; accuracy optimization

引言

单目视觉位姿测量是通过单个摄像机拍摄目标

图像,求解出目标坐标系与摄像机坐标系之间的位置和姿态关系。基于点特征的单目位姿测量是利用

收稿日期:2018-06-19; 修回日期:2018-08-16

基金项目:北京市自然科学基金(3172020)

作者简介:郝仁杰(1993—),男,硕士研究生,主要从事视觉测量和计算机视觉方面研究。

E-mail:18811396410@163.com

通信作者:王中宇(1963—),男,教授,主要从事光机电一体化技术与仪器研究。E-mail:mewan@buaa.edu.cn

多个控制点之间的约束,求解出2个坐标系之间的位姿关系,一般称为 PNP 问题(perspective-n-point problem)^[1]。使用不同的 N 个控制点求解 PNP 问题可以使用不同的方法,且当 N 较小时会出现多解问题。例如文献[1]指出最少需要使用3个控制点来求解 PNP 问题,且 P3P 问题最多有4组解。针对 P3P 问题,周鑫等人^[2]提出了当3个特征点构成等腰三角形时,将摄像机布置在空间中的一些区域内,可以获得唯一解。此外当使用大于或者等于4个控制点时,PNP 问题可以获得唯一解^[3-6]。

单目视觉位姿测量系统的精度受许多因素影响,例如输入参数误差、测量距离和控制点设置等,国内外学者在这方面做了大量的研究。Kamgar-Parsi^[7]分析了摄像机内部参数误差、投影矩阵误差和图像坐标误差之间的关系。霍炬等人^[8]研究了特征标靶布局对位姿测量精度的影响。周静等人^[9]分析了不考虑镜头畸变情况下摄像机标定参数误差与位姿测量精度之间的关系。郝颖明等人^[10]将输入参数分为目标模型的测量误差、焦比误差和主点坐标误差3类,研究了每类误差和测量距离对位姿测量误差的影响。

上述研究都是在只有某一个或某一类参数存在误差,其余参数均为理想无误差的情况下进行的。在工程实际中,各个输入参数都无法避免地存在着误差,且它们之间存在非线性的相互影响,因此如果只分析一个或一类参数的误差,结果就很可能与实际情况有比较大的差异。此外,为了简化模型,也没有考虑镜头畸变误差的影响,更没有研究其他常用精度优化方法例如提高相机分辨率、改变特征点配置等对系统精度的提高效果,因此无法给出一个定量的方法来对位姿测量系统的精度进行进一步的优化。

针对以上问题,为了充分考虑不同误差因素之间的相互作用,同时研究常用精度优化方法对位姿测量精度的提高效果,本文从工程实际出发,在基于 EPNP 法(efficient PNP)^[11]进行单目视觉位姿测量的基础上,提出了一种针对单目视觉位姿测量系统的误差分析方法。理论上研究了在尽可能多误差因素共同作用的情况下,影响位姿测量精度的主要因素;通过仿真实验分析了不同优化方法对位姿测量误差的影响,并得到了不同方法优化单目视觉位姿测量系统使测量精度提高的上限。该误差分析方法与传统的方法相比较,更

全面地考虑了影响测量结果的多种复杂误差因素,并且兼顾了不同误差之间的相互影响,使得分析结果更加接近工程实际;同时能够分析常用的精度优化方法对测量结果的影响。因此其分析结果有助于指导通过选择合适的方法来达到优化系统位姿测量精度的目的。

1 基于点特征的单目位姿测量模型

基于点特征进行单目视觉位姿测量即求解 PNP 问题,需要获得特征点在目标坐标系下的坐标及其所成像点在摄像机坐标系下的坐标。通过相机获得的图像是二维的,且像点在图像坐标系下是以像素为单位的。设像点的坐标为 (u_i, v_i) 。为了将图像平面中以像素为单位的特征点二维坐标转换为摄像机坐标系下以 mm 为单位的三维坐标,需要通过摄像机标定获得主点的坐标 (u_0, v_0) 和焦比 f_u, f_v ,通过(1)式求出摄像机坐标系下的坐标 (X_{ci}, Y_{ci}, Z_{ci}) :

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{ci} \\ Y_{ci} \\ Z_{ci} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

由于相机镜头的制造精度以及安装工艺等原因会导致原始图像的失真,由此产生的畸变会使三维点经过投影后在图像平面中成的像点偏离理想位置,故需要对图像进行畸变校正。镜头的畸变分为径向畸变和切向畸变两大类,可以分别用 k_1, k_2 和 p_1, p_2 作为参数进行描述。摄像机坐标系下特征点的理想成像位置 (X_{ci}, Y_{ci}, Z_{ci}) 与受畸变影响后的实际成像位置 $(X'_{ci}, Y'_{ci}, Z'_{ci})$ 之间的关系^[12]如(2)式所示:

$$\begin{cases} X'_{ci} = X_{ci}(1 + k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4) + p_1(r_i^2 + 2X_{ci}^2) + 2p_2 X_{ci} Y_{ci} \\ Y'_{ci} = Y_{ci}(1 + k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4) + 2p_1 X_{ci} Y_{ci} + p_2(r_i^2 + 2Y_{ci}^2) \\ Z'_{ci} = Z_{ci} \end{cases} \quad (2)$$

式中 $r_i = \sqrt{x_{ci}^2 + y_{ci}^2}$ 。

使用经过畸变校正后的像点坐标和其所对应的目标坐标系下的三维坐标,就可以基于 PNP 方法求解出位姿。这里使用的 EPNP 法是一种非迭代的高效 PNP 问题求解方法,由于其拥有较好的

实时性和较高的精度,已经广泛地应用于位姿实时测量和即时定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, 简称为 SLAM) 等领域^[13]。该方法将任意一个特征点用新的 4 个控制点表示,通过非迭代方法求得新的 4 个控制点在目标坐标系下的坐标 c_i^w 和摄像机坐标系下的坐标 c_i^c ,进而求解出 2 个坐标系之间的位姿为

$$c_i^c = \mathbf{R}c_i^w + \mathbf{T} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{R}$ 为 2 个坐标系之间的旋转矩阵; $\mathbf{T}$ 为 2 个坐标系之间的平移矢量。

考虑到 P3P 问题的多解性,为了利用尽量少的控制点来实现测量,本文主要研究基于正方形分布的 4 个共面特征点 $P_i (i=1,2,3,4)$ 求解位姿的 P4P 问题,如图 1 所示。这样能够保证位姿测量具有唯一解,且在 4 个特征点中有一个被遮挡时,仍然能够利用剩余 3 个等腰三角形分布的特征点求出位姿的唯一解。

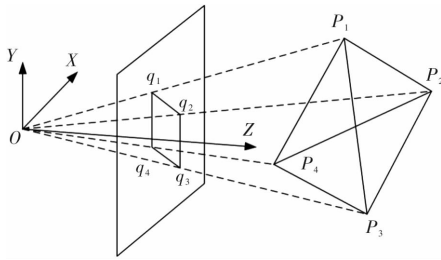


图 1 P4P 位姿测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of P4P pose measurement

2 影响位姿测量精度的因素分析

由测量过程可知,单目视觉位姿测量的输入参数主要包括特征点在目标坐标系下的三维坐标 (X_{ui}, Y_{ui}, Z_{ui}) 、图像坐标系下所成像点的坐标 (u_i, v_i) 、主点坐标 (u_0, v_0) 、焦比 f_u, f_v 以及镜头的畸变参数 k_1, k_2, p_1, p_2 等。其中 (X_{ui}, Y_{ui}, Z_{ui}) 是通过人为设置并经过高精度测量仪器测量得到的; (u_i, v_i) 是通过图像处理算法在拍摄的图像上提取出来的;主点坐标 (u_0, v_0) 、焦比 f_u, f_v 以及镜头畸变参数 k_1, k_2, p_1, p_2 等则是通过摄像机标定获得的参数。显然,这些输入参数不可避免地存在着误差,它们都会对位姿测量的精度产生影响。

摄像机的分辨率、相邻特征点在图像平面所成像点之间的距离,以及特征点在图像平面中成像位置的分布等,在输入参数均为理想无误差的情况下,对测量精度没有影响;但在输入参数误差不可避免

的情况下,也会对位姿测量的精度产生影响。

摄像机分辨率是用于成像的单目相机中的重要参数。在成像 CCD 物理尺寸大小不变的前提下,分辨率越大,则单位面积上像素点的个数越多,单个像素的实际物理尺寸 dX 和 dY 也就越小。焦比与单个像素的实际物理尺寸之间的关系如(4)式所示:

$$\begin{cases} f_u = f/dX \\ f_v = f/dY \end{cases} \quad (4)$$

式中 f 为摄像机镜头与 CCD 之间的距离,是一个固定值。可以看出,焦比 f_u, f_v 越大,则分辨率越大;主点位于图像中心附近,则分辨率越大,主点坐标也越大。因此在输入参数存在误差时,相机分辨率的改变会使模型输入参数的真值发生变化,从而对位姿测量精度产生影响。

相邻特征点在图像平面所成像点的间距主要受测量距离和特征点实际间距的影响。根据透视投影原理,在其他条件不变的情况下,测量距离 T_z 越大或特征点的实际间距越小,相邻特征点所成像点的间距就越小,如图 2 所示。当相邻特征点所成像点的间距不同时,图像坐标提取误差对像点之间相对位置的影响占比不同,畸变误差的影响大小也不同,因此会影响位姿测量的精度。

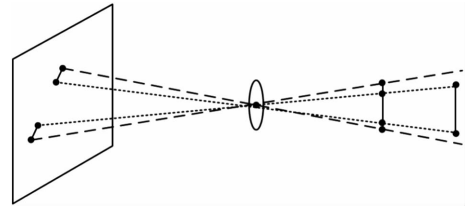


图 2 透视投影原理图

Fig. 2 Schematic diagram of perspective projection

特征点在图像平面成像位置的分布,可以通过改变 2 个坐标系之间的平移向量真值 $\mathbf{T}$ 中 x 和 y 方向分量 T_x 及 T_y 的大小来改变。 T_x 和 T_y 的改变会影响特征点在图像平面中成像的位置及像点与图像中心之间的距离,即畸变模型中 r_i 的大小。如(5)式所示,当畸变参数存在误差时, r_i 的改变将影响畸变校正后图像点误差 dX'_a 和 dY'_a 的大小,从而影响最终位姿测量的精度。

$$\begin{cases} dX'_a = X_a(1 + dk_1 r_i^2 + dk_2 r_i^4) + \\ \quad dp_1(r_i^2 + 2X_a^2) + 2dp_2 X_a Y_a \\ dY'_a = Y_a(1 + dk_1 r_i^2 + dk_2 r_i^4) + \\ \quad 2dp_1 X_a Y_a + dp_2(r_i^2 + 2Y_a^2) \end{cases} \quad (5)$$

3 测量系统误差分析

3.1 仿真模型建立

根据所研究系统的实际情况,建立单目视觉位姿测量的理想仿真模型。本文构建的单目视觉位姿测量系统可应用于小型机械臂的手眼定位中,如图3所示。该视觉测量系统最大测量距离为1 m,相机的分辨率为 $1\,292\text{ pixel}\times 964\text{ pixel}$,像素尺寸为 $3.75\text{ }\mu\text{m}\times 3.75\text{ }\mu\text{m}$,镜头焦距为3.5 mm。

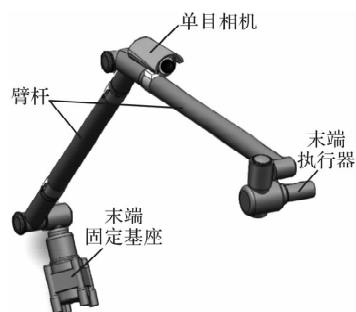


图3 小型机械臂手眼定位系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of small manipulator hand-eye positioning system

为了接近真实测量系统的实际情况,仿真模型中相机的参数取标定结果为真值。设测量距离为1 m,4个特征点在图像中心为对称分布,相邻特征点的间距为200 mm。模型参数的设置如表1所示。

表1 仿真模型参数

Table 1 Simulation model parameters

仿真模型参数	参数真值大小
主点坐标 (u_0, v_0) /pixel	(654.1, 454.8)
焦比 f_u, f_v /pixel	972.9, 972.7
径向畸变 k_1, k_2	-0.36, 0.18
切向畸变 p_1, p_2	0.000 16, -0.000 49
4个特征点在目标坐标系下的坐标 P_i /mm	(-100, 100, 0), (100, 100, 0), (-100, -100, 0), (100, -100, 0)
位置平移向量 T /mm	(0, 0, 1000)
姿态旋转欧拉角/ $^\circ$	(0, 0, 0)

基于设置的参数真值,计算目标特征点经过有畸变的投影变换得到的像点,对各个输入参数依

次同时设置合理的误差,用引入误差的输入参数进行畸变校正及位姿测量等计算。输入参数的引入误差可以根据参考文献、工程实际情况来设置。根据相关文献报道,在实际测量系统中,相机焦比误差能够限制在 $\pm 5\%$ 以内,主点坐标误差能够限制在 $\pm 2.5\%$ 以内,目标特征点坐标误差能够限制在 $\pm 1\text{ mm}$ 以内^[10],畸变参数误差在一定情况下则高达 $\pm 600\%$ ^[15]。考虑到最坏的情况,将各输入参数的误差在上述参考范围内均取最大值,在每个参数的正负2个误差中也均选择使位姿相对误差为最大者。考虑到图像坐标的提取误差及随机性误差的综合影响,在图像坐标中引入均值为0,方差为1像素水平的高斯随机噪声,通过100次试验求取平均值,以此来模拟实际测量系统的情况。将得到的位姿测量结果与位姿真值之间进行比较,可以得到测量系统的精度水平。

用相对误差分别评价位置和姿态的测量精度。设位置的相对误差为 T_{err} ,平移向量的真值为 T ,仿真结果为 T' 。设姿态的相对误差为 R_{err} ,旋转矩阵的真值和仿真结果转换为单位四元数可以分别表示为 q 和 q' ,则位置和姿态的相对误差如(6)式所示:

$$\begin{aligned} T_{\text{err}} &= (\|T' - T\| / \|T\|) \times 100\% \\ R_{\text{err}} &= (\|q' - q\| / \|q\|) \times 100\% \end{aligned} \quad (6)$$

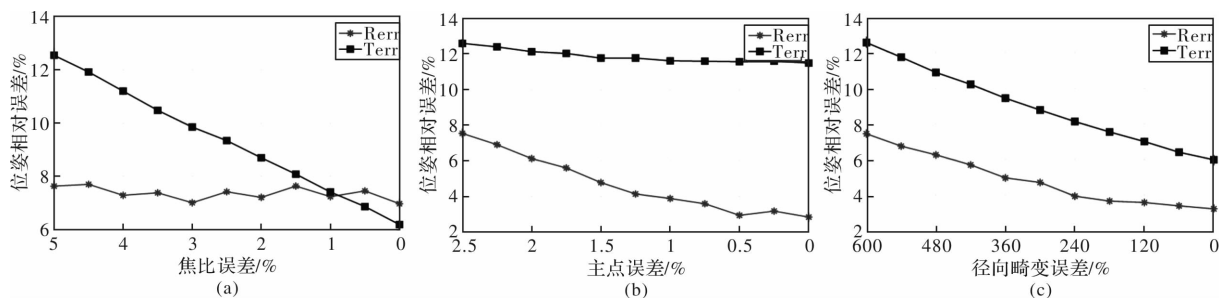
3.2 精度优化方法分析

3.2.1 抑制输入参数误差

通过一定的方法减小输入参数误差,进而优化系统位姿测量的精度。

抑制输入参数误差对位姿相对误差的影响如图4所示,图4(a)到(f)分别为单独抑制一个误差来源,系统位姿测量相对误差减小的情况。

图4中6种情况的比较结果如图5所示。其中浅色为位姿相对误差的减小量,每2个柱状图中的左柱表示位置的相对误差,右柱表示姿态的相对误差。



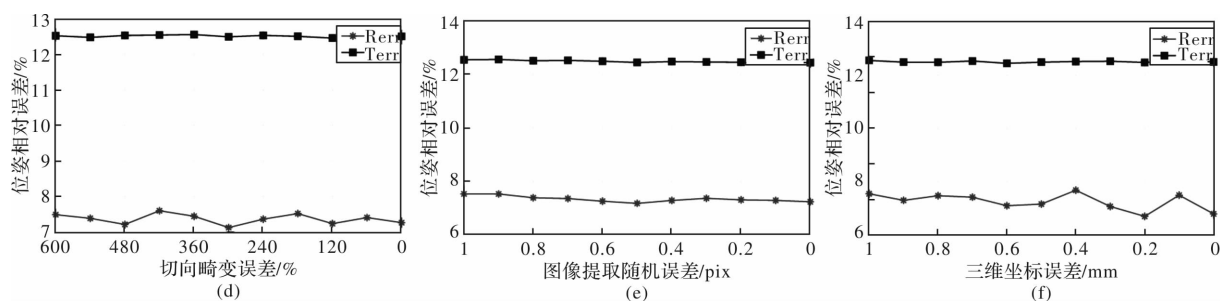


图4 抑制输入参数误差对位姿相对误差影响

Fig. 4 Influence of reducing input parameters error on relative pose error

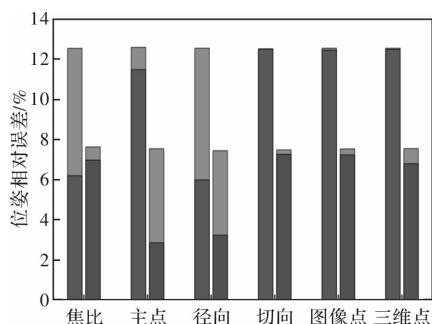


图5 位姿测量精度优化图

Fig. 5 Accuracy improvement chart of pose measurement

可以看出在本测量条件下,抑制切向畸变误差、图像点随机误差和三维点坐标误差对位姿精度的提升不明显;抑制焦比误差对位置精度的提升则很明显;抑制主点误差对姿态精度的提升也很明显;抑制径向畸变误差对位姿精度提升显著。

3.2.2 提高相机分辨率

这里使用分辨率为 $1\,292\text{ pixel} \times 964\text{ pixel}$ 的相机。在实际应用中,分辨率在 $4\,000\text{ pixel} \times 3\,000\text{ pixel}$ 以上的相机比较容易获得,因此也可以通过使用更高分辨率的相机,来提高位姿测量系统的精度。在误差水平不变的情况下,逐步将相机分辨率提高到原来的4倍。此时焦比和主点的真值也提高为原来的4倍,且焦比误差和主点误差仍分别为真值的5%和2.5%,即误差随着真值线性增加。位姿相对误差的减小情况如图6所示。

可以看出,当误差线性增加时,大分辨率相机对位姿测量精度的提升没有明显作用;若将焦比及主点误差控制在一定的范围内,例如焦比和主点误差最大,即仍为分辨率改变之前的大约48和16个像素时,位姿测量相对误差的变化如图7所示。可以看出,控制焦比和主点误差在一定范围内,通过使用更高分辨率的相机,能够有效地提高系统位姿测量的精度。

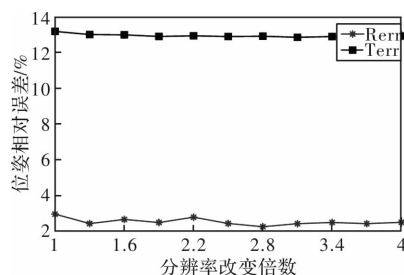


图6 当误差线性增加时,分辨率改变对位姿的影响

Fig. 6 Effect of resolution change on pose when error increases linearly

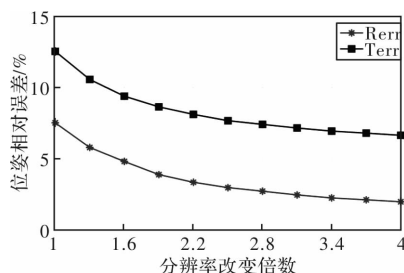


图7 当误差固定不变时,分辨率改变对位姿的影响

Fig. 7 Effect of resolution change on pose when error is fixed

3.2.3 合理配置特征点的间距

在位姿测量距离不变的情况下改变特征点的间距,可以改变所成像点的间距,进而影响位姿测量的精度。在上述测量条件和误差不变的情况下,通过改变特征点的三维坐标真值,研究特征点的间距对位姿测量精度的影响。图8给出了呈正方形分布且相对于光轴对称配置的4个特征点组成的正方形边长由40 mm增长到320 mm时,位姿测量精度的变化情况。

可以看出,当特征点的间距在一定范围内时,位姿测量误差比较小;当大于或小于这个范围时,位姿测量误差增加。因此在位姿测量距离及角度固定的场景下,通过选择合适的特征点间距,可以提高位姿测量的精度。同时根据透视投影原理,

该结论也等价于在特征点的间距不变时,通过选择合适的测量距离,能够提高位姿测量的精度。

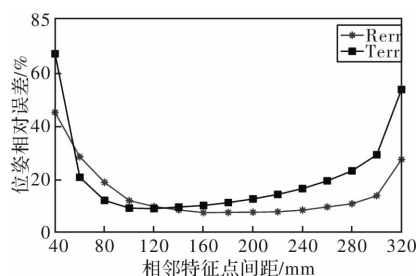


图8 特征点间距改变对位姿精度影响

Fig. 8 Influence of different characteristic points spacing on pose accuracy

3.2.4 合理配置特征点在图像平面成像的位置

上述实验中的像点分布在图像平面中心附近;当像点位于图像平面的其他位置时,也会对位姿测量精度产生影响。通过改变2个坐标系之间的平移向量 T 中的 x 和 y 轴方向真值 T_x 和 T_y ,可以同时平移4个图像特征点在图像平面中的位置,进而得出对位姿测量精度产生的影响。

如图9所示,特征点在图像平面成像位置分布不同,对位姿测量精度有比较大的影响;当像点分布在图像边缘位置时,位姿测量的相对误差远大于分布在中心位置时的相对误差。因此在进行单目位姿测量时,应当尽可能合理地配置特征点在图像平面中的位置,以便提高位姿测量的精度。

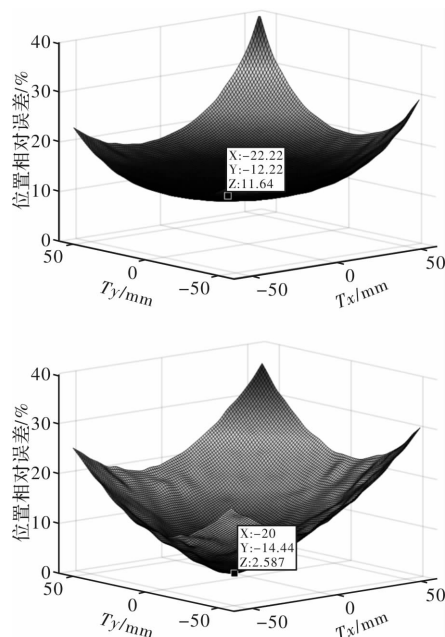


图9 特征点成像位置改变对位姿精度影响

Fig. 9 Influence of different characteristic points imaging positions on pose accuracy

4 精度优化方法选择

当存在误差的测量模型未进行优化时,位置相对误差约为12.56%,姿态相对误差约为7.55%。仅通过一种方法对系统位姿的测量精度进行优化之后,位姿相对误差的最大减小量见表2。

表2 位姿误差优化前后的比较

Table 2 Comparison of pose error before and after optimization

方法	位置误差 减少/%	姿态误差 减少/%
抑制焦比误差	6.36	0.66
抑制主点误差	1.11	4.70
抑制径向畸变误差	6.57	4.21
抑制切向畸变误差	0.01	0.23
抑制图像点误差	0.10	0.30
抑制空间点误差	0.06	0.75
提高相机分辨率	5.88	5.54
改变测量距离或特征点间距	3.63	0.14
合理配置图像点位置	0.92	4.96

表2给出了使用不同方法优化系统位姿测量精度所能达到的性能提升的上限。从理论上讲,无法通过某一种具体的方法使精度得到更高的提高,只能通过多种方法的组合来实现。为了优化系统位姿测量精度,首先要根据实际情况选择上述优化方法中易于实现且精度提升较高的方法,例如抑制径向畸变误差和提高相机分辨率这两种能有效地同时提升系统位姿测量精度的方法;在此基础上再做进一步的分析,得到使用该方法之后,用另外一种方法所能达到位姿测量精度提高的上限,选择精度优化效果最好的方法,进一步提高系统的精度,直至系统位姿测量精度满足要求为止。

5 结论

本文提出的误差分析方法能够有效地分析多误差因素共同作用下的单目视觉位姿测量系统,找到最有效的精度优化方法。在小型机械臂手眼定位的单目视觉位姿测量系统分析中,分别得到了9种不同精度优化方法对测量结果的影响。其中抑制相机径向畸变误差和提高相机分辨率这两种方法能够同时有效地提升该系统的位姿测量精度,使得位姿精度分别提升6.57%、4.21%和5.88%、5.54%。该分析结果能够为优化视觉测量系统并提高位姿测量精度提供理论基础与实践

依据。

参考文献:

- [1] MARTIN A F, ROBELT C B. 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] ZHOU Xin, ZHU Feng. A note on unique solution conditions of the P3P problem[J]. Chinese Journal of Computers, 2003, 26(12): 1696-1701.
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.
- [3] QING Lijuan, WANG Tin, LIU Qingtao. Computer monocular vision positioning[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.
秦丽娟,王挺,刘庆涛.计算机单目视觉定位[M].北京:国防工业出版社,2016.
- [4] HU Z Y, WU F C. A note on the number of solutions of the noncoplanar P4P problem [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(4): 550-555.
- [5] NISTER D. An efficient solution to the five-point relative pose problem[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(6): 756-770.
- [6] ZHANG S J, CAO X B, ZHANG F, et al. Monocular vision-based iterative pose estimation algorithm from corresponding feature points[J]. Science China-Information Sciences, 2010, 53(8): 1682-1696.
- [7] KAMGER-PARSI B. Evaluation of quantization error in computer vision[J]. Pattern Analysis & Machine Intelligence IEEE Transactions on, 1989, 11 (9): 929-940.
- [8] HUO Ju, CUI Jiashan, WANG Weixing. Error analysis of monocular visual position measurement based on coplanar feature points[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(5): 144-150.
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): 144-150.
- [9] ZHOU Jing, HAO Yingming, ZHU Feng, et al. Influence of the error of camera parameters on the accuracy of pose measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(8): 568-572.
周静,郝颖明,朱枫,等.摄像机标定参数误差对位姿测量精度的影响[J].仪器仪表学报,2007,28(8): 568-572.
- [10] HAO Yingming, ZHU Feng, OU Jinjun, et al. Error analysis of P3P pose estimation[J]. Computer Engineering and Application, 2008, 44 (18): 239-242.
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.
- [11] LEPETIT V, MORENO-NOGUER F, FUA P. EPnP: An accurate O(n) solution to the PnP problem[J]. International Journal of Computer Vision, 2009, 81(2): 155-166.
- [12] ZHANG Guangjun. Machine vision [M]. Beijing: Science Press, 2008.
张广军.机器视觉[M].北京:科学出版社,2008.
- [13] LI Tong, ZHANG Qizhi. Research of SLAM loop-closure based on ORB bag of words[J]. Information & Communications, 2017(10): 20-25.
李同,张奇志.基于 ORB 词袋模型的 SLAM 回环检测研究[J].信息通信,2017(10): 20-25.
- [14] ZHANG Jing, ZHU Dayong, JIA Xiaodong. Camera lens distortion calibration with co-line points[J]. Laser Technology, 2006 30(2): 221-224.
张靖,朱大勇,贾晓东.用共线点列标定摄像机镜头畸变[J].激光技术,2006,30(2): 221-224.