

同时考虑测角与定位误差的相机姿态估计算法

何颖*, 马戎, 李岁劳, 郭强

西北工业大学自动化学院, 陕西 西安 710129

摘要 针对测角误差与定位误差对精度的影响持平的高精度场合,提出了能够同时考虑测角误差与定位误差的相机姿态估计算法。在传统最小二乘平差相机姿态估计算法的迭代过程中,将定位误差的协方差投影到单位球面上并与测角误差的协方差融合;用块松弛迭代法解决投影过程依赖于待估计参数的问题;用融合后的协方差作为权重构建加权最小二乘平差方程;从平差方程中解出融合定位与测角误差的相机姿态在当前迭代状态下的估计值。该方法统一了位置测量误差模型与角度测量误差模型,实验结果表明其可有效应用于导弹发射车定向系统。

关键词 机器视觉; 姿态估计; 定位误差; 测角误差; 物体空间误差; 重投影误差

中图分类号 TP391.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.093601

Camera Pose Estimation Algorithm Considering Angle and Position Errors

He Ying*, Ma Rong, Li Suilao, Guo Qiang

School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710129, China

Abstract For high-precision situation that the impact of angle error on precision is comparable with the impact of position error, a camera pose estimation algorithm that can fuse the angle and position errors is proposed. The covariance of position error is projected onto a unit sphere and fused with the covariance of angle error in the iterative process of position estimation algorithm of traditional least squares adjustment camera. The problem that the projection progress depends on the parameters to be estimated is solved with block relaxation iteration method. The weighted least squares adjustment equation is constructed using the covariance. From the adjustment equation, the estimated values of camera pose in the current iteration are obtained, which combine the position and angle errors. The proposed algorithm unifies the measurement models of the position error and angle error. Experimental results show the effectiveness of the proposed algorithm applied in orientation system for missile vehicle.

Key words machine vision; pose estimation; position error; angle error; object space error; reprojection error

OCIS codes 150.1135; 150.1488; 110.4153

正文

相机的姿态估计是指给定参考点及其对应的像点求解相机位置和方位的问题。相机姿态估计广泛应用于计算机视觉、摄影测量、机器人以及虚拟现实等场合。对于已标定相机,影响姿态估计的误差源主要有相机自身的测角误差与参考点的定位误差。从误差模型的角度,重投影误差与球面投影误差^[1]为相机测角误差的测量模型,物体空间误差及其二维代数形式^[2]为参考点定位误差的测量模型。当参

考点定位精度较低时物体空间误差对姿态估计的影响高于重投影误差,反之,后者的影响高于前者。早期的相机像素较低,测角误差占主导因素。随着相机像素的不断提高,在一些高分辨率的场合,两者的影响已经持平。但目前没有算法能够同时考虑两者的影响。对此,本文提出在得到当前相机姿态估计值的同时将每一个参考点的定位误差协方差投影到该点对应视线与单位球交点处的切平面上^[3],这相当于将定位误差等效为测角误差(表1步骤1)。将投影后的协方差叠加到相机自身的测角误差的协方

收稿日期: 2018-07-31; 修回日期: 2018-08-02; 录用日期: 2018-08-08

基金项目: 航空基金(20150153002)

* E-mail: cnheyang@qq.com

差上得到该参考点,同时考虑了测角误差与定位误差的总等效协方差(表1步骤2)。按照常规方法构建姿态估计的 Gauss-Newton 状态更新方程(表1步骤3、4)。将总等效协方差作为这个参考点在状态更新方程中的权重,求解得到新的姿态估计值(表1步骤5)。这个新的估计值即是在上一次姿态估计状态下同时考虑了测角误差与定位误差的相机姿态

表1 同时考虑测角误差与定位误差的相机姿态估计算法

Table 1 Camera pose estimation algorithm considering angle error and position error

| Input: $\mathbf{x}_i, \mathbf{S}_x, \mathbf{n}_i, \mathbf{S}_\theta, \mathbf{s}^{(0)}, \mathbf{t}^{(0)}$. Output: $\mathbf{s}^{(k)}, \mathbf{t}^{(k)}$. |
|---|
| 1. $\mathbf{T}_i^{(k)} = \mathbf{P}_i \mathbf{S}_x \mathbf{P}_i^T / d_i^{(k)^2}, d_i^{(k)} = \ \mathbf{z}_i^{(k)}\ , \mathbf{z}_i^{(k)} = \mathbf{x}_i + \mathbf{t}^{(k)}, \mathbf{P}_i = \text{null}(\mathbf{n}_i^T)^T$; |
| 2. $\mathbf{S}_i^{(k)} = \mathbf{T}_i^{(k)} + \mathbf{S}_\theta$; |
| 3. $\mathbf{r}_i^{(k)} = \mathbf{n}_i - \mathbf{R}^{(k)} \mathbf{v}_i^{(k)}, \mathbf{r}^{(k)} \triangleq (\mathbf{r}_1^{(k)}, \dots, \mathbf{r}_n^{(k)})^T, \mathbf{v}_i^{(k)} = \mathbf{z}_i^{(k)} / d_i^{(k)}, \mathbf{R}^{(k)} = \text{Rod}(\mathbf{s}^{(k)})$; |
| 4. $\mathbf{J}_i^{(k)} = [-\partial(\mathbf{R}^{(k)} \mathbf{v}_i^{(k)}) / \partial \mathbf{s}, \mathbf{R}^{(k)} (\mathbf{I} - \mathbf{v}_i^{(k)} \mathbf{v}_i^{(k)T}) / d_i^{(k)}], \mathbf{J}^{(k)} = (\mathbf{J}_1^{(k)}; \dots; \mathbf{J}_n^{(k)})$; |
| 5. $(\mathbf{s}^{(k+1)}, \mathbf{t}^{(k+1)}) = (\mathbf{s}^{(k)}, \mathbf{t}^{(k)}) + (\mathbf{J}^{(k)T} \mathbf{Q}^{(k)} \mathbf{J}^{(k)})^{-1} \mathbf{J}^{(k)T} \mathbf{Q}^{(k)} \mathbf{r}^{(k)}, \mathbf{Q}^{(k)} = \text{diag}(\mathbf{S}_1^{(k)}, \dots, \mathbf{S}_n^{(k)})^{-1}$; |
| 6. Repeat steps 1-5, until convergence. |

表1中: \mathbf{x}_i 为参考点 i 的坐标 ($i=1, \dots, n$); \mathbf{n}_i 为指向参考点 i 的单位方向矢量; \mathbf{S}_x 与 \mathbf{S}_θ 分别为定位与测角误差的协方差; \mathbf{I} 为单位矩阵; 上标 (k) 为第 k 次迭代; \mathbf{s} 与 \mathbf{t} 分别为待估计的旋转与平移参数; $\text{Rod}(\cdot)$ 表示将罗德里格参数转换为旋转矩阵; $\text{null}(\cdot)$ 表示矢量的零空间; $\text{diag}(\cdot)$ 表示块对角阵; $\partial(\mathbf{R}^{(k)} \mathbf{v}_i^{(k)}) / \partial \mathbf{s}$ 由文献[5]中的公式计算得到。

图1为将该算法应用到基于地标点的导弹发射车定向系统^[6]时的实验结果图。实验定位精度为1 cm,测角精度为10"。限于篇幅,只列出了角度误差结果,位置误差结果与角度误差相似。可以看到:发射车位于图1(a)中AB段位置时,图1(b)中误差曲线的AB段显示该算法逼近了精度更高的测角误

估计值。重复上述过程则可以将姿态估计精度不断提高。上述迭代过程整体框架为块松弛法^[4],块松弛法解决了投影过程依赖于待估计参数本身的问题并且保证了算法的收敛性。Gauss-Newton 状态更新方程的旋转矩阵采用罗德里格参数描述,其中残差对罗德里格参数的雅可比矩阵的计算使用文献[5]中的公式将传统方法的27个中间变量降为9个。

差模型。这是因为此时发射车离所有地标点都较远,地标点定位误差导致的角度误差相对相机自身的测角误差较小,测角误差占据主导地位。反之,在BC段,发射车离大多数地标点的距离较近,地标点定位误差导致的角度误差超过了相机自身的测角误差,定位误差占据主导地位,算法逼近精度更高的定位误差模型。更重要的是,在B点附近,此时两种误差都不占优,该算法同时优于两者。

该算法统一了参考点定位误差模型与相机测角误差模型,适合需要在两种误差模型间平滑切换或两种误差对精度的影响大小相当的高精度的应用场合。导弹发射车定向系统的实验证明了该算法的实用性。考虑粗差的影响是本课题组的下一步工作。

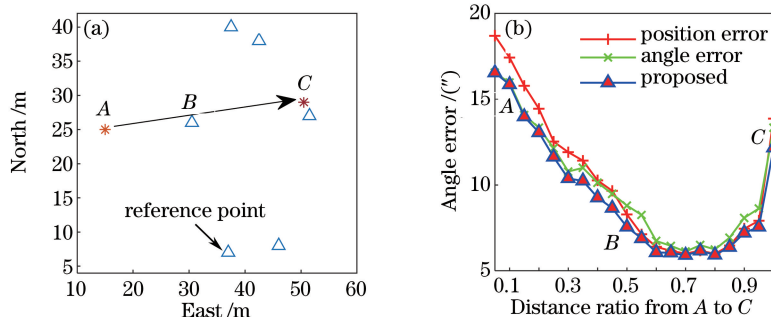


图1 发射车从A点到C点20个等间隔位置上的角度误差。(a)实验场景示意图;(b)角度误差

Fig. 1 Angular error of launch vehicle on the 20 equal intervals from A to C. (a) Experimental scene; (b) angle error

参 考 文 献

[1] Guan H, Smith W A P. Structure-from-motion in spherical video using the von mises-fisher distribution [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017,

26(2): 711-723.

[2] Zheng Y, Kuang Y, Sugimoto S, *et al.* Revisiting the PnP problem: a fast, general and optimal solution [C] // 2013 IEEE International Conference on Computer Vision, December 1-8, 2013, Sydney, NSW, Australia. New York: IEEE, 2013: 2344-

- 2351.
- [3] Urban S, Leitloff J, Hinz S. MLPnP-a real-time maximum likelihood solution to the perspective-n-point problem[J]. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2016, III-3: 131-138.
- [4] Lange K. Block Relaxation[M]. New York: Springer, 2013: 171-183.
- [5] Gallego G, Yezzi A. A compact formula for the derivative of a 3-D rotation in exponential coordinates [J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2015, 51(3): 378-384.
- [6] He Y, Li S L, Guo Q. Position and orientation method for missile vehicle by observing landmarks [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(4): 751-756.
- 何颖, 李岁劳, 郭强. 基于地标观测的导弹发射车定位定向算法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4): 751-756.