

doi:10.3788/gzxb20134212.1442

基于序列正交迭代算法的立体视觉定位

许允喜, 齐赵毅, 蒋云良

(湖州师范学院 信息与工程学院, 浙江 湖州 313000)

摘要:针对智能车自主视觉导航需要快速准确地获取自身位置的要求,提出了一种鲁棒、高效、精确的立体视觉定位方法.计算中采用直接 P3P 位姿估计方法和 RANSAC 算法进行匹配内点检测和初始运动参量估计,极大地提高了计算准确度.利用基于一般相机模型序列正交迭代算法的立体视觉定位运动参量非线性优化法对立体相机的最近 N 帧运动参量和结构参量进行快速在线优化,与集束调整法相比,该方法的优化速度有较大提高,且能保证全局收敛,鲁棒性高.室外真实实验结果表明:本文方法计算速度快,定位准确度高,鲁棒性强,能满足导航定位的高性能要求.

关键词:视觉定位;序列正交迭代算法;运动估计;视觉导航

中图分类号:TP391.41

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)12-1442-6

Stereo Visual Localization Based on Sequence Orthogonal Iterative Algorithm

XU Yun-xi, QI Zhao-yi, JIANG Yun-liang

(Institute of Information & Engineering, Huzhou Teachers College, Huzhou, Zhejiang 313000, China)

Abstract: For the intelligent vehicle autonomous visual navigation need to get real-time, accurate, robust their own location information, a robust, efficient and accurate stereo visual localization algorithm is proposed. A new direct P3P pose estimation with RANSAC was proposed to obtain matching inliers and initial motion parameters and greatly improve accuracy. Then a new motion parameters optimization method was proposed based on sequence orthogonal iterative algorithm for general camera models. Recent N frames motion and structure parameters of stereo camera were rapidly optimized online. Compared with bundle adjustment, the speed and robust of the proposed method greatly enhanced, and the proposed method could attain global convergence. The outdoor real experiments show this method has high accuracy, good robustness and high computing speed in localization that can meet the high performance requirement of navigation localization.

Key words: Visual localization; Sequence orthogonal iterative algorithm; Motion estimation; Visual navigation

0 引言

智能车可以在危险地带代替人类执行一些特殊任务,是航天探索、未来战场的必备装置.在其长距离漫游过程中,实时地获得其行驶距离、姿态等参量,可以为智能车的定位与导航提供重要的位置和方向信息.随着计算机视觉领域的快速发展,基于视觉的导航定位技术受到了人们的广泛关注,成为地

面自主移动机器人或智能车长距离导航的一种鲁棒且精确的定位方法^[1-4],该方法在“勇气”号与“机遇”号火星车^[5]上也得到了成功的应用.

基于视觉的定位方法,也称视觉里程计^[1],其仅依赖视觉输入进行视频几何计算.由于单目视觉里程计^[6]假定三维世界坐标系中的高度信息为 0.因此,目前广泛采用立体视觉的定位方法^[1-2],即立体视觉定位.

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61370173, 60872057)、工业控制技术国家重点实验室开放课题(No. ICT1240)、湖州市自然科学基金(No. 2011YZ07)和国家级大学生创新创业训练计划项目(No. 201210347010)资助

第一作者:许允喜(1978-),男,博士研究生,讲师,主要研究方向为视觉导航、智能视频监控等. Email: xuyunxi@hutc.zj.cn

收稿日期:2013-04-12; **录用日期:**2013-06-28

智能车在自主导航过程中需要实时、鲁棒、精确地获取其自身位置的信息,因此运动估计算法实时性、鲁棒性和精确性至关重要.定位算法包含特征提取和匹配与运动估计两部分.在特征提取和匹配跟踪中,不可避免地会出现错误匹配和较大的图像位置误差.所以立体视觉定位算法中运动估计一般分为 2 个步骤^[1-4]:第一步必须滤除这些错误匹配和较大的图像位置误差,得到误差较小的匹配对(即内点)和初始运动估计参量;第二步对这些匹配内点和初始运动估计参量再进行非线性优化,提高参量估计的精确度.本文对目前视觉导航定位中运动估计算法进行了研究.第一,采用了一种全新的在计算机视觉领域发展的直接由世界帧参考点坐标和图像坐标计算相机位置和方向的 P3P 位姿估计方法^[7](本文称为直接 P3P 方法).本文联合直接 P3P 方法和 RANSAC 算法进行匹配内点检测和初始运动参量估计,获得了很高计算效率和计算准确度.与 3 点 3D-3D 特征对应的绝对定向算法相比,在保证计算效率差不多的情况下计算准确度大大提高;与其他 P3P 算法相比,在保证计算准确度差不多的情况下计算效率大大提高.第二,提出了一种基于一般相机模型序列正交迭代算法^[8]的立体视觉定位运动参量非线性优化方法.目前,用于多帧视频序列的 3D 特征点和运动参量的非线性优化方法为集束调整^[9-11].集束调整方法为基于 Levenberg-Marquardt 的非线性优化算法,而 Levenberg-Marquardt 算法优化速度慢其不能保证全局收敛.序列正交迭代算法采用了完全不同于集束调整方法的迭代优化过程.相对于集束调整方法,序列正交迭代算法优化速度非常快且能保证全局收敛^[8].本文针对立体视觉定位应用,采用一般相机模型序列正交迭代算法,给出了针对立体相机和在线参量优化的计算流程.室外真实实验表明:本文方法是鲁棒的、精确的、快速的,优于目前的方法.

1 匹配内点检测和初始运动参量估计

匹配内点检测和初始运动参量估计的标准方法为把 k 点运动估计方法融入到 RANSAC 采样循环中.匹配内点的准确度依赖于采样到的 k 对匹配特征,采样次数越多则得到的 k 对匹配特征误差很小的概率越大.立体视觉导航定位需要实时处理几百个甚至几千个含噪匹配特征点,需要高效的运动估计方法,所以 k 点运动估计方法的计算效率对立体视觉定位的实时性影响很大. k 越小则采样效率越高,所以立体视觉定位中 k 取最小值 3.目前,立体视觉定位一般采用 3 点 3D-3D 运动估计算法,该方

法计算简单、快速.但该方法受立体匹配视差噪音影响很大,运动参量估计准确度低,匹配内点误差大.本文采用了一种新的直接 P3P 位姿估计方法.该方法为 3D-2D 运动估计方法,在保持高准确度计算的同时计算速度也很快.

如图 1 所示,所有存在的 PnP 方法(P3P 为 PnP 的一个特例)^[12-16]都分为 2 个步骤.第一步,通过几何约束先恢复参考点在相机坐标系下的 3D 坐标,即首先通过三角形 CP_iP_j 约束估计相机中心和 3D 点 P_i 之间的距离 $\|CP_i\|$.只要距离计算得到, P_i 在相机坐标系下就表达为 P_i^c .第二步,相机在世界参考帧下的位置和方向 $[R|t]$ 即为对齐点 P_i 和 P_i^c 之间的变换.该问题可以用四元数或奇异值分解进行闭环求解.

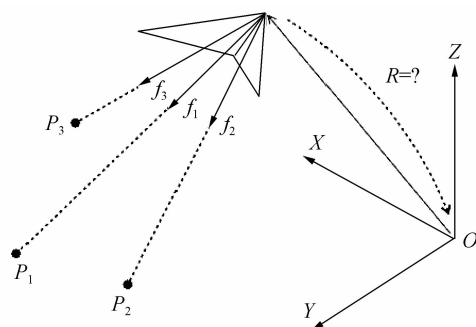


图 1 P3P 问题示意

Fig. 1 Synopsis of the P3P problem

文献[8]提出了一种全新的 P3P 问题的闭环解法.该方法直接由世界帧参考点坐标和图像坐标计算相机在世界参考帧中的位置和方向 $[R|t]$,这是计算机视觉领域的首次尝试.由于该方法直接计算 $[R|t]$,所以其计算效率很高.与其他 P3P 方法相比,在第一步,其不用计算点在相机参考帧下的 3D 坐标;不需要对齐 2 个点集的第二个计算步骤.限于篇幅限制,算法详细计算过程见文献[7].

利用 RANSAC 算法的原理和直接 P3P 方法,本文的匹配内点和初始运动参量估计流程为:1) 随机在匹配集合中采样 3 对匹配特征点;2) 利用直接 P3P 方法计算相机的运动参量;3) 利用该运动参量计算匹配内点;4) 重复步骤 1)、2)、3) 若干次,本文中采样 400 次.选取匹配内点最多的那一次作为最后的匹配内点,对应的运动参量作为初始运动参量.

2 基于一般相机模型序列正交迭代算法的立体视觉定位方法

序列正交迭代算法是在正交迭代算法^[17]基础上推广发展而来,用于多帧视频序列的 3D 特征点和运动参量的非线性优化.正交迭代算法具有迭代次数少、计算准确度高、快速且全局收敛的优点,是

目前性能最优的实时位姿估计算法之一,应用广泛^[16-17].序列正交迭代算法继承了正交迭代算法的优点.立体视觉导航定位应用需要实时同时优化几帧运动参量和几千个匹配特征点,优化参量很多,所以集束调整收敛速度慢,数值稳定低,在立体视觉定位优化进程中容易陷入局部最小值.序列正交迭代算法使特征点共线性误差最小,采用与集束调整方法完全不同的迭代计算过程,理论上是全局收敛的,且优化速度快,理论上计算复杂度只有集束调整方法的1/8,所以更适用于视觉导航定位应用场合.本文针对立体视觉定位应用和一般相机模型,给出了立体相机序列正交迭代算法的计算流程.

2.1 一般相机模型

在一般相机模型中联合光线方向和像素作为基本元素(称为Raxel).Raxel用点 c (对于透视投影相机, c 为投影中心)和向量 v (定义光线)表示.图2给出了一般相机模型的例子.该模型包含两个刚体连接的透视投影相机(c_a, c_b).对于相机 a 的测量点 p ,该 (c, v) 的值为 $(-\tilde{R}_a^T \tilde{t}_a, \tilde{R}_a^T \tilde{K}_a^{-1} p)$,其中 \tilde{R}_a 和 \tilde{t}_a 为相机外参, \tilde{K}_a 为内参.

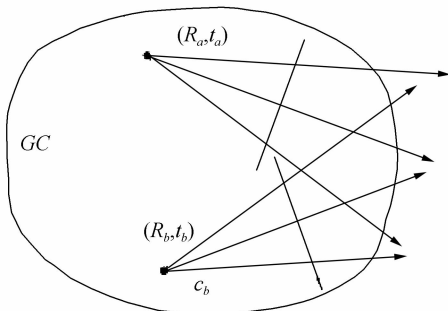


图2 一般相机模型

Fig. 2 General camera models

2.2 立体相机误差函数

立体相机的目标空间误差为

$$e_{ki} = \| (I - V_{ki}^L)(R_k X_i + t_k - c_{ki}^L) \| + \| (I - V_{ki}^R)(R_k X_i + t_k - c_{ki}^R) \| + \sum_{j=1}^2 \| (I - V_{ki}^j)(R_k X_i + t_k - c_{ki}^j) \| \quad (1)$$

式中, $V_{ki}^j = \frac{v_{ki}^j v_{ki}^{jT}}{v_{ki}^{jT} v_{ki}^j}$.本文的视觉定位采用立体相机,所以把左相机光心设为世界坐标系,右相机相对左相机的旋转矩阵则为单位矩阵.由2.1节的一般相机模型可以得出: $c_{ki}^1 = (0, 0, 0)^T$, $c_{ki}^2 = (B, 0, 0)^T$, $v_{ki}^1 = (x_{ki}^1, y_{ki}^1, 1)$, $x_{ki}^1 = \frac{u_{ki}^1 - u_0^1}{f}$, $y_{ki}^1 = \frac{v_{ki}^1 - v_0^1}{f}$.

运动中的立体相机在 n_k 个不同位置和方向上观测到场景空间结构特征点 X_i ,则从这些场景结构点对应的图像测量坐标值(c_{ki}^j, V_{ki}^j),恢复场景结构

X_i 和 n_k 个立体相机的位置和方向(R_k, t_k).其目标价值函数为

$$\arg \min_{R, t, X} E(R, t, X) = \arg \min_{R_k, t_k, X_i} \sum_{i=1}^{n_k} e_{ki}(R_k, t_k, X_i) \quad (2)$$

所以,求 $X = \{X_1, \dots, X_{n_i}\}$,运动参量 $R = \{R_1, \dots, R_{n_k}\}$ 和 $t = \{t_1, \dots, t_{n_k}\}$.

2.3 立体相机的最佳结构估计

假定运动参量 R_k, t_k 已知,则式(2)变为

$$\arg \min_{X_i} \sum_{i=1}^{n_k} e_{ki}(X_i), \text{最佳 } X_i \text{ 可以通过对其求偏导方法计算得到}$$

$$\frac{\partial e_{ki}}{\partial X_i} = 2R_k^T Q_{ki} R_k X_i + 2R_k^T Q_{ki} t_k - 2R_k^T Q_{ki} c_{ki} = 0,$$

其中 $Q_{ki} = (I - V_{ki})^T (I - V_{ki})$.则立体相机的最佳结构估计公式可表达为

$$X_i = \tilde{x}_i + \sum_{j=1}^2 \sum_{l=1}^{n_k} \tilde{X}_{ki}^j t_{kl} \quad (3)$$

其中 $\tilde{X}_{ki}^j = -\tilde{Y}_i R_k^T Q_{ki}^j$, $\tilde{x}_i = \tilde{Y}_i \sum_{j=1}^2 \sum_{l=1}^{n_k} R_k^T Q_{ki}^j c_{ki}^j$,

$$\tilde{Y}_i = \left(\sum_{j=1}^2 \sum_{l=1}^{n_k} R_k^T Q_{ki}^j R_k \right)^{-1} \quad (4)$$

2.4 立体相机的最佳平移估计

利用2.3节最佳结构的参量化,则式(2)变为

$$\arg \min_{R_k, t_k} \sum_{i=1}^{n_k} e_{ki}(R_k, t_k, X_i(R_k, t_k)), \text{则最佳 } t_q (q=1, \dots, n_k) \text{ 通过计算偏导 } \frac{\partial e_{ki}}{\partial t_q} = 0 \text{ 得到,方程为}^{[8]}$$

$$\sum_{k=1}^{n_k} \left(\sum_{l=1}^2 \sum_{i=1}^{n_k} (X_i^j R_k^T Q_{ki}^l) \right) t_k + \sum_{j=1}^2 \sum_{l=1}^{n_k} Q_{ki}^j t_q + \sum_{j=1}^2 \sum_{l=1}^{n_k} Q_{ki}^j (R_k \tilde{x}_i - c_{ki}^j) = 0 \quad (5)$$

式(5)可表达为一个线性方程组,即

$$A_t t = b_t \quad (6)$$

则 $t = A_t^{-1} b_t$

2.5 立体相机的旋转矩阵迭代计算

根据一般相机模型的序列正交迭代算法^[8],立体相机的旋转矩阵迭代计算可表达为绝对定向问题,即

$$R_k^{i+1} = \min_R \sum_{j=1}^{n_k} \| R X_i^{*(\lambda)} + t_k^{*(\lambda)} + (-c_{ki}^j - V_{ki}^j q_{ki}^{j(\lambda)}) \| \quad (7)$$

式中 $q_{ki}^{j(\lambda)} = R X_i^{*(\lambda)} + t_k^{*(\lambda)} - c_{ki}^j$.该问题可由四元数或奇异值分解方法求解.

2.6 基于立体相机序列正交迭代算法的立体视觉定位

本文的立体视觉定位方法计算步骤为:

1) 提取左图像的 CenSurE^[18] 特征点和 BRIEF^[19-20] 局部描述符;

2)用 NCC 区域匹配方法沿右图像水平方向极线进行一维搜索得到第一图像 CenSurE 特征对应的图像坐标,进而得到特征点的 3D 坐标;

3)利用 BRIEF 局部描述符对当前帧和前一帧的特征点集进行匹配跟踪;

4)利用 RANSAC 算法和直接 P3P 方法检测匹配内点和估计初始运动参量;

5)利用一般相机模型序列正交迭代算法对最近 N 帧进行结构和运动参量非线性优化.

序列正交迭代算法对序列所有帧进行优化,由于视觉定位的实时性需要,本文采用滑动窗形式的局部优化方式,时间窗每帧滑动一次,每次仅对最近的 N 帧进行参量优化调整.本次优化的参量值作为下一次优化的初始值.本文立体视觉定位方法的运动估计算法计算流程为:

1)对于每一帧,由第一节计算得到当前帧旋转矩阵的初始值,并与前一次序列正交迭代优化结果一起组成初始旋转矩阵集 R ;

2)使用方程(4)计算结构的参量化值(\tilde{X}_k 和 \tilde{x}_i);

3)使用方程(6)和(\tilde{X}_k 和 \tilde{x}_i)计算最佳平移 t_k ;

4)使用方程(3)计算最佳结构 X_i ;

5)对于每个立体相机位置 k ,求解方程(7)的绝对定向问题得到更精确的旋转矩阵 R ;

6)重复步骤 2)~5)直到收敛;

7)立体相机采集到新帧,时间窗滑动一帧,返回步骤 1).

3 实验

为了验证本文算法的优越性,本文进行了智能车立体视觉定位室外真实实验.实验分析了本文算法在导航定位中的性能,并与其他方法进行了对比.实验设备采用 PointGrey 公司的 Bumblebee 立体相机通过 IEEE1394 接口连接笔记本电脑组成机载立体相机系统,利用该机载立体相机系统采集视频数据并进行定位实验.实验在白天自然光照和自然路面条件下进行,路面无特殊标志物,完全采用本文的实时视频几何计算方法进行自定位.立体相机采集图像大小为 640×480 像素,如图 3 所示,立体相机的基线长度为 0.12 m,等效焦距为 491.

为了得到精确的实验结果对比,实验采用闭环路线,即从起点出发行进一百多米(绕一圈)又回到起点处,为了得到精确的基准数据,终点图像匹配到起点图像,保证起点和终点完全相同.设起点位置为 $(0,0,0)$ 和姿态角为 $(0,0,0)$,则终点基准位置也为

$(0,0,0)$,终点基准姿态角也为 $(0,0,0)$.估计的终点位置和姿态角即为算法的定位误差.



(a) Left image



(b) Right image

图 3 立体图像采样

Fig. 3 Stereo image sample

为了评价直接 P3P 方法(P3P-D)在立体视觉定位中的优越性能,本文把广泛应用于立体视觉定位的 3D-3D 运动估计方法^[2-3,5]以及非直接 P3P 方法中目前达到最高水准的 P3P-Gao 方法作为对比算法.为了评价本文的立体相机序列正交迭代算法在立体视觉定位中的优越性能,本文与广泛应用于立体视觉定位的集束调整方法(BA)进行了详细对比.集束调整方法采用文献[2-3]中用于立体视觉定位的局部双目集束调整优化形式. N 的取值不能太小也不能太大,太小则优化准确度提高的很小,太大则优化时间大大增加而不能满足视觉定位的实时性要求.本文兼顾计算效率和优化准确度,SOI 方法和 BA 方法都对最近 5 帧进行非线性优化,即 $N=5$,二种方法能达到最佳的优化准确度和计算效率.

3.1 算法实时性分析

本文算法采用 C++ 语言编程实现,在主频为 Intel2.2GHz,内存为 2G 的笔记本电脑上运行.表 1 给出了本文立体视觉定位算法各部分的运行时间(每帧).本文提出的定位算法(即 P3P-D+SOI)每帧的运行时间共为 75 ms,能进行实时视频计算,可支持刷新频率约为 13 Hz,所以本文算法能满足视觉导航的实时性要求.从实验结果看,本文采用的 P3P-D 方法在运动估计上的时间仅为 8 ms,远远低于 P3P-Gao 方法,和 3D-3D 方法相当(仅相差 1 ms).SOI 的计算时间为 10 ms,计算复杂度远远小于 BA 方法.从表 1 可以看出,特征检测,描述符计算,立体匹配、帧匹配的总计算时间为 57 ms.所

表 1 本文立体视觉定位算法各部分运行时间

Table 1 Run-time of all parts of our stereo visual localization algorithm

	CenSurE	BRIEF	Stereo matching	Feature matching	Motion estimation			Motion optimization	
					P3P-D	P3P-Gao	3D-3D	SOI	BA
Run-time/ms	15	22	9	11	8	17	7	10	60

以运动估计方法的计算时间对定位算法的实时性影响是很大的。

3.2 算法定位准确度和鲁棒性分析

直接评价算法精确度的性能指标为定位误差, 有 6 个位姿参量, 即 3D 位置均方根误差 $\sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2 + (\Delta Z)^2}$ 、姿态角度均方根误差 $\sqrt{(\Delta\varphi)^2 + (\Delta\theta)^2 + (\Delta\psi)^2}$. 另外, 本文还对连续 $N=5$ 帧特征点的再投影误差进行了统计, 其均方根误差间接反映了算法的计算精确度, 误差越小则定位误差也越小, 其标准差反映了算法的鲁棒性, 标准差越小则算法鲁棒性越高。

图 4 给出了不同方法的运动轨迹图. 表 2 给出了不同方法的闭环误差和图像再投影误差统计. 从实验结果看, P3P-D 和 P3P-Gao 定位准确度和鲁棒性相当, 3D-3D 方法的定位精确度和鲁棒性都较低. 为了更好地体现本文方法的优越性能, 图 3 和表 2 中的 SOI 方法和 BA 方法都在本文的 P3P-D 实验基础上进行优化. 从实验结果看, 本文的 SOI 方法的定位误差低于 BA 方法的定位误差, 鲁棒性也大大高于 BA 方法, 说明了 SOI 方法的快速全局收敛性, SOI 方法每次迭代优化都能保证全局收敛, 图像重投影误差的标准差很小。

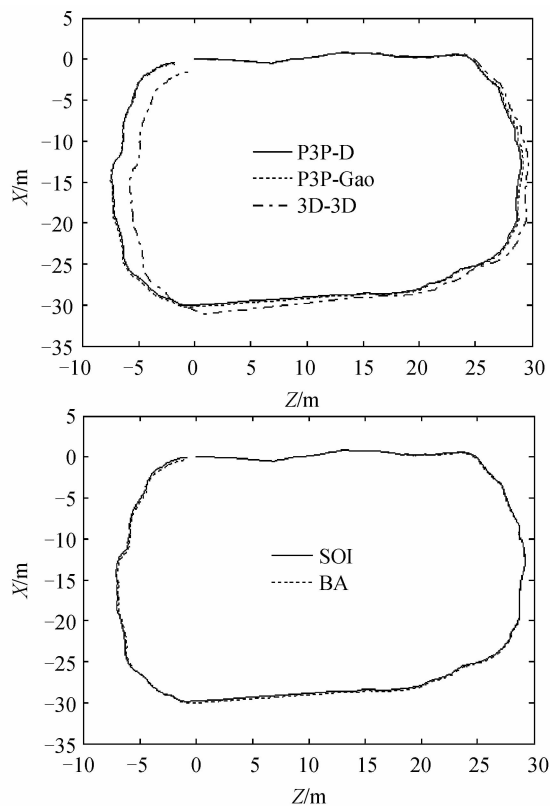


图 4 运动轨迹图

Fig. 4 Motion trajectory

表 2 闭环误差和图像再投影误差统计

Table 2 Loop closure error and image re-projection error statistics

	Initial motion estimation method			Motion optimization method	
	P3P-D	P3P-Gao	3D-3D	SOI	BA
RMS error in XYZ/m	1.57	1.59	2.35	0.57	0.79
RMS error in $\varphi\theta\psi/(\circ)$	4.94	4.98	5.99	2.96	3.09
RMS re-projection error	1.16	1.17	1.38	0.39	0.41
STD of Re-projection error	0.67	0.69	0.98	0.14	0.23

4 结论

本文提出了一种新的用于立体视觉导航定位系统的运动估计方法. 该算法采用了一种新的直接计算相机位置和方向的 P3P 位姿估计方法, 在保持很高的计算速度情况下使匹配内点和初始运动估计的计算准确度大大提高, 优于 3D-3D 方法和其他非直接 P3P 方法. 提出了一种基于一般相机模型序列正交迭代算法的立体视觉定位运动参量优化方法, 计算准确度、计算速度和鲁棒性都高于集束调整方法. 室外真实实验结果表明: 本文算法定位准确度高, 鲁棒性强, 计算速度快, 能满足高性能导航定位的要

求.

参考文献

- [1] SCARAMUZZA D, FRAUNDORFER F. Visual odometry: tutorial[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2011, 18(4): 80-92.
- [2] SUNDERHAUF N, PROTZEL P. Towards using bundle adjustment for robust stereo odometry in outdoor terrain[C]. Proc. of Towards Autonomous Robotic Systems, London; Imperial College London, 2006: 206-213.
- [3] WU Wei-ren, WANG Da-yi, XIANG Yan, et al. Binocular visual odometry algorithm and experimentation research for the lunar rover[J]. *Scientia Sinica Informations*, 2011, 41(12): 1415-1422.
吴伟仁, 王大轶, 邢琰, 等. 月球车巡视探测的双目视觉里程算法与实验研究[J]. *中国科学: 信息科学*, 2011, 41(12): 1415-1422.

- [4] FRAUNDORFER F, SCARAMUZZA D. Visual odometry: part ii: matching, robustness, optimization, and applications [J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2012, **19**(2): 78-90.
- [5] MAIMONE M, CHENG Y, MATTHEIS L. Two years of visual odometry on the mars exploration rovers[J]. *Journal of Field Robotics*, 2007, **24**(3): 169-186.
- [6] ROYER E, LHUILLIER M, DHOME M, *et al.* Monocular vision for mobile robot localization and autonomous navigation [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2007, **74**(3): 237-260.
- [7] KNEIP L, SCARAMUZZA D, SIEGWART R. A novel parametrization of the perspective-three-point problem for a direct computation of absolute camera position and orientation [C]. Proc. of The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), NJ, USA: IEEE Computer Society, 2011: 2969-2976.
- [8] SCHWEIGHOFER G, PINZ A. Fast and globally convergent structure and motion estimation for general camera models [C]. In Proc. of British Machine Vision Conference (BMVC), Edinburgh: British Machine Vision Association Press, 2006: 147-157.
- [9] ENGELS C, STEWENIUS H, NISTER D. Bundle adjustment rules[C]. In Photogrammetric Computer Vision, Bonn, Germany: Springer, 2006: 266-271.
- [10] KONOLIGE K, AGRAWAL M I. FrameSLAM: from bundle adjustment to realtime visual mapping [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2008, **24**(5): 1066-1077.
- [11] LOURAKIS M I A, ARGVROS A A. SBA: a software package for generic sparse bundle adjustment [J]. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 2009, **36**(1): 1-30.
- [12] NISTER D, STEWENIUS H. A minimal solution to the generalized 3-point pose problem [J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2006, **27**(1): 67-79.
- [13] FIORE P. Efficient linear solution of exterior orientation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2001, **23**(2): 140-148.
- [14] ANSAR A, DANILIDIS K. Linear pose estimation from points or lines[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, **25**(5): 578-589.
- [15] GAO X, HOU X, TANG J, *et al.* Complete solution classification for the perspective-three-point problem [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, **25**(8): 930-943.
- [16] 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): 578-589.
- [17] LU C P, HAGER D G, MJOLSNESS E. Fast and globally convergent pose estimation from video images [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(5): 610-622.
- [18] AGRAWAL M, KONOLIGE K. CenSurE: Center surround extremas for realtime feature detection and matching[C]. In Proceeding of 10th European Conference on Computer Vision (ECCV), Heidelberg: Springer Verlag, 2008: 102-115.
- [19] CALONDER M, LEPEIT V, OZUYAL M, *et al.* BRIEF: computing a local binary descriptor very fast [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, **34**(7): 1281-1298.
- [20] CHEN Fang, XU Yun-xi. High-speed scene matching algorithm based on BRIEF descriptor for ins integrated navigation system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(8): 1238-1343.
- 陈方, 许允喜. 基于二进制比特串描述符的惯性组合导航高速景象匹配算法[J]. *光子学报*, 2011, **40**(8): 1238-1343.