

基于立体视觉的移动机器人导航算法

侯建¹, 鄂旭¹, 夏齐², 齐乃明²

(1. 渤海大学 信息科学与技术学院, 辽宁 锦州 121013;

2. 哈尔滨工业大学 航天工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:移动机器人立体视觉系统不仅提供三维地形图用于障碍规避和路径规划,其结果还可以用于视觉导航。以移动机器人立体视觉系统为基础,研究了基于前后两个位置上立体图对的视觉测量算法用于移动机器人的连续导航,讨论了影响导航精度的因素和改进方法;研究了基于局部和全局三维地形图的地形匹配算法用于定期校正位置误差,算法实现简便,定位精度取决于地形图精度。实验结果证明了两种方法的有效性,可以兼顾近距离和中远距离导航任务。

关键词:立体视觉;视觉测量;地形匹配

中图分类号:TP242.6

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)03-0106-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.03.027

A Navigation Algorithm for Mobile Robot Based on Stereo Vision

HOU Jian¹, E Xu¹, XIA Qi², QI Nai-ming²

(1. School of Information Science and Technology, Bohai University, Jinzhou 121013, China;

2. Department of Astronautic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Mobile robot stereo vision system not only provides 3D terrain map to be used in obstacle avoiding and path planning, but also lays the base for visual navigation. The visual odometry algorithm based on two stereo pairs is studied for application in continuous navigation. The factors related to navigation precision are discussed and improvement measures are presented. A terrain matching algorithm based on local and global terrain map is proposed for application in positioning error correction. The algorithm is simple and convenient and its precision depends mainly on the precision of terrain map. Experiments with analog lunar terrain indicate that these two algorithms are effective and can be used in close range and long range navigation.

Key words: stereo vision; visual odometry; terrain matching

0 引言

导航系统是移动机器人的重要组成部分,与导航系统关系紧密的视觉系统则负责提供移动机器人周围的三维地形图,为其障碍规避和路径规划提供依据。立体视觉是目前室外移动机器人研究中最常被采用的视觉模式。在利用视觉进行导航的领域,国内外已进行了大量研究,形成的方法大体上可以分为着陆器立体视觉^[1-2]、远点地标法^[3-5]、地形匹配法^[6-9]、视觉测量法^[10-12]以及其他算法^[13-15]。

文中讨论了两种利用立体视觉结果进行导航的算法:视觉测量法和地形匹配法。视觉测量法利用移动机器人在前后两个位置上拍摄的立体图对进行,可用于崎岖地形和坡度较大地区的连续导航;地形匹配法

利用移动机器人视觉系统提供的局部三维地形图和外部来源提供的全局地形图进行计算,可用于移动机器人位置的定期更新。这两种算法与航位推算法等常规方法相结合,可以兼顾移动机器人近距离和中远距离、连续导航与定期更新任务。

1 视觉测量法

视觉测量法利用前后两个位置上获得的立体图对进行,具体思路是:在两个立体图对中分别进行特征提取和立体匹配,然后在两个图对之间进行特征跟踪,利用这些特征在前后两个位置上车体坐标系中的三维坐标求解出两个车体坐标系之间的变换关系,进而得到车体的位置和姿态变化。

收稿日期:2013-05-15

修回日期:2013-08-24

网络出版时间:2014-01-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61171189);辽宁省教育科学研究一般项目(L2012400, L2012396, L2012397);博士后基金项目(2012M520158)

作者简介:侯建(1978-),男,博士,副教授,研究方向为计算机视觉与模式识别。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140108.0807.001.html>

通常情况下,一个视觉测量系统包含如下模块:特征检测、立体匹配、特征跟踪和运动估计。

(1) 特征检测。

为保证后续的特征匹配和跟踪的准确性,特征检测步骤应遵循两条原则,即特征足够明显并且在较大范围内均匀分布。文中首先采用 Harris 算子检测出角点,然后将一组网格叠加到左图上,选择每个网格中特征最强的点进入下一步的非最强特征点抑制处理。最后设置阈值,将大于阈值的特征点选中进入后续处理步骤。

(2) 立体匹配。

为便于后续检测车体三维运动信息,在每一个立体图对内对检测出的特征点进行立体匹配。对左图中每一个特征点,右图的搜索范围设定为上下三行,利用多个判据确定出最终匹配结果。

(3) 特征跟踪。

特征跟踪是确定前后两个位置车体的位置和姿态变换的关键步骤。具体跟踪过程如下:

①利用车载仪器估计出车体的位置和姿态变化,进而估计出前后两个与车体固连的世界坐标系的变换;

②利用估计的变换,将前一个立体图对中的景物点投影到后一个立体图对的图像中;

③以前一个立体图对中完成立体匹配的特征点作为基准点,在后一个立体图对中估计的坐标附近利用相关计算进行匹配,最后求解对应的景物点三维坐标。

(4) 运动估计。

理论上,给定若干个景物点在两个坐标系内的三维坐标,可以利用最小二乘法求解两个坐标系的变换。

$$\begin{bmatrix} x_{2i} \\ y_{2i} \\ z_{2i} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_{1i} \\ y_{1i} \\ z_{1i} \end{bmatrix} + T \quad (1)$$

这种方法简便易行且鲁棒性强,但缺点在于精度较低。因此实际应用中首先对特征点集进行优化。利用初始运动估计将前一个立体图对中的特征点变换到后一个立体图对中,计算出变换坐标和真实坐标的偏差,将偏差较大的一部分特征点去除,从而较大程度地提高特征点集的质量。接下来利用 RANSAC 随机子集方法计算出最终的运动估计。

2 地形匹配法

视觉测量法精度较高,但要求两个立体图对的相对位置和姿态变化不能太大,因此适用于复杂地形条件下的连续导航。

与视觉测量法不同,地形匹配法主要用于大范围

内移动机器人位置的确定。二维图像由于存在来源和拍摄距离方面的问题,一般不适合用于地形匹配。而三维地形图不受上述因素影象,可方便地用于地形匹配。

室外地形中一般存在局部的地势高点,如山顶、石块顶部等,这些高点之间有一定的几何关系,这种关系在局部地图和全局地图中都得到保持。因此可以利用这一关系对局部和全局地形图中的地势高点进行匹配,计算出局部地图在全局地图中的位置,进而推算出移动机器人的位置,这就是文中方法的原理。考虑到遮挡问题,文中没有将地势低点用于地形匹配。

考虑到全局地形图的分辨率较低,文中只用地形匹配法来估计移动机器人的位置和航向,俯仰和姿态信息利用车载测量仪器或其他手段获得。

局部与全局坐标系的转换如下:

$$\begin{bmatrix} X_g \\ Y_g \\ Z_g \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X_l \\ Y_l \\ Z_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos\varphi\sin\theta & \cos\varphi\cos\theta & -\sin\varphi \\ \sin\psi\sin\varphi\cos\theta - \cos\psi\sin\theta & \sin\psi\sin\varphi\sin\theta + \cos\psi\cos\theta & \sin\psi\cos\varphi \\ \cos\psi\sin\varphi\cos\theta + \sin\psi\sin\theta & \cos\psi\sin\varphi\sin\theta - \sin\psi\cos\theta & \cos\psi\cos\varphi \end{bmatrix}$$

其中 θ 、 φ 和 ψ 分别为偏航、滚动和俯仰角。

在已知俯仰和滚动角的前提下,对局部地形图进行姿态变换,使两个坐标系的 OXY 平面平行 ($\varphi = 0$ 和 $\psi = 0$)。再利用其他手段获得的移动机器人的大致位置计算出当地的平均高度,进而将局部与全局地形图的地面高度变换至相同,这样局部与全局坐标系的转换简化为下面的形式:

$$\begin{bmatrix} X_g \\ Y_g \\ Z_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_l \\ Y_l \\ Z_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

利用至少两个地势高点的局部和全局坐标即可求出移动机器人的位置和航向。

为提高地势高点的匹配准确度,采用以下两个判据:

(1) 候选高点与待匹配点的高度接近;

(2) 两个待匹配高点的距离 l_{local} 与两者各自的候选点的距离 l_{global} 接近,即

$$l_{\text{local}} - \delta < l_{\text{global}} < l_{\text{local}} + \delta \quad (4)$$

其中 δ 为一个阈值。

具体的算法步骤如下:

(1) 检测高点。

利用车载里程计或其他测量方法得到移动机器人的估计位置,由此在全局地形图中选择匹配的搜索区域。为检测出足够可靠的高点用于匹配,采用以下三

个判断:

- ①高点的高度为邻域内最大;
- ②高点高度大于某个阈值;
- ③相邻两个高点的最小距离大于某个阈值。

假定景物点高度的误差上限为 δ , 则为了保证局部地形图中的高点能够在全局地形图中可靠地检测到, 局部高点阈值 th_{local} 与全局高点阈值 th_{global} 应满足下面的关系:

$$th_{local} \geq th_{global} + \delta$$

(5)

这两个阈值的选取一般应保证局部地图中至少有两个高点。

(2) 计算候选点。

对于局部地形图中的一个地势高点, 利用高度接近的标准从全局地图中选择出候选点集合。

(3) 选择候选点组合。

若局部地形图中只有一个高点, 直接进入下一步。对于有两个地势高点的情况, 分别计算出两者在全局地形图中的候选点集合。对于两个候选点集合中的点的组合, 若满足(4)式, 则进入下一步, 否则去除这种组合。若局部地图中的地势高点大于两个, 则利用 RANSAC 随机子集方法, 从中随机选择 2 个组成一组, 按两个高点的方式进行处理, 最后选择变换偏差最小的一组进入下一步。

(4) 确定变换关系。

若局部地形图中只有一个地势高点, 对每个候选高点, 利用已知的姿态信息确定局部与全局地形图的变换, 进而将局部地形图中各点变换到全局坐标系中, 计算变换后各点高度与全局地形图在该点的高度差之和。以此偏差最小作为判断标准, 确定出正确的变换。

若局部地形图中有两个地势高点, 则对于每一个通过第(3)步的候选点组合, 中选择距离较大的两个用于计算变换, 进而将局部地形图转换到全局坐标系中, 用与前面相同的方法计算出正确的变换。

3 实验结果

在实验场地(见图 1)上对两种方法进行了实验验证。



图 1 实验场地

(1) 视觉测量。

将视觉平台水平向前移动 10 cm 的距离, 移动前后拍摄两个立体图对, 如图 2 所示。利用文中算法进行实验, 结果如表 1 (角度单位: $^{\circ}$, 长度单位: mm) 所示。

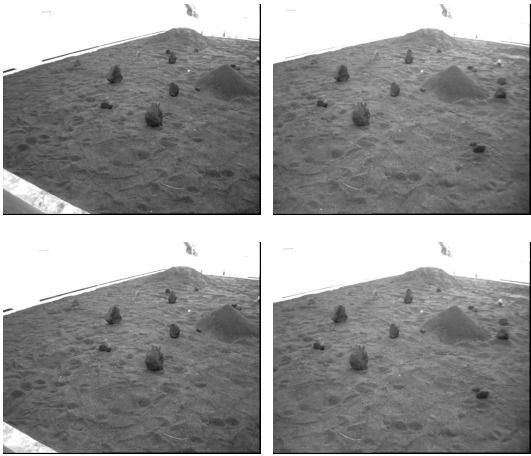


图 2 立体图对 1 和 2

表 1 视觉测量法实验结果

| 参数 | θ | φ | ψ | Tx | Ty | Tz |
|-----|----------|-----------|--------|-----|-----|-----|
| 准确值 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 |
| 初始值 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 |
| 计算值 | 0.4 | 0.8 | -0.8 | -4 | 87 | -15 |
| 初始值 | -1 | -2 | 2 | 10 | 80 | 7 |
| 计算值 | 0.8 | 1.3 | -0.4 | -22 | 97 | -15 |
| 初始值 | 1 | 1 | -2 | 8 | 120 | 12 |
| 计算值 | 0.8 | 1.3 | -0.4 | -22 | 97 | -15 |

从上面的结果可以看出, 视觉测量法可以在小距离变化的情况下给出比较准确的位置和姿态变化估计, 并可以承受相对较大的初始估计误差, 是一种比较好的相对导航方法, 可以用于坡度较大和地形特别崎岖区域的连续导航。

(2) 地形匹配。

将摄像机系统平台先后进行前移-前移-右移运动, 共得到 4 个位置上的图像, 每次移动距离均为 10 cm。各个位置上的重建地形如图 3 所示, 运动的测量与计算结果对比如表 2 (角度单位: $^{\circ}$, 长度单位: cm) 所示。

表 2 地形匹配法实验结果

| 位置 | | θ | Tx | Ty |
|-----|-----|----------|----|----|
| 1-2 | 测量值 | 0 | 0 | 10 |
| | 计算值 | 0 | 0 | 9 |
| 1-3 | 测量值 | 0 | 0 | 20 |
| | 计算值 | 1.26 | 0 | 18 |
| 1-4 | 测量值 | 0 | 10 | 20 |
| | 计算值 | -1.89 | 17 | 22 |

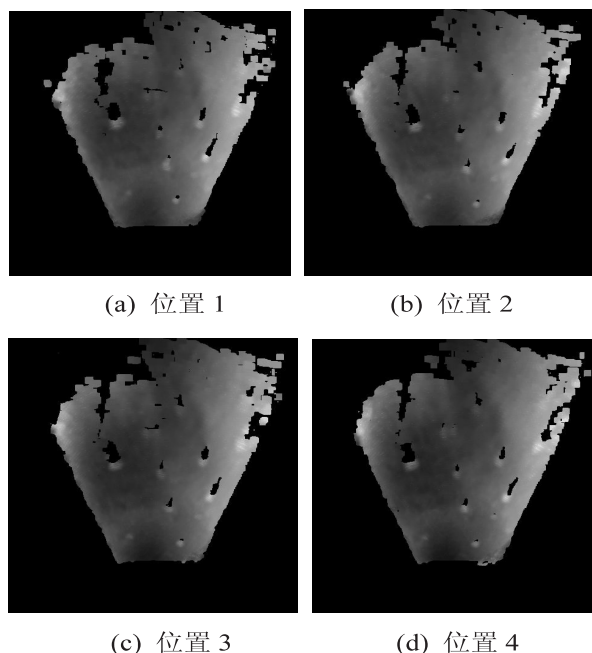


图3 三维地形图1—4

从表中结果可以看出,文中算法对于角度和位置变化量都给出了比较准确的估计,并在所有的实验中都准确完成了匹配,这验证了文中方法的有效性。

4 结束语

立体视觉系统给出的移动机器人周围的三维地形图不仅用于实现路径规划和障碍规避,还可用于确定自身位置。文中对视觉测量法进行了研究,并提出了一种利用全局与局部地形图中局部高点位置关系不变性实现定位的简便算法。算法的精度主要取决于三维地形图的精度,可用于长距离漫游中定期的位置更新任务。

参考文献:

- [1] Matthies L, Chen B, Petrescu J. Stereo vision, residual image processing and mars rover localization [C]//Proc of IEEE international conference on image processing. [s. l.]: [s. n.], 1997: 248–251.
- [2] Matthies L, Olson C, Tharp G, et al. Visual localization methods for mars rovers using lander, rover, and descent imagery [C]//Proc of 4th international symposium on artificial intelligence, robotics, and automation in space. [s. l.]: [s. n.], 1997: 413–418.

- [3] Matthies L, Shafer S. Error modeling in stereo navigation [J]. IEEE journal on robotics and automation, 1987, 3(3): 239–248.
- [4] Cozman F, Krotkov E. Position estimation from outdoor visual landmarks for teleoperation of lunar rovers [C]//Proc of IEEE workshop on applications of computer vision. [s. l.]: [s. n.], 1996: 156–161.
- [5] Cozman F, Krotkov E. Automatic mountain detection and pose estimation for teleoperation of lunar rovers [C]//Proc of IEEE international conference on robotics and automation. [s. l.]: [s. n.], 1997: 2452–2457.
- [6] Gennery D. Visual terrain matching for a mars rover [C]//Proc of IEEE conf on computer vision and pattern recognition. [s. l.]: [s. n.], 1989: 483–491.
- [7] Olson C. A probabilistic formulation for hausdorff matching [C]//Proc of IEEE conf on computer vision and pattern recognition. [s. l.]: [s. n.], 1998: 150–156.
- [8] Cozman F, Krotkov E, Guestrin C. Outdoor visual position estimation for planetary rovers [J]. Autonomous robots, 2000, 9(2): 135–150.
- [9] Johnson A, Willson R, Goguen J, et al. Field testing of the mars exploration rovers descent image motion estimation system [C]//Proc of IEEE international conf on robotics and automation. [s. l.]: [s. n.], 2005: 4463–4469.
- [10] Mallet A, Lacroix S, Gallo L. Position estimation in outdoor environments using pixel tracking and stereovision [C]//Proc of IEEE international conf on robotics and automation. [s. l.]: [s. n.], 2000: 3519–3524.
- [11] Bunschoten R, Krose B. Visual odometry from an omnidirectional vision system [C]//Proc of IEEE international conf on robotics and automation. [s. l.]: [s. n.], 2003: 577–583.
- [12] Litwin T. General 3D acquisition and tracking of dot targets on a mars rover prototype [C]//Proc of IEEE international conf on systems, man and cybernetics. [s. l.]: [s. n.], 2005: 443–449.
- [13] Cherubini A, Chaumette F. Visual navigation of a mobile robot with laser-based collision avoidance [J]. Journal of robotics research, 2012, 32: 189–205.
- [14] 侯艳丽. 基于模糊隶属度的并行彩色图像分割[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(8): 109–111.
- [15] 许宪东, 洪炳镕, 关毅, 等. 机器人视觉导航的几种特征点方法比较[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(Sup): 200–203.

《计算机技术与发展》欢迎订阅, 欢迎投稿!

基于立体视觉的移动机器人导航算法

作者：侯建, 鄂旭, 夏齐, 齐乃明, HOU Jian, E Xu, XIA Qi, QI Nai-ming

作者单位：侯建, 鄂旭, HOU Jian, E Xu(渤海大学 信息科学与技术学院, 辽宁 锦州, 121013), 夏齐, 齐乃明, XIA Qi, QI Nai-ming(哈尔滨工业大学 航天工程系, 黑龙江 哈尔滨, 150001)

刊名：计算机技术与发展

ISTIC

英文刊名：Computer Technology and Development

年, 卷(期):2014(3)

本文链接：http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201403027.aspx