

doi: 10.7690/bgzdh.2019.10.005

基准地图测绘下的视觉导航算法

薛 杨, 孙永荣, 赵科东, 赵 伟

(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

摘要: 针对 GPS 信号拒止环境下自主导航定位问题, 提出一种基于全局定位基准地图测绘的视觉导航算法。在卫星导航信号可用时, 利用同步定位与制图(simultaneous localization and mapping, SLAM)算法对使用场景制图, 利用时间戳与实时动态定位技术(real-time kinematic, RTK)将全局定位数据进行对齐, 使用在线 SLAM 算法载入全局定位基准地图并进行全局范围内的导航定位。实验结果表明: 该算法只需依赖视觉图像数据即可完成全局定位, 其定位和导航精度达到亚米级, 导航与定位的误差平均值为 0.36 m, 均方差为 0.31 m, 满足实际应用要求。

关键词: 视觉导航; 全局定位; 同步制图与定位; 实时动态定位; 离线对齐

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

Visual Navigation Algorithm Based on Standard Mapping

Xue Yang, Sun Yongrong, Zhao Kedong, Zhao Wei

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aiming at the problem of autonomous navigation and positioning under the circumstance of GPS signal rejection in wartime, a visual navigation algorithm based on global positioning reference map is proposed. Firstly, we map the scene by SLAM algorithm in non-wartime. To obtain the global positioning reference map, we align the global positioning data of RTK (real-time kinematic) by using the time stamp secondly. At last, we load the global positioning reference map by online SLAM algorithm, and the global navigation and positioning is running at the same time. The algorithm, which is able to complete the global positioning only according to the visual image data, is suitable for the applications of vehicle autonomous navigation. The result of the experiment shows that the accuracy of positioning and navigation reaches the level of decimeter. That is, the average error of navigation and positioning and the mean square deviation are 0.36 m and standard deviation is 0.31 m, which meets the requirements of practical applications.

Keywords: visual navigation; global positioning; SLAM; RTK; offline alignment

0 引言

在战时 GPS 拒止环境下, 车载全自主导航主要依赖于传统惯性导航系统^[1]。由于惯性导航系统长时间运行, 使导航定位的累计误差较大, 无法适用于长时间高精度导航需求, 需要寻求新的全自主导航定位方法。近年来, 视觉 SLAM 被广泛应用于无人机、机器人等领域, 能够根据图像序列完成局部环境内的地图绘制以及定位, 具有高度自主性和较高的定位精度^[2-3]。

最早较为实用的 SLAM 算法为 2007 年提出的并行跟踪与制图(parallel tracking and mapping, PTAM)算法。它首次将定位和地图创建分为 2 个单独的线程进行并使用了非线性优化, 体现出较好的实时性能^[4-5]。而后利用 ORB 特征^[6], 在上述算法的基础上^[7]提出了一种新型单目视觉 SLAM 系统(ORB-SLAM)。它将整个 SLAM 过程分为跟踪定位、局部地图创建和闭环检测等 3 个线程, 并引入

本质图以提升回环检测的速度。由于 ORB-SLAM 算法在工程上具有较好的实用性, 许多学者都是在 ORB-SLAM 算法的基础上进行完善, 以提升 SLAM 定位性能^[8-9]。

以上研究的单目 SLAM 所输出的定位数据是基于以初始帧位置为基准建立的坐标系。对导航定位系统来说, 缺乏真实世界的尺度信息^[10]; 因此, 需要在 SLAM 输出的基础上赋予物理尺度, 从而可应用到实际导航系统中。另外, 从原理上看, 单目 SLAM 系统的定位误差会随着时间变化而逐渐发散, 即使采用了回环检测与融合方法, 也只能在一定程度上减小其发散的程^[11]。在实际应用中, 缺乏尺度信息且误差发散的 SLAM 定位数据难以满足导航定位需求。

为了解决上述问题, 笔者提出一种基于全局定位基准地图测绘的视觉导航算法。该方法一方面可利用 RTK 将 SLAM 输出的无尺度位置信息转换为

收稿日期: 2019-06-12; 修回日期: 2019-07-26

作者简介: 薛 杨(1992—), 男, 江苏人, 硕士, 从事控制工程研究。E-mail: xueyang@nuaa.edu.cn。

全局定位数据；另一方面，采用定位点局部邻域范围内 RTK 获得高精度的 3 维位置，避免了 SLAM 随时间发散带来的精度损失。

1 基准地图测绘及全局定位算法

1.1 算法整体结构

笔者设计的在全局定位基准地图测绘下的视觉导航算法结构如图 1 所示，主要包括离线地图对齐和在线全局定位 2 个部分。

1) 离线地图对齐：通过在应用场景范围内同步采集 RTK 数据与图像数据，利用 ORB-SLAM 算法绘制 SLAM 无尺度地图，而后利用时间戳对齐图像帧的 SLAM 地图坐标和 RTK 坐标，并结合全局坐标变换估计算法计算 SLAM 坐标系与 RTK 坐标系之间的变换参数，从而建立全局定位基准地图。

2) 在线全局定位：通过载入全局定位基准地图，同时读取采集的图像序列，利用 SLAM 定位模式，来搜索和定位当前帧图像在 SLAM 坐标系下的位置，利用 SLAM 坐标系与 RTK 坐标系之间的映射关系，输出当前帧图像对应的相机所在的全局位置。

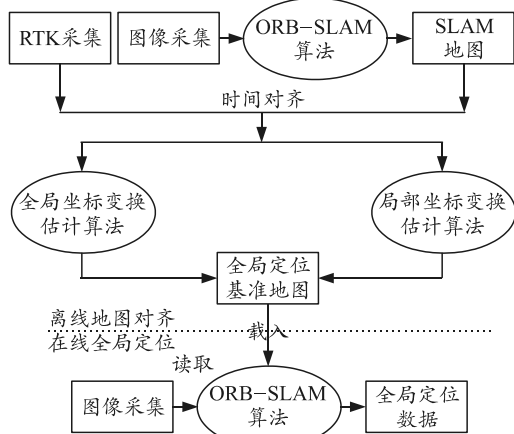


图 1 算法结构

1.2 单目 ORB-SLAM 算法

如图 2 所示，单目视觉 ORB-SLAM 算法主要分为 3 个并行的线程：特征追踪线程(主线程)、局部建图线程和回环检测优化线程。

1) 特征追踪线程主要负责地图初始化、特征点追踪以及失败后的重定位，追踪过程中需要提交关键帧给局部建图线程进行处理。

2) 局部建图线程主要负责局部地图的创建和优化，将特征追踪线程提供的关键帧插入到数据库中，从而不断地建立和更新局部地图。

3) 回环检测优化线程主要负责回环的检测及

全局捆集约束(bundle adjustment, BA)优化，利用回环检测优化可减小全局地图随时间积累的误差。

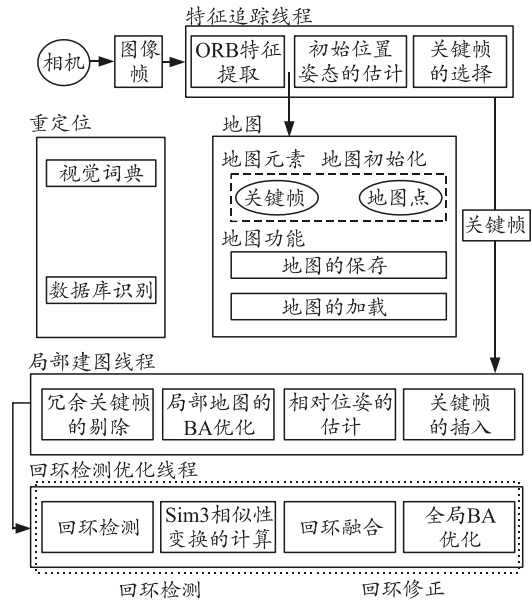


图 2 ORB-SLAM 算法结构

在 ORB-SLAM 中，采用的地图由不断筛选的关键帧和不断更新的空间 3 维地图点组成。为了后期全局地图绘制的需要，在此框架的基础上添加地图保存和加载功能。跟踪阶段下，通过添加按钮控件来实现地图主动实时保存和特征点跟踪丢失(如发生遮挡或侵略性运动)地图自动保存的 2 种方式；定位模式下，ORB-SLAM 能够自动加载具有全局定位基准的地图，完成全局的导航和定位。

2 基准地图下的定位算法

2.1 全局坐标变换估计算法

在全局定位基准地图测绘下的视觉导航算法中，图 3 使用了当地空间直角坐标系作为世界参考坐标系 W 。RTK 采集的数据被转化为当地空间直角坐标系 $O_r x_r y_r z_r$ 下的数据。在单目视觉 ORB-SLAM 系统下的导航坐标系为地图初始化时的相机坐标系 $O_v x_v y_v z_v$ (即 SLAM 坐标系)。

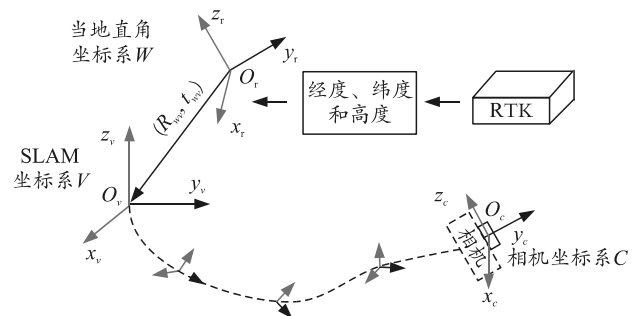


图 3 当地直角、SLAM 和相机坐标系之间的关系

ORB-SLAM 输出的 SLAM 坐标系下相机位置为 $\mathbf{c}_i = (x_i^v, y_i^v, z_i^v)^T (i=1,2,\dots,n)$, 对应 RTK 输出的真实位置为 $\mathbf{r}_i = (x_i^r, y_i^r, z_i^r)^T (i=1,2,\dots,n)$, 根据全局坐标变换估计算法, 则有

$$\mathbf{r}_i = s\mathbf{R}\mathbf{c}_i + \mathbf{t} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (1)$$

其中: S 为 SLAM 地图与 RTK 地图对齐后的绝对尺度; \mathbf{R} 为坐标系 $O_v x_v y_v z_v$ 变换到 $O_r x_r y_r z_r$ 的旋转矩阵; \mathbf{t} 为平移向量。

对于采集的 SLAM 图像和 RTK 2 组点的坐标集合, $\mathbf{c}_i = (x_i^v, y_i^v, z_i^v)^T$ 和 $\mathbf{r}_i = (x_i^r, y_i^r, z_i^r)^T$, 估计出两者之间的最优全局变换参数 $[\mathbf{R}, \mathbf{t}, s]$, 并将 SLAM 坐标下的地图点转换到 RTK 坐标下, 进行全局地图的导航与定位。

2.2 局部邻域坐标变换估计算法

在实际实验中发现, 利用全局坐标变换估计算法生成的全局一致性地图进行全局定位的误差较大, 并不能满足实际应用的定位精度需求。分析原因如下, 在回环检测之前, 视觉里程计的累积误差逐渐发散, 回环检测之后一定程度上减小了累积误差。从实验的结果中发现, 建立的具有累积误差特性的 SLAM 地图与 RTK 地图之间并不满足一致的坐标变换关系。为此, 笔者提出一种改进的局部邻域坐标变换估计算法, 以提高全局定位精度, 其算法示意图如图 4 所示, 主要包括坐标映射表的建立、邻域数据提取以及邻域定位等部分。

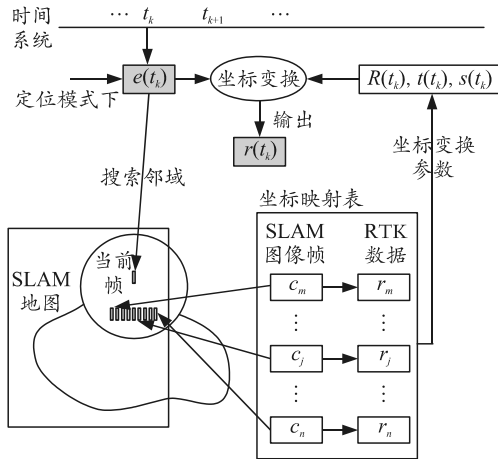


图 4 局部邻域坐标变换估计算法

对于采集的 SLAM 图像和 RTK 2 组点的坐标集合, $\mathbf{c}_i = (x_i^v, y_i^v, z_i^v)^T$ 和 $\mathbf{r}_i = (x_i^r, y_i^r, z_i^r)^T$, 首先建立从采集点 SLAM 坐标到 RTK 坐标的坐标映射表。

对于 t_k 时刻处采集到的图像帧, 利用

ORB-SLAM 系统构建的 SLAM 地图, 基于定位模式可确定当前时刻相机在 SLAM 地图中对应的位置, 即 SLAM 坐标 $\mathbf{c}(t_k)$ 。

基于上述坐标, 文中算法利用 t_k 时刻的 SLAM 坐标 $\mathbf{c}(t_k)$, 在 SLAM 地图中搜索距离 $\mathbf{c}(t_k)$ 位置点最近邻域内的若干个地图点, 记为 $(\mathbf{c}_m, \dots, \mathbf{c}_j, \dots, \mathbf{c}_n)$; 接着利用坐标映射表提取出对应的 RTK 坐标集合, 记为 $(\mathbf{r}_m, \dots, \mathbf{r}_j, \dots, \mathbf{r}_n)$, 基于上述 2 个坐标集合, 可用最小化均方差 $e^2(\mathbf{R}, \mathbf{t}, s)$ 来计算这 2 组对应点集的最优坐标变换:

$$\min_{\mathbf{R}, \mathbf{t}, s} e^2(\mathbf{R}, \mathbf{t}, s) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|\mathbf{r}_i - (s\mathbf{R}\mathbf{c}_i + \mathbf{t})\|^2 \quad (2)$$

基于上述最小化目标, 首先分别求取 2 组点集的质心, 分别记为

$$\boldsymbol{\mu}_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{c}_i, \quad \boldsymbol{\mu}_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{r}_i \quad (3)$$

然后将 2 组中心对齐, 分别记为

$$\mathbf{c}'_i = \mathbf{c}_i - \boldsymbol{\mu}_c, \quad \mathbf{r}'_i = \mathbf{r}_i - \boldsymbol{\mu}_r \quad (4)$$

接着分别求取 2 组数据的方差以及协方差, 分别记为:

$$\sigma_c^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|\mathbf{c}_i - \boldsymbol{\mu}_c\|^2 \quad (5)$$

$$\sigma_r^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|\mathbf{r}_i - \boldsymbol{\mu}_r\|^2 \quad (6)$$

$$\mathbf{S}_{cr} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\mathbf{r}_i - \boldsymbol{\mu}_r)(\mathbf{c}_i - \boldsymbol{\mu}_c)^T \quad (7)$$

将 \mathbf{S}_{cr} 进行奇异值分解得到 $\mathbf{S}_{cr} = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}^T$, 其中 $\mathbf{D} = \text{diag}(d_i), d_1 \geq d_2 \geq \dots \geq d_m \geq 0$, 经过推导变换可得:

$$e^2(\mathbf{R}, \mathbf{t}, s) = \sigma_r^2 - \frac{\text{tr}(\mathbf{D}\mathbf{S})^2}{\sigma_c^2} \quad (8)$$

基于最小化, 上述目标可计算出最优的 \mathbf{R} 、 \mathbf{t} 、 s 分别如下:

$$\mathbf{R} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T; \quad (9)$$

$$\mathbf{t} = \boldsymbol{\mu}_r - s\mathbf{R}\boldsymbol{\mu}_c; \quad (10)$$

$$s = \frac{1}{\sigma_c^2} \text{tr}(\mathbf{D}\mathbf{S}) \quad (11)$$

将计算出的该邻域范围内的坐标变换参数 $(\mathbf{R}, \mathbf{t}, s)$ 记为 $[\mathbf{R}(t_k), \mathbf{t}(t_k), s(t_k)]$, 进一步利用该坐标变换参数将当前时刻的 SLAM 坐标 $\mathbf{c}(t_k)$ 转换为 RTK 坐标 $\mathbf{r}(t_k)$, 从而完成全局定位。

从上述分析可以看出：通过对每一帧图像邻域内进行坐标估计算法输出的变换参数，可以实时动态地估计该邻域内每一帧图像的高精度位置，有效地解决了视觉 SLAM 地图随时间漂移发散而造成的全局地图与 RTK 不满足全局变换估计关系的问题。

3 实验结果与分析

3.1 实验平台

如图 5 所示，搭建实验平台对笔者提出的基准地图测绘下的视觉全局定位算法研究进行验证。实验平台所使用的设备型号及参数如下：

1) 硬件部分。

为了防止路况造成的抖动对相机帧数的跟踪，利用实验室现有设备，采用自带云台相机(图像分辨率为 1 280×720)的大疆经纬 M100 四旋翼飞行器，并搭载 Manifold 妙算开发板进行实验数据的采集和验证。所采用的 RTK 设备选用了 Novatel 公司型号为 Novatel OEM-615 接收机板卡，其定位的精度为 5 cm。

2) 软件部分。

利用 Manifold 妙算开发板搭载的 ROS 软件建立了 3 个节点：节点 1 采集相机上视频流数据并以消息的形式发布到设计的主题上；节点 2 是 RTK 采集，获取串口发过来的数据并以消息的形式发布到设计的主题上；节点 3 订阅上面 2 个节点发布的对应主题，获得对应的图像数据和 RTK 数据并保存，实现了图像和 RTK 数据的同步保存。综合考虑，将图像采集频率设置为 20 Hz 和 RTK 的采样频率设置为 5 Hz。



图 5 M100 四旋翼飞行器

在 ORB-SLAM 算法(https://github.com/BoomFan/ORB_SLAM2)代码的基础上，增加了用按钮控件实现的主动地图保存的模式，以便于对地图的实时保

存；同时添加了全局地图的载入功能，以便于能够根据具有全局定位基准的测绘地图进行实时的导航和定位。

3.2 结果分析

实验于 2018 年 8 月 1 日上午 6:00 在南京航空航天大学将军路校区内进行，实验时将 RTK 基站天线搭建在自动化学院 1 号楼的天台，以保证 RTK 信号能够覆盖较大范围且稳定有效。共进行了 2 组跑车实验，第 1 组用于制作全局定位基准地图，第 2 组用于测试视觉导航的定位精度。采集数据时均采集了 RTK 坐标数据和图像数据，并记录采集时刻。

基于第 1 组跑车实验的数据，ORB-SLAM 的实验结果如图 6 和图 7 所示。图 6 是对当前图像帧中特征进行提取的过程，田字方框表示当前图像帧匹配上的特征点；图 7 是建立回环融合的全局一致性地图，黑色点代表存储的全局 3 维地图点，矩形框区域的点代表局部地图正在更新的地图点。

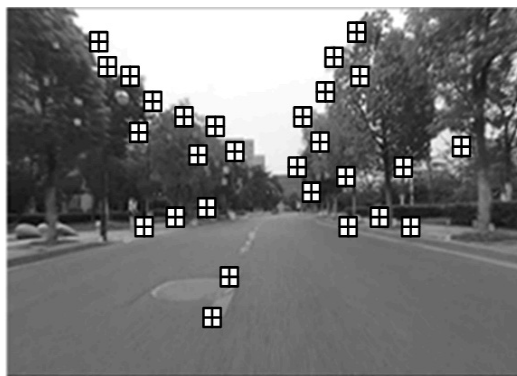


图 6 ORB-SLAM 跟踪阶段



图 7 ORB-SLAM 地图构建和定位

利用全局坐标变换估计算法来对齐 RTK 坐标和 SLAM 坐标。图中所选择的 RTK 坐标是基于开始时刻位置的东北天坐标系，对齐后的坐标变换参数如下：

$$R = \begin{pmatrix} 0.9512 & -0.0226 & -0.3077 \\ 0.3081 & 0.0227 & 0.9511 \\ -0.0145 & -0.9995 & 0.0286 \end{pmatrix}; \quad (12)$$

$$t = [257.678\ 4, 78.903\ 7, 0.973\ 3]^T; \quad (13)$$

$$s = 16.972\ 0. \quad (14)$$

利用局部邻域坐标变换估计算法来对齐 RTK 坐标和 SLAM 坐标, 对齐得到多组坐标变换参数 $(R_i, t_i, s_i), i=1, 2, \dots, n$ 。

基于上述全局坐标变换参数和局部邻域坐标变换参数下构建 2 种不同的全局定位基准地图, 对第 2 组跑车实验的数据进行全局定位, 并与 RTK 基准坐标进行对比, 结果如图 8 所示, RTK 的轨迹如图 8 中细实线, 利用全局坐标变换估计算法进行全局定位的轨迹如图中 Vision-1 对应的粗实线, 利用改进的局部邻域坐标变化估计算法进行全局定位的轨迹如图中 Vision-2 对应的虚线。

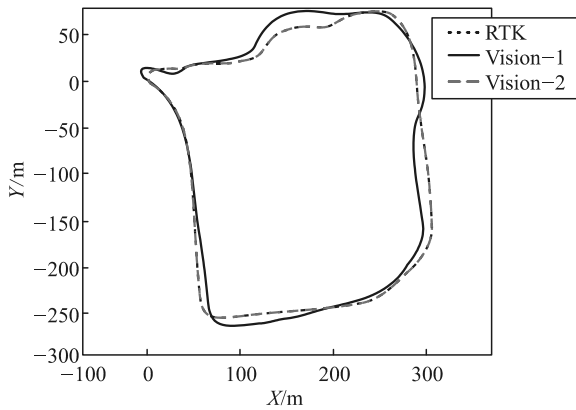


图 8 全局对齐算法、局部邻域对齐算法和 RTK 轨迹

在 Google 地图坐标系下, 绘制了 RTK 的轨迹如图 9 中的细黑线所示。利用全局坐标变化估计算法进行全局定位的轨迹如图中 VISION-1 白色轨迹所示。利用改进的局部邻域坐标变化估计算法进行全局定位的轨迹如图中的 VISION-2 灰色轨迹所示。



图 9 在 Google 地图坐标系下的真实轨迹

图 10 是基于全局和局部邻域对齐算法在空间直角坐标系下的定位误差分析。定位误差的统计特性如表 1 所示。由表 1 和图 10 可知: 全局坐标变换

估计算法定位误差平均值为 11.58 m, 均方差为 6.86 m, 而基于改进的局部邻域坐标变换估计算法定位误差平均值为 0.36 m, 均方差为 0.31 m, 具有较高的定位精度。

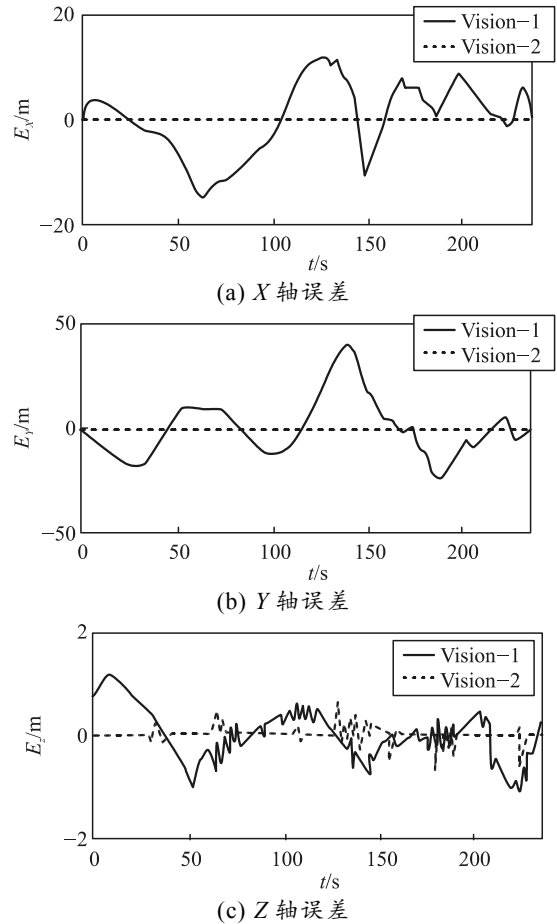


图 10 全局和局部邻域对齐算法的定位误差

表 1 定位误差的统计特性 m

序列	X 轴方向	Y 轴方向	Z 轴方向	3 维空间
全局均值	5.912 7	8.688 6	0.379 1	11.575 6
局部均值	0.199 0	0.228 0	0.066 3	0.358 3
全局方差	4.105 0	7.313 2	0.308 8	6.856 4
局部方差	0.223 4	0.259 2	0.103 6	0.308 9

4 结论

笔者将单目视觉 ORB-SLAM 与 RTK 相结合, 提出了一种仅依靠单目视觉在全局定位基准测绘地图下的导航定位算法, 设计了实验平台并进行验证。实验结果表明: 该方法在无 GPS 的情况下, 导航定位的误差平均值为 0.36 m, 均方差为 0.31 m, 在不依赖 GPS 信号时能够实现高精度定位。

参考文献:

[1] CHEN C, ZHU H. Visual-inertial SLAM method based on optical flow in a GPS-denied environment[J]. Industrial Robot, 2018, 45(3): 401-406.

- [2] 周源, 王希彬. 无人机 SLAM 避障技术研究[J]. 兵工自动化, 2015, 34(11): 78-81.
- [3] 周绍磊, 吴修振. 一种单目视觉 ORB-SLAM/INS 组合导航方法[J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24(5): 633-637.
- [4] KLEIN G, MURRAY D. Parallel tracking and mapping for small AR workspaces[C]. Nara, Japan, 7 IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), 2007: 225-234.
- [5] SONG S, CHANDRAKER M, GUEST C C. Parallel, real-time monocular visual odometry[C]. Karlsruhe, GERMANY: 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2013: 4698-4705.
- [6] 王朋月, 毛征, 张晨. 基于 ORB 特征匹配的全局运动估计[J]. 兵工自动化, 2017, 36(12): 43-47, 51.
- [7] MUR-ARTAL R, MONTIEL J M M, TARDOS JUAN D. ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(5):

1147-1163.

- [8] SUJIWO A, ANDO T, TAKEUCHI E, et al. Monocular vision-based localization using ORB-SLAM with LIDAR-Aided mapping in real-world robot challenge[J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2016, 28(4): 479-490.
- [9] MUR-ARTAL R, TARDOS J D. ORB-SLAM2: An Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo, and RGB-D Cameras[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(5): 1255-1262.
- [10] BESCOS B, FACIL J M, CIVERA J, et al. DynaSLAM: Tracking, Mapping, and inpainting in Dynamic Scenes[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(4): 4076-4083.
- [11] SHIOZAKI T, DISSANAYAKE G. Eliminating Scale Drift in Monocular SLAM Using Depth from Defocus[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(1): 581-587.

(上接第 21 页)

3.2.3 着陆模式 III 下垂直速度的影响分析

腿式缓冲平台在该模式下着陆时, 呈现右腿先着陆, 左腿后着陆的 2-2 形式。由图 9 可知: 偏移量整体趋势随时间逐渐增大, 在 0.045 s 左右有一向下的波动而回到原点, 最大偏移随垂直速度的增大而减小, 且数值小于着陆模式 II。腿式缓冲平台在右腿先着陆时 ZMP 开始偏移并逐渐增大, 而左腿着陆的二次冲击起到重置 ZMP 偏移量的作用, 随后重新随时间的增加而逐渐增大。该重置作用能减小平台的最大偏移, 增强稳定性。

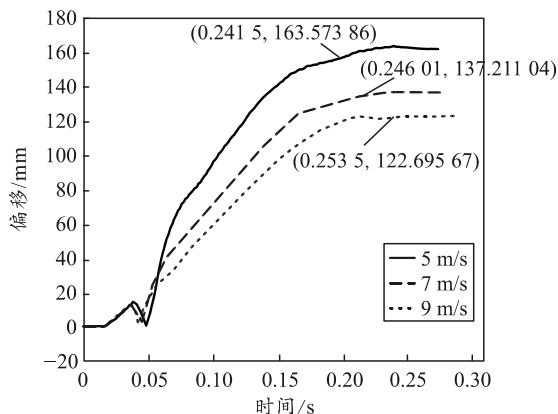


图 9 不同垂直速度下 ZMP 偏移量响应

4 结论

笔者以 ZMP 理论为基础, 得出腿式缓冲平台 ZMP-四边形法则和 ZMP 偏移量法则稳定性判据, 并建立腿式缓冲平台动力学模型, 运用该判据对平

台进行了稳定性分析, 得到平台的各参数响应规律。结果表明: 该判据能判断平台稳定性和响应趋势, 可为腿式缓冲平台的进一步优化设计提供参考。

参考文献:

- [1] 李建阳, 王红岩, 芮强, 等. 空投缓冲气囊有限元模型修正方法[J]. 兵工学报, 2015, 36(4): 752-757.
- [2] 吕哲源, 王红岩, 洪煌杰, 等. 空投设备气囊缓冲系统的缓冲特性分析与匹配方法[J]. 装甲兵工程学院学报, 2014, 28(4): 34-39.
- [3] 丁幼亮, 耿方方, 葛文浩, 等. 多塔斜拉桥风致抖振相应的粘滞阻尼器控制研究[J]. 工程力学, 2015, 32(4): 130-137.
- [4] 李波, 吴晓涵, 宋和平, 等. 某框架-剪力墙结构采用粘滞阻尼器减震效果分析[J]. 机构工程师, 2017, 33(3): 116-125.
- [5] VUKOBRATOVIĆ M, STEPANENKO J. On the stability of anthropomorphic systems[J]. Mathematical Biosciences, 1972, 15(1/2): 1-37.
- [6] 罗昌杰, 邓宗全, 刘荣强, 等. 基于零力矩理论的腿式着陆器着陆稳定性研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(9): 38-45.
- [7] LEE D, TAYLOR D P. Viscous damper development and future trends[J]. The structural design of tall buildings, 2001, 10(5): 311-320.
- [8] 欧进萍, 丁建华. 油缸间隙式粘滞阻尼器理论与性能试验[J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19(4): 82-89.
- [9] JIA J H, DU J Y, HUA H X. Design method for fluid viscous dampers[J]. Archive of Applied Mechanics, 2008, 78(9): 737-746.