

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2021.01.002

基于步进式运动模型的单兵协同导航算法设计

穆 华, 潘献飞, 吴美平, 胡小平

(国防科技大学智能科学学院, 长沙 410073)

摘 要: 基于足部微惯性测量单元(MIMU)和超宽带测距的协同导航技术是一种解决卫星信号受限环境下单兵自主导航难题的有效途径。根据零速修正辅助的惯性解算特点,建立了一种单兵协同导航模型,协同导航状态为各单兵的位置和航向,系统输入为足部MIMU提供的每步位移和航向增量。将算法与相关文献中提出的两种算法进行了对比分析,该算法的优点是无需对足部惯导模块做任何改动和进行反馈修正,易于工程实现且不损失精度。通过三人协同导航试验分析了算法的性能,数据分析表明协同导航在不同条件下可以不同程度地改善系统的定位性能。

关键词: 单兵导航; 协同导航; 足部MIMU; 超宽带测距

中图分类号: TP29

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 2095-8110(2021)01-0014-07



Design of the Cooperative Navigation Algorithm for Soldiers Based on Stepwise Motion Model

MU Hua, PAN Xian-fei, WU Mei-ping, HU Xiao-ping

(College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Cooperative navigation technology based on foot-mounted MIMU and UWB (ultra-wide banded) ranging is an effective solution to the problem of autonomous navigation of the soldiers in the GNSS-denied environment. A cooperative navigation model is proposed by analyzing the characteristics of the ZUPT aided inertial navigation. In the system model, the states are the positions and yaw angles of all the soldiers and the inputs are displacements and increments of yaw angles of each step provided by the foot-mounted MIMU. Comparisons are made between the proposed algorithm and the other two algorithms from the relevant literature. The advantage of the proposed algorithm is easy to be implemented since the cooperative navigation module does not require any modifications on the foot-mounted MIMU module. The performance of the algorithm is analyzed with a field experiment by three pedestrians. The data analysis shows that cooperative navigation can improve the positioning performance of the system to different extents under different conditions.

Key words: Soldier navigation; Cooperative navigation; Foot-mounted MIMU; UWB ranging

0 引言

单兵等作战人员通常在未知环境中执行任务,

用于定位的外界信息(地图、卫星等)可用性受限,单兵如何自主定位是近几年研究的热点和难点问题。基于足部微惯性测量单元(Micro Inertial

收稿日期:2020-10-10;修订日期:2020-10-22

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0601701)

作者简介:穆华(1981-),女,博士,副教授,主要从事导航技术方面的研究。E-mail: muhua_nudt@hotmail.com

Measurement Unit, MIMU) 和单兵间测距的协同导航技术是一种解决卫星信号受限环境下单兵自主导航难题的有效途径。

通过在人体上固联 MIMU 进行惯性导航解算是一种新的单兵导航技术。该技术具有隐蔽性、抗干扰性和自主性等优势,具有应用于单兵自主导航系统的潜力。1999 年,Elwell 首先提出了零速修正 (Zero Velocity Update, ZUPT) 算法^[1]。美国 InterSense 公司的 Foxlin 于 2005 年首次设计了足部安装 MIMU 的单兵惯导系统^[2],并于 2009 年开发了单兵定位模块 NavShoe,测试精度达到 1% 里程。之后主流的单兵自主导航研究大多基于足部安装的 MIMU,针对 ZUPT 算法中航向角不可观的问题,寻求不同的方法修正航向角漂移误差。一种方法是引入磁罗盘^[2],但是磁罗盘容易受到环境磁场的干扰;另外一种方法是引入位置参考,如全球定位系统 (Global Positioning System, GPS)^[3]、建筑物平面图^[4]、事先布设的电子标签 (Radio Frequency Identification, RFID)^[5] 以及单兵之间的距离测量^[2,6-7] 等。在上述手段中,引入单兵间距离测量即在多个单兵间进行协同导航 (Cooperative Navigation, CN)。这种手段可以在多人之间实现导航资源共享,并且不需要事先布设设施,也不依赖环境特征,自主性更好^[8]。

2005 年 Foxlin 提出了单兵协同导航的思想^[2]。之后,一些先进的应急人员定位系统也采用了协同导航方案,如美国国土安全部资助研发的先进消防员定位系统 GLANSER^[9],以及瑞典相关机构提出的单兵协同导航系统^[6] 等。值得注意的是,上述单兵协同导航方案均采用了新型超宽带 (Ultra-Wideband, UWB) 测距技术。这是由于与传统射频测距技术相比,UWB 测距技术具有测量精确、抗干扰能力强、抗多径误差能力强、功耗较低等优势;同时与激光、超声等距离测量手段相比,UWB 测距技术具有较强的穿透能力。

协同导航系统是一种分布式系统,协同导航算法的设计难点之一在于如何建立合适的协同导航系统模型,尽量降低系统的通信需求。复杂的通信需求会制约系统的可实现性和可靠性。文献^[10] 仅以位置作为状态变量,建立协同导航系统的运动方程,将位置的估计结果反馈到各单兵进行惯性导航系统误差修正;实验数据处理结果验证了算法的有效性。文献^[7] 在足部 MIMU 模块采用步进式惯

导解算,以位置和航向角作为状态变量,建立协同导航系统的运动方程,无需反馈修正;在模拟 UWB 测距数据的条件下对该算法进行了验证。

为了促进单兵协同导航系统的实际应用,本文设计了一种基于步进式运动模型的协同导航算法。与文献^[7] 不同,本文足部模块仍然采用一般的 ZUPT 辅助的惯导解算,而无需采用步进式惯导解算。本文和文献^[10] 采用不同的协同导航系统模型,分析了同一组协同导航试验数据,试验结果可以互相印证各自算法的正确性。文献^[10] 仅给出了一种参数设置下的导航结果,而本文分析了不同条件下的导航结果,更全面地展示了协同导航在提高定位精度方面的表现。

1 单兵协同导航系统组成

单兵协同导航系统是一个包含若干个单兵节点的网络,每个单兵节点的基本导航设备包含足部 MIMU 模块、进行节点间距离测量的 UWB 模块、进行数据收集及计算的处理板,以及在单兵间进行数据传输的无线数传模块。

足部 MIMU 模块的传感器包括三轴陀螺、三轴加表、磁力仪和气压高度计,进行基于 ZUPT 的惯导解算,具有独立的导航定位能力。

本文选用的 UWB 模块采用双向飞行时间法进行高精度距离测量,模块 A 向模块 B 发送测距请求信号,模块 B 接收并处理后发送应答信号。可见,测距结果由测距发起者得到。对于无线电波,天线越高对传播越有利。因此,UWB 模块安装在头部或肩部。

单兵之间采用 900MHz 频段的无线数传模块。这个频段无线电波的穿透能力可以轻松地在室内/城市环境下实现数百米远距离传输,数据速率可达 10kbit/s 甚至更高。

处理板收集足部惯导解算信息和 UWB 测距信息,并与无线数传模块之间进行数据传输。足部惯导解算信息通过蓝牙发送给处理板,UWB 信息通过有线连接发送给处理板,处理板和无线数传模块之间通过 Wi-Fi 互连。

本文研究的单兵协同导航系统最小组成如图 1 所示。除了上述基本导航设备外,单兵的其他导航设备如卫星接收机、视觉里程计等都可以纳入协同导航系统中。



图1 单兵协同导航系统硬件配置示意图

Fig. 1 Hardware configuration diagram of the cooperative navigation system for soldiers

2 单兵协同导航算法设计

单兵协同导航算法设计的核心在于单兵运动建模,运动模型决定了是否需要足部惯导解算进行反馈修正,同时运动模型的维数直接影响协同导航系统的通信量和计算量。本文建立了单兵的步进式运动模型,仅以单兵位置和航向角为状态变量,且无需对惯导解算进行反馈修正。

2.1 协同导航系统模型

1) 建模思路

足部 MIMU 模块采用 ZUPT 辅助的惯性导航算法。在单兵行走的每一步,存在一个脚部静止的零速阶段。通过零速检测算法检测零速阶段,并把零速作为虚拟观测,可以修正足部惯导解算的速度误差和水平姿态角误差,但是不能有效修正航向角误差。航向角误差累积会影响定位精度。

以一段连续 ZUPT 结束时刻为一步的开始时刻,此时,足部 MIMU 的水平姿态角误差很小。再加上初始速度为 0,所以一步的定位误差主要由起始时刻的航向误差引起。对于每一步的惯导解算,可以利用一个中间导航坐标系,将初始航向误差从导航结果中分离出来,得到误差不累积的位移增量和航向增量信息。

以单兵位置和航向为状态变量,以单兵每步的位移增量和航向增量为系统输入,建立单兵的步进式运动模型。所有单兵的步进式运动模型组合成协同导航系统的状态方程,结合单兵间距离观测方程,建立协同导航系统模型。

2) 一步惯性导航解算

取东北地坐标系为导航坐标系,并且定义姿态

矩阵

$$\mathbf{C}_n^b = \mathbf{M}_1[\gamma]\mathbf{M}_2[\theta]\mathbf{M}_3[\psi] \quad (1)$$

其中, $\mathbf{M}_i[\cdot]$ ($i = 1, 2, 3$) 为初等转换矩阵; γ 、 θ 、 ψ 分别为滚动角、俯仰角和方位角。

考虑一步行走过程,设一步起始时刻 MIMU 的姿态角为 $(\gamma_0, \theta_0, \psi_0)$,一步包含 L 次惯导解算,第 l ($l = 1, 2, \dots, L$) 次姿态解算的结果为

$$\mathbf{C}_{b,l}^n = \mathbf{C}_{b,0}^n \mathbf{C}_{b,1}^{b,0} \mathbf{C}_{b,2}^{b,1} \dots \mathbf{C}_{b,l}^{b,l-1} \quad (2)$$

记 $h_l \triangleq h_l(\omega_1^b, \dots, \omega_l^b) = \mathbf{C}_{b,1}^{b,0} \mathbf{C}_{b,2}^{b,1} \dots \mathbf{C}_{b,l}^{b,l-1}$, 则

$$\mathbf{C}_{b,l}^n = \mathbf{C}_{b,0}^n h_l \quad (3)$$

由于一步起始时刻的速度为 0,第 l 次速度解算的结果为

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_l^n &= \int \mathbf{g}^n dt + (\mathbf{C}_{b,l}^n \mathbf{f}_l^b + \mathbf{C}_{b,l-1}^n \mathbf{f}_{l-1}^b + \dots + \mathbf{C}_{b,1}^n \mathbf{f}_1^b) dt \\ &= \int \mathbf{g}^n dt + \mathbf{C}_{b,0}^n (h_l \mathbf{f}_l^b + h_{l-1} \mathbf{f}_{l-1}^b + \dots + h_1 \mathbf{f}_1^b) dt \end{aligned} \quad (4)$$

第 l 次位移增量的结果为

$$\begin{aligned} d\mathbf{p}_l^n &= \mathbf{V}_1^n dt + \mathbf{V}_2^n dt + \dots + \mathbf{V}_l^n dt \\ &= \frac{l(l+1)}{2} \mathbf{g}^n dt^2 + \mathbf{C}_{b,0}^n [h_l \mathbf{f}_l^b + \dots + h_1 \mathbf{f}_1^b] dt^2 \end{aligned} \quad (5)$$

由于

$$\mathbf{C}_{b,0}^n = \mathbf{M}_3[-\psi_0]\mathbf{M}_2[-\theta_0]\mathbf{M}_1[-\gamma_0] \quad (6)$$

并且 $\mathbf{M}_3[\psi_0]\mathbf{g}^n = \mathbf{g}^n$,因此在式(3)~式(5)两端左乘 $\mathbf{M}_3[\psi_0]$,得

$$\mathbf{M}_3[\psi_0]\mathbf{C}_{b,l}^n = \mathbf{M}_2[-\theta_0]\mathbf{M}_1[-\gamma_0]h_l \quad (7)$$

$$\mathbf{M}_3[\psi_0]\mathbf{V}_l^n = \int \mathbf{g}^n dt + \mathbf{M}_2[-\theta_0]\mathbf{M}_1[-\gamma_0] \cdot (h_l \mathbf{f}_l^b + \dots + h_1 \mathbf{f}_1^b) dt \quad (8)$$

$$\mathbf{M}_3[\psi_0]d\mathbf{p}_l^n = \frac{l(l+1)}{2} \mathbf{g}^n dt^2 + \mathbf{M}_2[-\theta_0]\mathbf{M}_1[-\gamma_0] \cdot [h_l \mathbf{f}_l^b + \dots + h_1 \mathbf{f}_1^b] dt^2 \quad (9)$$

式(7)~式(9)相当于在一个中间导航坐标系 n' 中的惯性导航计算过程,这个坐标系与导航坐标系 n 之间的关系为

$$\mathbf{C}_b^{n'} = \mathbf{M}_3[\psi_0]\mathbf{C}_b^n \quad (10)$$

在中间导航坐标系 n' 中获取的位移增量和航向增量与初始航向 ψ_0 无关。由式(9),一步结束时 ($l = L$) 在中间导航坐标系 n' 和导航坐标系 n 中位移增量的关系为

$$d\mathbf{p}'_s = \mathbf{M}_3[\psi_0]d\mathbf{p}_s \quad (11)$$

3) 步进式运动模型

利用 n' 系中一步位移增量 $d\mathbf{p}'_s$,可得 n 系下的步进式运动模型

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_s \\ \chi_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{s-1} + \mathbf{M}_3[-\chi_{s-1}]d\mathbf{p}'_s \\ \chi_{s-1} + d\psi_s \end{bmatrix} + \mathbf{w}_s \quad (12)$$

其中,变量 \mathbf{x}_s 表示第 s 步结束时 MIMU 在 n 系下的位置;变量 χ_s 表示第 s 步结束时 MIMU 的航向角; \mathbf{w}_s 表示第 s 步的位移增量误差和航向增量误差,其方差根据第 s 步惯性导航解算结果计算。

记 $\mathbf{X}_s = [\mathbf{x}_s \ \chi_s]^T, \mathbf{u}_s = [d\mathbf{p}'_s \ d\phi_s]^T$, 步进式运动模型(12)可记为

$$\mathbf{X}_s = f(\mathbf{X}_{s-1}, \mathbf{u}_s) + \mathbf{w}_s \quad (13)$$

4) 协同导航系统状态模型

设 N 个单兵进行协同导航,协同导航系统的状态方程由 N 个单兵的步进式运动模型组成

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}_{s1}^1 \\ \vdots \\ \mathbf{X}_{si}^i \\ \vdots \\ \mathbf{X}_{sN}^N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(\mathbf{X}_{s1-1}^1, \mathbf{u}_{s1}^1) \\ \vdots \\ f(\mathbf{X}_{si-1}^i, \mathbf{u}_{si}^i) \\ \vdots \\ f(\mathbf{X}_{sN-1}^N, \mathbf{u}_{sN}^N) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{w}_{s1}^1 \\ \vdots \\ \mathbf{w}_{si}^i \\ \vdots \\ \mathbf{w}_{sN}^N \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中,上标 i 表示单兵编号,下标 si 表示单兵 i 的第 si 步 ($i=1,2,\dots,N$)。注意,除了齐步行进,相同时刻不同单兵的步数通常是不一样的。

协同导航系统的观测方程为

$$r_t^{i,j} = \|\mathbf{x}_{si}^i - \mathbf{x}_{sj}^j\|_2 + v_t^{i,j} \quad (15)$$

$$j=1,2,\dots,N, \quad i \neq j$$

其中, $r_t^{i,j}$ 表示 t 时刻单兵 i 和单兵 j 之间的距离测量; $v_t^{i,j}$ 表示距离测量噪声。

式(14)和式(15)组成协同导航系统模型。距离观测使得各单兵导航状态不再独立,而是成为了相关变量。

2.2 步进式协同导航算法

建立协同导航系统模型之后,采用 Kalman 滤波进行协同导航计算,信息流程如图 2 所示。

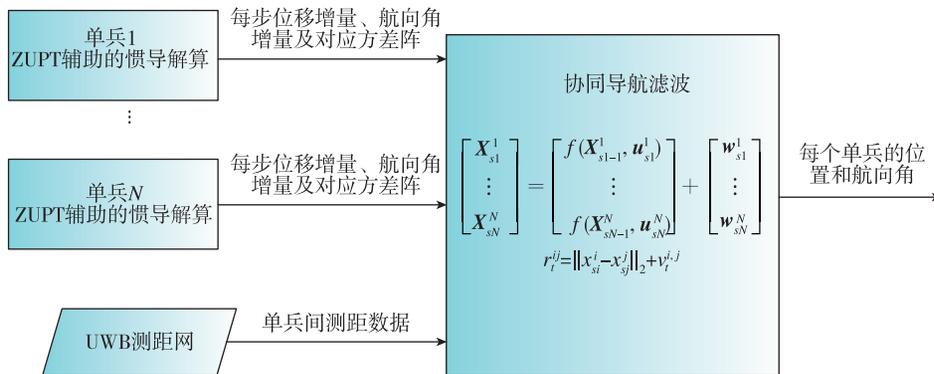


图 2 步进式协同导航算法信息流程图

Fig. 2 Information flow chart of the cooperative navigation algorithm based on stepwise localization

考虑将某个单兵作为协同中心,涉及的通信如下:

1) 足部模块将每步增量及方差阵发送给处理板,再通过无线数传模块发送到协同中心的处理板,发送频率为每步 1 次,发送数据为一个 4 维向量和一个 4×4 的对称矩阵;

2) 测距数据由协同中心的 UWB 模块收集,并传输到协同中心的处理板。

2.3 协同导航算法比较

比较本文、文献[7]以及文献[10](算法信息流程见图 3)三种算法。从算法结构上看,文献[10]的算法是带反馈修正的闭环结构,本文和文献[7]则是开环结构。

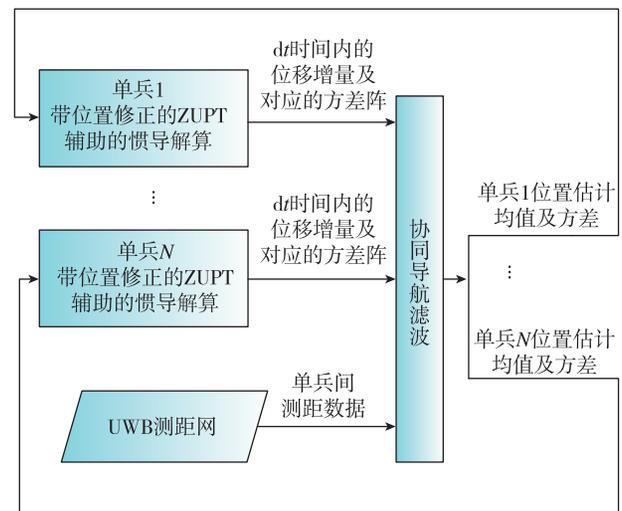


图 3 反馈式协同导航算法信息流程图

Fig. 3 Information flow chart of the cooperative navigation algorithm with feedback

本文算法与文献[7]中的算法相比,通信量是一样的,区别在于本文算法中足部模块并不进行步进式惯导解算,协同导航中心步进式运动模型的输入(每步在 n' 坐标系的位移增量和航向增量)是根据足部惯导解算结果转换得到的。

可见,本文步进式协同导航算法的优点是无需改变足部惯导算法,且无需进行反馈修正,这对系统模块化设计及系统工程实现具有重要意义。

3 单兵协同导航试验分析

3.1 试验条件

3名试验人员,分别标记为100、101和102,在校园马路上开展协同导航试验。3人行走在一条马路的两侧,100走外侧,101和102走内侧,且101在102的前面。100和102行走时长约1400s,行走1圈回到各自的起点;101行走时长约1000s,中途退出协同导航。每人足部安装MIMU模块,肩部安装UWB模块和卫星接收机。MIMU模块中惯性测量单元的主要性能指标如表1所示。试验人员101的差分GPS轨迹见图4,图中红点是GPS输出的定位结果,蓝线是没有GPS输出的地方拟合的路线。

表1 MIMU的性能指标
Tab.1 MIMU performance

指标	微陀螺	微加速度计
量程	$\pm 2000(^{\circ})/h$	$\pm 16g$
零偏稳定性	$\leq 10(^{\circ})/h$	0.05mg



图4 试验人员101的差分GPS轨迹

Fig.4 Pedestrian 101 trajectories given by differential GPS

3.2 定位精度分析

对试验数据进行事后处理,对比分析不同条件下独立导航和协同导航的定位精度。

1) 足部惯导模块定位结果

足部惯导模块进行ZUPT辅助的惯导解算,可

以独立给出单兵轨迹。惯导轨迹精度受两方面的影响,一是初始对准的航向精度,二是ZUPT参数(如零速检测阈值^[11]和零速观测噪声方差)。采用三轴磁力仪确定初始对准的航向,其精度取决于磁场环境以及磁力仪的磁干扰补偿精度。ZUPT参数对轨迹形状影响较大。

参数设置一:

在足部定位算法中,零速检测算法和器件噪声参数设置是相同的。在进行事后处理时,通过调整ZUPT参数和初始航向,可以使解算轨迹更接近参考轨迹。采用表2所示ZUPT参数,得到轨迹如图5所示。

表2 ZUPT参数

Tab.2 Parameters for zero-velocity correction

人员ID	零速检测阈值	零速观测噪声/(m/s)
100	2×10^5	0.015
101	1×10^5	0.01
102	12×10^5	0.03

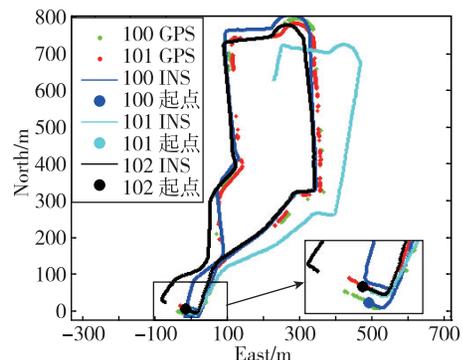


图5 3人足部惯导模块解算轨迹(参数设置一)

Fig.5 The trajectories of three pedestrians given by the foot-mounted MIMU(Parameter setting 1)

可见,100和102的惯导解算定位精度较高,101的航向在行走早期阶段出现了较大偏差,但是轨迹形状并不失真。

参数设置二:

对于在线实现,无法保证初始对准的航向精度及采用最优的ZUPT参数,此时,足部惯导模块定位精度会降低。当3人都采用100的ZUPT参数设置,并且100采用磁力仪确定的初始航向(与参数设置一中的航向相差 5°),得到轨迹如图6所示。此时,101的定位结果没有显著变化,而102的定位精度显著降低。

2) 无GPS条件下的协同导航结果

分别采用参数设置一和参数设置二,仅利用足

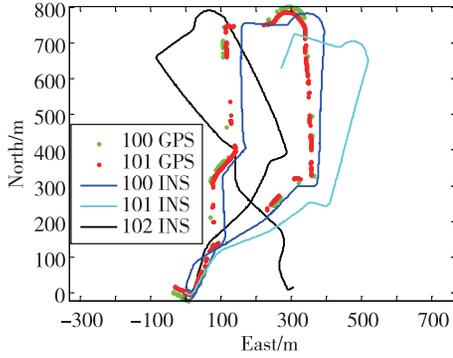


图 6 3 人足部惯导模块解算轨迹(参数设置二)

Fig. 6 The trajectories of three pedestrians given by the foot-mounted MIMU(Parameter setting 2)

部惯导模块和 UWB 测距模块,采用本文算法进行协同导航,定位轨迹分别如图 7 和图 8 所示。

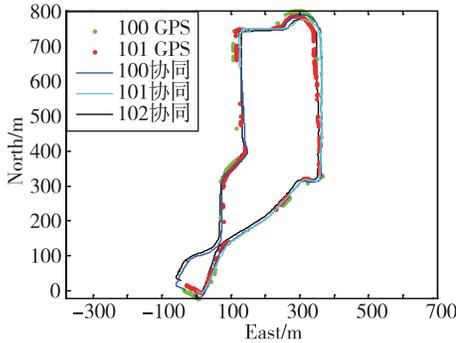


图 7 3 人协同导航轨迹(参数设置一,无 GPS)

Fig. 7 Cooperative navigation trajectories of three pedestrians (Parameter setting 1 without GPS)

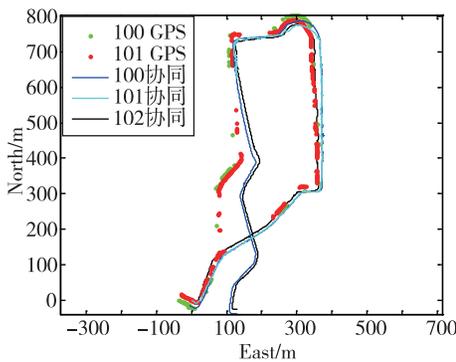


图 8 3 人协同导航轨迹(参数设置二,无 GPS)

Fig. 8 Cooperative navigation trajectories of three pedestrians (Parameter setting 2 without GPS)

对于参数设置一,协同后,101 的航向偏差得到了有效修正,3 人的定位精度都有提高。

对于参数设置二,在前期 3 人协同阶段,3 人协同定位的精度都有提升;而在后期仅有 100 和 102 协同的阶段,102 的自定位误差影响了协同导航的效果,在 102 定位误差降低的同时,100 的定位误差反而有所增加。

3) 有 GPS 条件下的协同导航结果

对于参数设置二,将 100 在 3 个时刻的 GPS 观测数据(见表 3)加入协同导航,定位轨迹如图 9 所示。可见,单个试验人员少量的 GPS 位置修正可以有效提高每个人的定位精度。

表 3 参与协同导航的 GPS 观测数据

Tab. 3 GPS data utilized in cooperative navigation

时刻/s	406	850	1269
北向,东向/(m, m)	(260, 264)	(802, 295)	(353, 92)

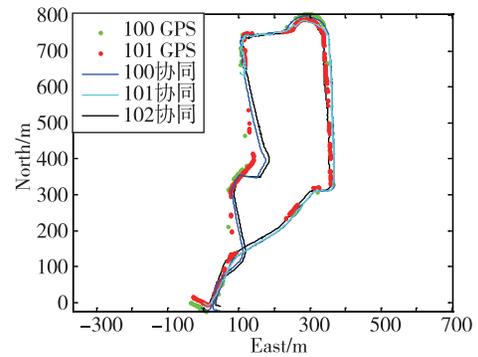


图 9 3 人协同导航轨迹(参数设置二,带 GPS)

Fig. 9 Cooperative navigation trajectories of three pedestrians (Parameter setting 2 with GPS)

4) 不同试验条件下的定位精度

为了定量评估不同试验条件下的定位精度,以差分 GPS 输出的定位结果为参考值,按照式(16)计算不同试验条件下的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)

$$e = \sqrt{\sum_{i=1}^N (\hat{x}_i - x_i)^2 / N} \quad (16)$$

其中, x_i 表示某时刻差分 GPS 的定位参考; \hat{x}_i 表示相应时刻的导航定位结果; N 表示差分 GPS 参考点的个数。不同条件下 100 和 101 的定位 RMSE 如表 4 所示。

表 4 不同试验条件的定位精度
Tab. 4 RMSE in different conditions

组别	100 RMSE/m	101 RMSE/m
参数一惯导	15.6	100.0
参数一 UWB 协同	14.4	19.9
参数二惯导	35.5	137.8
参数二 UWB 协同	45.6	22.9
参数二 UWB+GPS 协同	22.9	14.6

4 结论

本文利用足部惯性导航解算每步步长和航向增量误差不累积的特点,建立了单兵的步进式运动模型,由此设计的协同导航算法无需反馈修正,具有模块化和低通信量的优势,易于工程实现。对一次 3 人协同导航的试验数据进行了详细分析,结果表明:

1) 在每个成员初始对准误差小、ZUPT 参数优化的情况下,仅利用测距的协同导航可以使每个成员都获得高精度的定位结果;

2) 当初始对准和 ZUPT 无法确保最优时,仅利用测距的协同导航可以提高整体的平均定位精度,但不一定能提高每个成员的定位精度,增加单个成员少量的卫星观测则可以显著提高每个成员的定位精度。

单兵协同导航技术未来的发展主要集中在两个方向:一是提高足部惯导模块的导航性能,这一方面可以通过提高器件精度来实现,另一方面可以通过引入学习算法实现零速检测参数的在线优化;二是充分利用实际环境中可能存在的多种导航信息源,将 UWB 基站、卫星接收机、视觉/惯性组合导航系统、随机信号导航系统等纳入协同导航系统中,以提高协同导航系统的可靠性和可用性。

参考文献

- [1] Elwell J. Inertial navigation for the urban warrior [C]// Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering, 1999: 196-204.
- [2] Foxlin E. Pedestrian tracking with shoe-mounted inertial sensors[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2005, 25(6): 38-46.
- [3] Godha S, Lachapelle G. Foot mounted inertial system for pedestrian navigation[J]. Measurement Science and Technology, 2008, 19(7): 075202.
- [4] Krach B, Robertson P. Integration of foot-mounted inertial sensors into a Bayesian location estimation framework[C]// Proceedings of 5th Workshop on Positioning Navigation and Communication. IEEE, 2008.
- [5] Ruiz A R J, Granja F S, Honorato J C P, et al. Accurate pedestrian indoor navigation by tightly coupling foot-mounted IMU and RFID measurements [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 61(1): 178-189.
- [6] Rantakokko J, Rydell J, Stromback P, et al. Accurate and reliable soldier and first responder indoor positioning: multisensor systems and cooperative localization[J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(2): 10-18.
- [7] Nilsson J O, Zachariah D, Skog I, et al. Cooperative localization by dual foot-mounted inertial sensors and inter-agent ranging [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2013(1): 164.
- [8] 潘献飞, 穆华, 胡小平. 单兵自主导航技术发展综述 [J]. 导航定位与授时, 2018, 5(1): 1-11.
Pan Xianfei, Mu Hua, Hu Xiaoping. A survey of autonomous navigation technology for individual soldier [J]. Navigation Positioning and Timing, 2018, 5(1): 1-11(in Chinese).
- [9] Huseth S, Dewberry B, Mccroskey R. Pulsed-RF ultrawideband ranging for the GLANSER GPS-denied emergency responder navigation system [C]// Proceedings of 2011 International Technical Meeting of the Institute of Navigation. San Diego, CA, 2011.
- [10] Zhang S F, Pan X F, Mu H. A multi-pedestrian cooperative navigation and positioning method based on UWB technology[C]// Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Artificial intelligence and Information Systems. Dalian, China, 2020.
- [11] Chen C, Chen Z, Pan X, et al. Assessment of zero-velocity detectors for pedestrian navigation system using MIMU[C]// Proceedings of 2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC). Suzhou, China, 2016: 128-132.

(编辑:李瑾)