

基于惯性/磁力传感器的行人 3 维轨迹跟踪技术

郑 威, 彭 刚

(华中科技大学自动化学院图像处理与智能控制教育部重点实验室, 湖北 武汉 430070)

摘 要: 为实现行人 3 维轨迹跟踪, 采用惯性测量单元和电子罗盘组成的导航模块, 固联于步行者鞋面上, 根据行人步行运动的周期特性, 结合四元数法和改进的航姿参考系统算法对步行姿态角尤其是航向角进行高精度估计. 在分析速度误差产生原因的基础上, 提出一种新的零速度校正技术, 并利用行人垂直方向的步行速度判断步行状态, 对高度进行补偿, 实现了对行人 3 维轨迹的高精度跟踪. 通过直线往返行走、矩形线路行走、上下楼梯等实验, 验证了本文方法的有效性和可行性, 实验中 2 维轨迹精度在 0.5 m 左右, 3 维轨迹精度在 1 m 左右.

关键词: 航向角误差校正; 零速度校正; 轨迹跟踪; 惯性导航

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2016)-04-0444-07

3D Pedestrian Trajectory Tracking Based on Inertial/Magnetic Sensors

ZHENG Wei, PENG Gang

(Key Laboratory of Education Ministry for Image Processing and Intelligent Control,
School of Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: To achieve 3D pedestrian trajectory tracking, a navigation block tied to the walkers' shoes is used, which combines inertial measurement unit (IMU) and electronic compass to track pedestrian trajectory. Regarding the characteristics of pedestrian movement cycle, an improved Attitude and Heading Reference System (AHRS) algorithm with quaternion is considered to accurately estimate the walking attitude, and especially the heading. After analyzing kinds of reasons for velocity errors, a new zero velocity update algorithm is developed. Height compensation is realized through judging pedestrian walking state according to the vertical walking speed, and thus 3D pedestrian trajectory is accurately tracked. Some experiments are conducted to demonstrate the effectiveness and feasibility of the proposed method, including straight line round-trip walking, rectangle line walking, and walking up-and-down stairs. In the experiments, the deviation of the 2D trajectory is about 0.5 m and the deviation of the 3D trajectory is about 1 m.

Keywords: heading error calibration; zero velocity update; trajectory tracking; inertial navigation

1 引言 (Introduction)

基于惯性/磁力传感器的行人 3 维轨迹跟踪主要用于行人在无基础固联设施的已知或未知的环境下实现自主导航和实时定位. 仅采用惯性器件的导航系统可以为行人实现自主式轨迹跟踪^[1], 然而由于惯性测量单元 (IMU) 的漂移以及运动噪声的影响, 若不加以处理, 步行轨迹误差将随时间以 3 次方的趋势发散, 导致导航精度降低或完全无法导航^[2]. 为了减小 IMU 引起的误差, 文 [3] 采用 WiFi 与 IMU 的组合系统进行导航, 文 [4] 则采用步幅和建筑物方向辅助的方式进行导航. 此外, 也有人采用融合室内地图的方法进行个人室内导航^[5]. 这些方法虽然能够提高导航精度, 但均需事先提供外部信息, 而在许多情况下, 这些信息无法获取或

很难获取, 故其应用范围受到了限制. 而在仅采用惯性传感器的方案中, 如文 [6] 仅采用惯性传感器进行轨迹跟踪, 虽然取得了部分成果, 但此方案由于陀螺仪的漂移, 导致航向角最终会发散, 故该方案仅适用于短时轨迹跟踪, 也可采用高精度的陀螺仪延长轨迹跟踪时间; 文 [7] 在增加磁力计的基础上, 首先对行人进行建模, 采集平均步长, 然后再将平均步长融合到轨迹估计中, 该方案虽然可行, 但由于针对不同人员, 需修改相关参数, 故该方案对人员的适应性较差, 适用于特定人员的轨迹跟踪场景. 而在航向角融合方面, 文 [8] 利用梯度下降法, 并同时采用磁力计与加速度计来修正陀螺仪, 该算法计算量较小且能较准确地计算航向角, 但磁力计的误差会扩散至整个姿态角, 导致整体精度降低; 文 [9] 则采用扩展卡尔曼滤波器, 利用自适应

的方法来调整测量噪声的协方差进行航向角的最佳估计, 该算法计算的航向角虽然具有一定的抗干扰能力, 但计算量较大, 并不适合实时轨迹跟踪; 因此, 在无外界信号的情况下, 研究采用惯性/磁力传感器来提高行人的定位和导航精度显得尤为重要.

2 行人轨迹跟踪系统结构 (Structure of the pedestrian trajectory tracking system)

导航测量单元是轨迹跟踪系统的核心硬件单元, 通常由多种传感器组成, 为了尽量避免环境的影响, 本文只选用三轴加速度计、陀螺仪和磁力计作为导航测量单元. 姿态解算是算法核心, 本文利用捷联惯导系统 (SINS) [10], 使用改进的 9 自由度航姿参考系统 (attitude and heading reference system, AHRS) 算法解算完备的姿态信息 [11]. 结合人行走时脚背的运动特性, 设计零速度校正算法, 对行走轨迹作实时修正, 提高轨迹跟踪精度, 算法结构如图 1 所示.

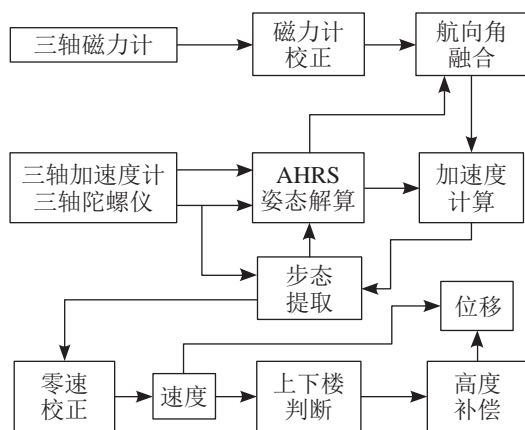


图 1 行人轨迹跟踪系统算法结构图

Fig.1 Algorithm structure of the pedestrian trajectory tracking system

3 AHRS 姿态解算 (AHRS attitude algorithm)

用于表示姿态的方法有四元数、欧拉角和方向余弦等, 各有优缺点. 常用的基于四元数的 AHRS 算法 [12-13], 使用 6 轴或 9 轴融合, 6 轴融合采用三轴陀螺仪和三轴加速度计进行融合来解算姿态角, 而 9 轴融合在 6 轴融合的基础上增加一个三轴磁力计, 进行 9 轴融合来解算姿态角. 一般的 AHRS 9 轴融合算法是在数据层融合, 即直接将陀螺仪、加速度计与磁力计的原始数据融合, 而由于磁力计存在误差且易受干扰, 在数据层融合易将误差扩散至俯仰角与滚转角, 从而影响整个姿态角的解算精

度. 本文提出一种航向角特征级融合算法, 即将陀螺仪、加速度计计算的航向角与磁力计计算的航向角进行融合, 该方法不仅能够有效地抑制航向角的偏移, 还不影响俯仰角与滚转角的解算精度.

3.1 磁力计椭圆校正及倾角补偿

磁力计测量的是地磁场强度, 然而由于地球磁场分布不均、外部磁场的干扰以及磁力计的安装误差等因素的影响, 需对磁力计进行校正.

对于其偏移和畸变, 可采用如下方法对其进行校正: 将传感器固定于一点, 测量不同方向的多组磁力数据, 将这组数据进行归一化处理, 理想情况下, 这些点应该分布在半径为 1 的球面上. 由于存在偏移和比例误差, 实际贴近的是一个椭球面. 故需要对磁力计进行偏移和椭圆校正. 其偏移采用式 (1) 计算, 畸变率采用式 (2) 计算.

$$m_{\text{offset}} = \frac{-(m_{j\text{max}} + m_{j\text{min}})}{2} \quad (1)$$

$$d_j = \frac{m_{j\text{max}} - m_{j\text{min}}}{m_{j\text{max}} - m_{j\text{min}}} \quad (2)$$

其中, m_j 为各轴磁力数据, m_{offset} 为偏移值, d_j 为畸变率, max 与 min 分别代表最大值和最小值, j 取 x 、 y 、 z .

磁力计校正前后的对比如图 2 所示.

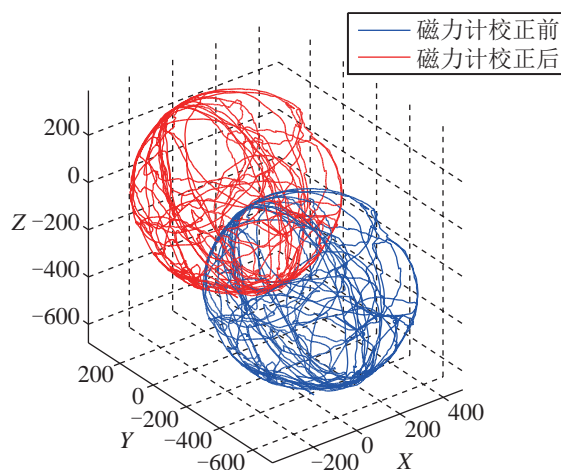


图 2 磁力计校正

Fig.2 Magnetometer calibration

在系统初始化时, 需要用加速度计和磁力计提供初始姿态角, 而由于磁力计姿态一般并不水平, 如果不对磁力计进行倾角补偿, 将给航向角计算带来较大的误差, 故必须对磁力计进行倾角补偿, 其补偿原理如下.

本文约定, 系统采用笛卡儿坐标系, y 、 p 、 r 分别为绕 Z 、 Y 、 X 轴的旋转角. 系统旋转顺序为 Z 、 Y 、 X . 则参考坐标系 O_1 到载体坐标系 O_2 的旋

转矩阵为

$$C_{12} = \begin{pmatrix} C_{yp} & S_y C_p & -S_p \\ C_y S_{pr} - S_y C_r & S_{ypr} + C_{yr} & C_p S_r \\ C_{yr} S_p + S_{yr} & S_{yp} C_r - C_y S_r & C_{pr} \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中, C_{yp} 表示 $\cos y \times \cos p$.

将 C_{12} 矩阵求逆 (即转置), 可得 O_2 到 O_1 的变换矩阵 C_{21} . 令 $y = 0$, p 和 r 可由重力向量和加速度计测量值计算得到, 则可得磁力计的倾角补偿矩阵 M_{21} . 最终磁力计倾角补偿公式为

$$H = M_{21} \times M \quad (4)$$

式中, $M = [m_x, m_y, m_z]^T$, H 为补偿后的磁场值.

3.2 姿态角解算与航向角融合

本文提出一种航向角特征级融合算法, 分为实时融合和定时融合两个阶段. 实时融合阶段使用磁力计来实时修正航向角, 定时融合阶段定期采用融合后的航向角更新四元数, 以使陀螺仪的积分漂移定期清零. 算法流程图如图 3 所示.

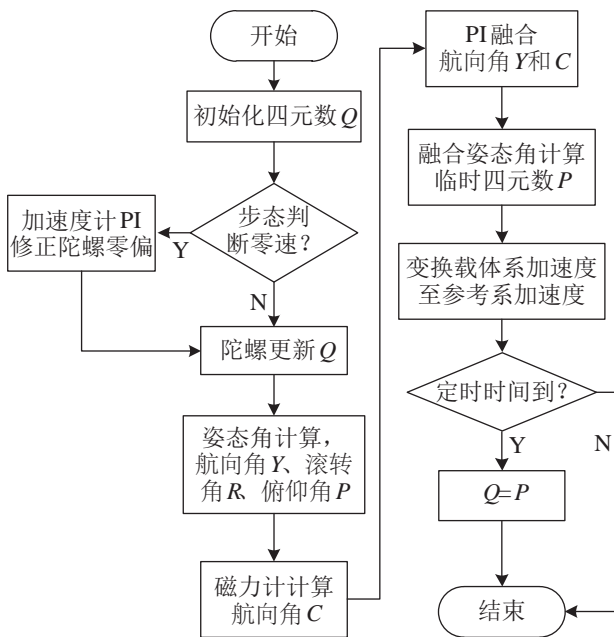


图 3 姿态解算算法流程图

Fig.3 Flowchart of the attitude algorithm

在使用加速度与陀螺仪进行 6 轴融合时, 会用到 2 个矩阵: 欧拉角旋转矩阵 (式 (3)) 和四元数旋转矩阵 (式 (5)).

$$Q_{21} = \begin{pmatrix} 1 - 2q_2^2 - 2q_3^2 & 2q_1q_2 - 2q_0q_3 & 2q_0q_2 + 2q_1q_3 \\ 2q_0q_3 + 2q_1q_2 & 1 - 2q_1^2 - 2q_3^2 & 2q_2q_3 - 2q_0q_1 \\ 2q_1q_3 - 2q_0q_2 & 2q_0q_1 + 2q_2q_3 & 1 - 2q_1^2 - 2q_2^2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

由 $C_{21} = Q_{21}$, 可解算出姿态欧拉角 y 、 p 、 r . 根据欧拉角和式 (6) 又可计算四元数 $q = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T$.

$$\begin{cases} q_0 = C_{y'p'r'} + S_{y'p'r'} \\ q_1 = C_{y'p'}S_{r'} - S_{y'p'}C_{r'} \\ q_2 = C_{y'}S_{p'}C_{r'} + S_{y'}C_{p'}S_{r'} \\ q_3 = S_{y'}C_{p'r'} - C_{y'}S_{p'r'} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $y' = y/2$, $p' = p/2$, $r' = r/2$.

在步行过程中, 加速度计受到外力的影响, 不能正确地反映脚背的运动姿态, 如果一直将加速度计与陀螺仪进行 6 轴融合, 将影响姿态角的解算精度, 故采取分时融合的办法. 当步态检测为零速阶段时, 采取加速度计与陀螺融合的方式进行计算; 而当步态检测为非零速阶段时, 仅采用陀螺进行姿态角解算. 此外, 加速度计并不能修正航向角, 因此由陀螺积分得到的航向角会产生偏移, 故需使用磁力计对航向角进行补偿. 本文设计一种 PI 算法, 对航向角进行实时补偿, 取到了较好的效果. 其补偿公式为

$$\begin{cases} E_i = c_i - h_i \\ h_i = y_i + E_i \times k_p + \sum_{i=0}^n E_i \times k_i \end{cases} \quad (7)$$

其中, c 、 y 与 h 分别为罗盘计算的航向角、陀螺计算的航向角以及融合的航向角; k_p (本文取 0.065) 与 k_i (本文取 0.0002) 分别为比例系数与积分系数.

由于陀螺仪漂移较慢, 而磁力计易受干扰, 为避免过度融合, 需对偏差及偏差和限幅, 如式 (8):

$$\begin{cases} |E_i| < T_1 \\ \left| \sum_{i=0}^n E_i \times k_i \right| < T_2 \end{cases} \quad (8)$$

其中 T_1 (本文取 20) 与 T_2 (本文取 6) 分别为比例限幅幅值与积分限幅幅值.

由于陀螺在短时间内漂移较小, 而磁力计在不受干扰的情况下比较稳定, 但其精度较差, 故 k_p 与 k_i 取值较小, 以使融合角缓慢收敛于罗盘. 但由于积分限幅, 最终还是会随着陀螺的漂移而一起漂移, 故还需引进一个定时融合, 当定时时间到后采用融合后的姿态角计算的四元数 p 更新姿态解算中的四元数 q , 这样陀螺积分引起的偏移就会定期清除, 以使航向角最终收敛.

实物航向角静态融合效果如图 4 所示. 每隔 6 ms 进行一次实时融合, 每隔 2 min 进行一次定时

融合, 航向角采样周期为 0.6 s, 总运行时间 14 min 左右. 由图可知, 陀螺计算的航向角在 2 min 内漂移了 3° 左右, 而融合后的航向角与磁力计计算的航向角误差不到 1°, 且融合角是稳定的.

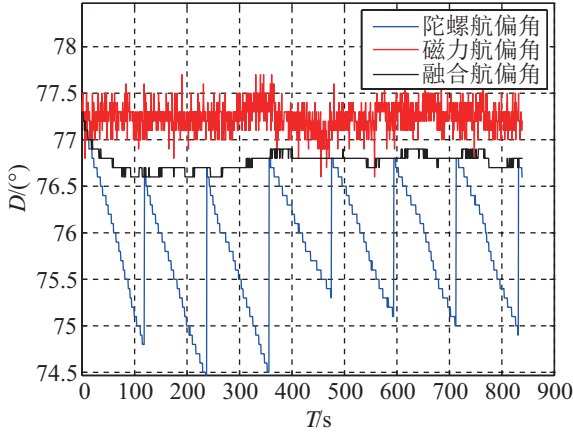


图 4 航向角融合
Fig.4 Heading fusion

图 5 为航向角融合前后的步行轨迹对比图. 实验步数为 157 步, 轨迹为从 1 楼上 3 楼, 步行一段长直线, 然后从另一边楼梯下到 1 楼, 最后返回原点, 总步行时间为 202 s.

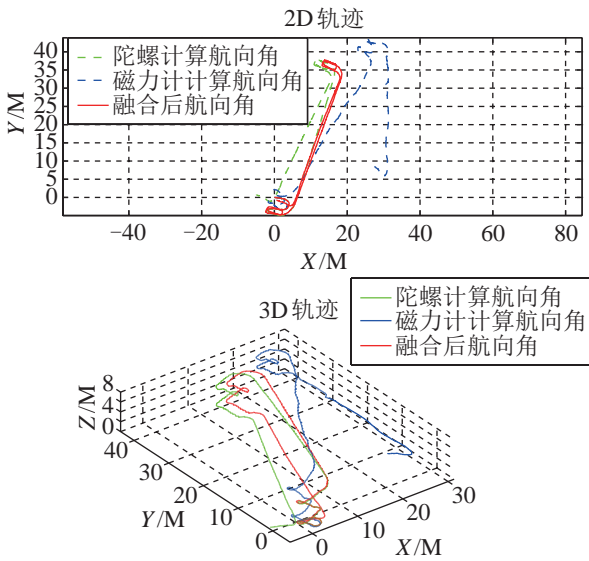


图 5 航向角融合前后步行轨迹对比图

Fig.5 Contrast figure of the pedestrian trajectory before and after heading fusion

由图 5 可知, 在动态过程中, 只采用陀螺仪计算的航向角会随时间缓慢漂移; 而只采用磁力计计算的航向角, 由于地磁场分布不均、外部磁场的干扰及倾角补偿不准确等因素的影响, 导致磁力计计算的航向角误差较大; 而采取本文所述算法后, 能够有效地改善航向角的漂移, 从而提高步行轨迹跟踪精度.

4 步态提取 (Gait extraction)

步态提取的主要工作是判断何时脚掌离开地面以及何时脚掌接触地面, 是行人轨迹跟踪算法重要的环节之一, 其提取准确率直接影响轨迹计算的精度.

考虑到微处理器计算速度和系统实时性的要求, 并不允许进行太复杂的滤波处理. 本文利用角速度和加速度联合的方式进行步态提取, 分别对世界坐标系下的 3 轴加速度的平方和以及 3 轴角速度的平方和进行低通滤波. 然后根据逻辑判断对步态进行提取, 其判断逻辑如下:

$$C_1 = \begin{cases} 1, & \frac{a_f^2}{100000} > T_{a_f^2\text{-max}} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

$$C_2 = \begin{cases} 1, & \frac{\omega_f^2}{100000} > T_{\omega_f^2\text{-max}} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

其中, a_f^2 、 ω_f^2 分别为经过低通滤波后的世界坐标系下的 3 轴加速度平方和和 3 轴角速度平方和; $T_{a_f^2\text{-max}}$ (本文取 400)、 $T_{\omega_f^2\text{-max}}$ (本文取 22) 为阈值, 具体阈值根据实际情况, 以步态最少误分为原则, 通过实验进行选取.

在只使用 C_1 或 C_2 条件的情况下, 容易存在误判, 且分割点不够准确造成位移计算有偏差, 本文采取条件分割的方式, 其逻辑为

$$C = \begin{cases} 1, & (C_1 = 1 || C_2 = 1) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (11)$$

图 6 所示试验为短距离直线往返走, 总步数为 11 步, 步行时间为 20 s.

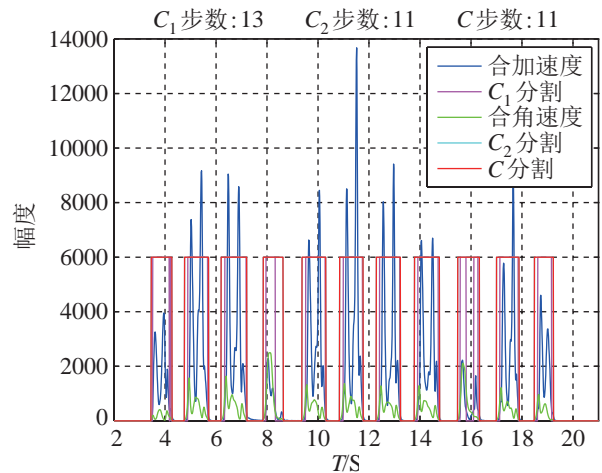


图 6 步态分割

Fig.6 Gait segmentation

单独采用 C_1 或 C_2 分割都会存在误判, 而采用 C 分割的方式, 则大大降低了误判率, 取得了较好的实验结果. 更多实验结果见表 1.

表 1 步数提取
Tab.1 Steps extraction

实验编号	C_1	C_2	C	实际步数
1 (短直线)	13	11	11	11
2 (矩形)	39	39	39	39
3 (长直线)	60	60	60	60
4 (上下二楼)	112	111	111	110
5 (上下三楼)	160	158	157	157

5 速度与位移计算 (Velocity and displacement calculation)

由于行人的轨迹只能通过加速度二重积分得到, 故加速度一个较小的噪声都能使位移产生巨大的变化. 因此, 必须对速度和位移给予校正与补偿.

5.1 零速度校正

零速度校正可以对行走轨迹进行实时修正, 提高跟踪精度. 零速度校正的主要处理方法有实时卡尔曼滤波、曲线拟合、最大似然估计、平滑估计法等^[14]. 本文在分析速度误差产生原因的基础上, 提出一种新的平滑估计零速校正方法, 具有简单、复杂度低、补偿效果好的特点.

在采用四元数法将载体坐标系下的加速度变换到参考坐标系时, 由于四元数是采用陀螺与加速度计融合的方法进行求解, 存在误差, 这个误差约等于 $1+t+O(t)$, t 为采样时间, 忽略 t 的高阶无穷小, 进一步近似认为这个误差为 $1+t$. 而参考坐标系的加速度需积分得到速度, 忽略加速度传感器的随机噪声, 则加速度的积分的误差也约等于 $1+t$. 则整个计算速度的过程中, 引入的误差约为 $1+t+t^2$. 根据以上分析, 可设零速平滑估计补偿函数为

$$\begin{cases} E_v = E_{v1} + E_{v2} \\ \frac{E_{v1}}{E_{v2}} = a \\ m = \frac{E_{v1}}{T} \\ n = \frac{E_{v2}}{T^2} \\ v'_i = v_i - b(mt - nt^2) \end{cases} \quad (12)$$

其中, E_v 为每一步结束时速度 v 的误差; E_{v1}, E_{v2} 分别为 t 的 1 次误差项与 2 次误差项; a 为常数 (本

文取 0.2), b 为补偿系数 (本文取 1), a 与 b 的选取应使补偿后的速度积分得到的位移值尽量贴近真实位移值; T, t 分别为速度不为零时速度总采样点数与某一时刻速度采样点时间序列号; v_i, v'_i 分别为采样速度和补偿后的速度. 采用该算法的速度补偿效果如图 7 所示.

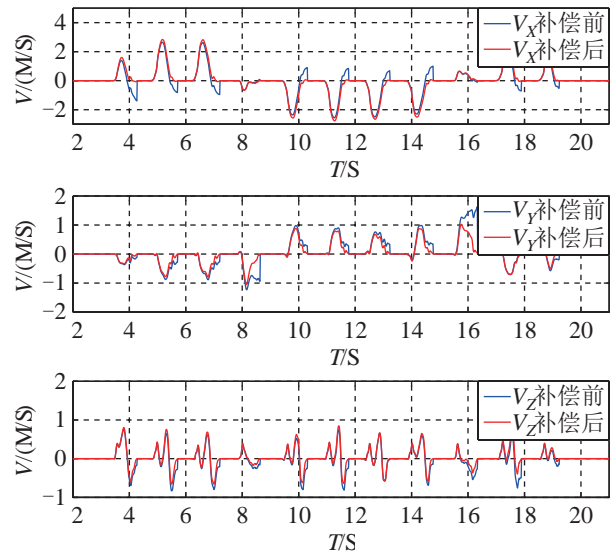


图 7 速度补偿

Fig.7 Velocity compensation

由图 7 可知, 在直接将加速度积分得到速度时, 落地阶段速度存在极大的突变, 当采用式 (12) 所示的算法时, 能够有效地平滑速度波形.

5.2 高度补偿

即使在零速度校正后, 步行过程中, 每一步的高度还是会存在着较小的偏移, 且高度误差将随时间累积. 本文利用行人垂直方向的步行速度, 判断行人是否存在上下楼的情况, 对高度进行补偿. 首先利用式 (13) 对是否存在上下楼进行判断:

$$\begin{cases} s = 1, & (E_{vz} < T_1 \&\& V_{zmax} > T_2) \|\| V_{zmax} > T_3 \\ s = 0, & \text{else} \\ s = -1, & (E_{vz} < T_1 \&\& V_{zmax} < T_4) \end{cases} \quad (13)$$

其中, $s = 1$ 为上楼, $s = 0$ 为平地, $s = -1$ 为下楼; E_{vz} 为每一步结束时垂直方向速度 v 的误差; V_{zmax} 为每一步的过程中垂直方向速度 v 的最大值; T_1, T_2, T_3 与 T_4 为阈值 (本文分别取 $-0.8, 0.75, 1.2$ 与 0.3), 阈值选取根据实际情况, 以上下楼判断最少误分为原则, 通过实验进行选取.

在判断完步行状态后, 当 $s = 0$ 时, 对高度进行零位移补偿, 即每一步结束后, 步行高度为 0; 当 s 非零时, 改变式 (12) 中 b 的取值 (本文 $s = 1$,

$b = 1.15; s = -1, b = 0.58$). 最终高度补偿效果如图 8 所示.

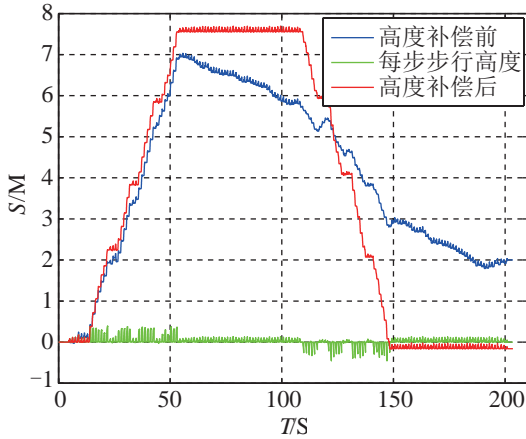


图 8 高度补偿

Fig.8 Height compensation

6 实验分析 (Experiment analysis)

实验采用的 IMU 和磁力传感器分别为 MPU-6050 和 HMC5883L, 微处理器采用 ST 公司的 STM32F103 单片机.

平面矩形线路行走的实验如图 9 所示, 线路长 11.2 m、宽 10.8 m, 共 39 步. 上下 2 楼行走如图 10 所示, 上下楼线路为直线行走 2 m 右转上 2 楼, 楼高 4 m, 左转直行 13 m 后绕一个 11 m×12 m 的矩形行走 1 圈, 最后原路返回至起点, 整个过程步行 110 步, 误判 1 步.

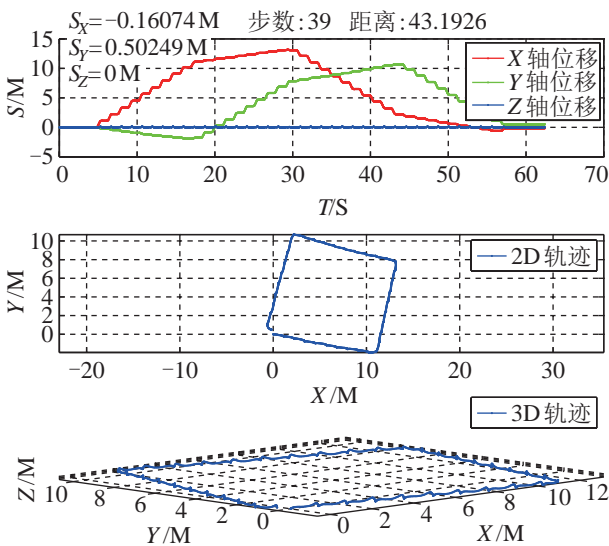


图 9 矩形线路行走轨迹图

Fig.9 Rectangle line walking trajectories

更多实验数据及统计见表 2, 实验编号所对应的行走方式与表 1 相同.

由表 2 数据统计可知, 从起点出发绕 1 圈后回到起点的最终平面位置误差都在 0.5 m 左右. 而在

没有高度补偿的情况下, 因速度估计的误差产生累积误差, 因此步行高度估计不准; 而在采取本文的高度补偿算法后, 高度误差的主要来源则是步行状态的判断以及补偿系数 b , 当能准确判断步行者是否在上下楼和补偿系数 b 时, 高度误差则会大幅减小. 最终 5 组实验整个 3D 轨迹误差都在 1 m 左右, 轨迹追踪精度较高, 效果较好.

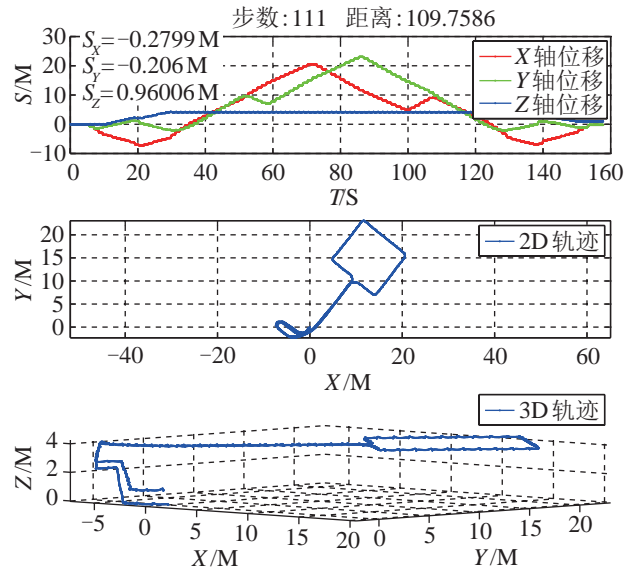


图 10 上下楼梯线路行走轨迹图

Fig.10 Trajectories when walking up and down stairs

表 2 轨迹误差

Tab.2 Tracking error

实验编号	1	2	3	4	5
步行时间 /s	20	58	88	154	202
距离 /m	9	44	66	110	145
步数	11	39	60	110	157
X 误差 /m	0.07	0.16	0.03	0.28	0.18
Y 误差 /m	0.29	0.50	0.44	0.21	0.34
2D 总误差 /m	0.29	0.53	0.44	0.35	0.39
无补偿 Z 误差 /m	0.57	0.33	3.82	1.48	2.00
无补偿 3D 总误差 /m	0.64	0.62	3.84	1.52	2.04
有补偿 Z 误差 /m	0.00	0.00	0.23	0.96	0.16
有补偿 3D 总误差 /m	0.29	0.53	0.49	1.02	0.42

关于基于惯性传感器的行人轨迹跟踪, 有较多人开展研究, 表 3 给出部分实验方案以及精度对比.

文 [6] 的方案不能长时间保证航向角精度, 故试验距离较短, 实验精度也较低; 文 [7] 的方案虽然用到了许多传感器, 但是软件方面采用基于胫骨捷联惯性导航的步长算法, 对平均步长依赖性较大, 故精度也不高; 文 [9] 硬件方案与本文一

样,但在计算位移时,也做了步长估计,虽然精度较高,但同样依赖于行人的步长;文[15]并没有采用磁力计,而是增加气压计以提高轨迹精度,但航向角还是存在漂移,故也不能长时间导航.而本文在采取有限传感器(无气压计)且不依赖于特定人员的步长估计的条件下,也取得了较高的精度.

表3 行人轨迹跟踪精度对比

Tab.3 Comparison of pedestrian tracking accuracy

算法	方案	精度 /%
文 [6]	陀螺仪 + 加速度计	5.1
文 [7]	陀螺仪 + 加速度计 + 磁力计 + 气压计	5.0
文 [9]	陀螺仪 + 加速度计 + 磁力计	2.0
文 [15]	陀螺仪 + 加速度计 + 气压计	2.2
本文	陀螺仪 + 加速度计 + 磁力计	3.2

7 结论 (Conclusion)

基于惯性/磁力传感器的行人3维轨迹跟踪系统的最大优势是不需要其它固联设施,是完全自主的定位方式,本文对AHRS姿态解算算法进行改进,提出了航向角融合、步态提取、零速度校正以及高度补偿的方法,在2D轨迹跟踪方面取得了良好的效果,精度在0.5 m左右;而高度估计的精度依赖于步行状态判断的准确性以及补偿系数 b ,本文所述方法的3D精度在1 m左右,后期可增加气压传感器对高度进一步地融合补偿以及研究补偿系数 b 的自适应算法,提高高度补偿的稳定性和准确性,以进一步提高整个3D轨迹的跟踪精度.

参考文献 (References)

- [1] Yun X P, Bachmann E R, Moore H, et al. Self-contained position tracking of human movement using small inertial/magnetic sensor modules[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2007: 2526-2533.
- [2] 张金亮, 秦永元, 梅春波. 基于MEMS惯性技术的鞋式个人导航系统[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(3): 253-256.
Zhang J L, Qin Y Y, Mei C B. Shoe-mounted personal navigation system based on MEMS inertial technology[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2011, 19(3): 253-256.
- [3] Leppakoski H, Collin J, Takala J. Pedestrian navigation based on inertial sensors, indoor map, and WLAN signals[J]. Journal of Signal Processing Systems for Signal Image and Video Technology, 2012, 71(3): 287-296.
- [4] 于飞, 白红美, 高伟, 等. 步幅和建筑方向辅助的行人导航算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016(3): 408-413.
Yu F, Bai H M, Gao W, et al. Stride and building heading aided algorithm for pedestrian navigation[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016(3): 408-413.
- [5] 王普, 潘凯, 任明荣, 等. 基于伪自适应阈值零速检测法的室内个人导航系统[J]. 北京工业大学学报, 2015(9): 1308-1313.
Wang P, Pan K, Ren M R, et al. Indoor personal navigation system based on zero velocity detection of pseudo adaptive threshold[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015(9): 1308-1313.
- [6] 童长胜, 张凤登. 一种基于IMU的3D位置追踪算法[J]. 电子测量技术, 2015, 38(4): 70-73.
Tong C S, Zhang F D. 3D position tracking algorithm based on IMU[J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(4): 70-73.
- [7] 汪少初. 基于PDR的定位与跟踪技术研究及系统设计[D]. 天津大学, 2014.
Wang S C. Research on the technologies of personnel positioning and tracking and system design based on PDR[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [8] Madgwick S O H, Harrison A J L, Vaidyanathan R. Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm[C]//IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics. Piscataway, USA: IEEE, 2011.
- [9] 田增山, 张媛. 基于智能手机MARG传感器的行人导航算法[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2014, 26(2): 223-227.
Tian Z S, Zhang Y. Pedestrian navigation algorithm based on the smart phone MARG sensors[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition, 2014, 26(2): 223-227.
- [10] 赵欣, 王仕成, 杨东方, 等. 一种改进的高动态捷联惯导解算算法[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(2): 163-169.
Zhao X, Wang S C, Yang D F, et al. Improved algorithm for high dynamic strapdown inertial navigation system[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2011, 19(2): 163-169.
- [11] Munoz Diaz E, de Ponte Muller F, Jimenez A R, et al. Evaluation of AHRS algorithms for inertial personal localization in industrial environments[C]//IEEE International Conference on Industrial Technology. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 3412-3417.
- [12] Premerlani W, Bizard P. Direction cosine matrix IMU: Theory[DB/OL]. [2009-05-17]. <http://gentlenav.googlecode.com/files/DCMDraft2.pdf>.
- [13] Euston M, Coote P, Mahony R, et al. A complementary filter for attitude estimation of a fixed-wing UAV[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2008: 340-345.
- [14] 高钟毓, 王进, 董景新, 等. 惯性测量系统零速修正的几种估计方法[J]. 中国惯性技术学报, 1995(2): 24-29.
Gao Z Y, Wang J, Dong J X, et al. A comparison of ZUPT estimation methods for inertial survey system[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 1995(2): 24-29.
- [15] Zheng L X, Zhou W C, Tang W W, et al. A 3D indoor positioning system based on low-cost MEMS sensors[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2016, 65: 45-56.

作者简介:

郑威 (1992-), 男, 硕士生. 研究领域: 机器人与智能制造, 嵌入式系统与软件开发.

彭刚 (1973-), 男, 博士, 副教授. 研究领域: 机器人与智能制造, 嵌入式系统与软件开发, 生产制造执行系统, 电力电子与功率变换.