

doi: 10.7690/bgzd.2025.06.022

一种四足机器人 IMU/关节编码器惯性组合导航方法

周振华^{1,2}, 王新科^{1,2}, 庞勇军²

(1. 中国兵器装备集团自动化研究所有限公司, 四川 绵阳 621000; 2. 五八智能科技(杭州)有限公司, 杭州 310000)

摘要: 针对野外丛林、城市楼宇等复杂环境下四足机器人卫星定位信息失效或不稳定的问题, 提出一种四足机器人 IMU/关节编码器惯性组合导航方法。采用四足机器人固定安装的 IMU 与四足机器人运动过程中关节编码器实时反馈的关节转动角度信息, 计算出四足机器人行驶速度, 以 IMU 解算出的速度和关节转动角度信息计算出的速度差作为卡尔曼滤波器的观测量, 建立卡尔曼滤波方程, 估算 IMU 解算的导航误差, 并进行实时反馈修正, 以提升四足机器人组合导航精度。该方法充分利用四足机器人必备的传感器, 无需新增导航硬件。仿真结果表明: 在设定仿真条件下, 该组合导航算法可以实现四足机器人高精度组合导航。

关键词: 四足机器人; 惯性组合导航; 关节编码器; 卡尔曼滤波算法

中图分类号: TP242.6 **文献标志码:** A

A Method of Inertial Integrated Navigation Based on Quadraped Robot IMU/Joint Encoder

Zhou Zhenhua^{1,2}, Wang Xinke^{1,2}, Pang Yongjun²(1. Automation Research Institute Co., Ltd. of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China;
2. Wuba Intelligent Technology (Hangzhou) Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: Aiming at the problem of satellite positioning information failure or instability of quadraped robot in complex environments such as wild jungle and urban buildings, an IMU/joint encoder inertial integrated navigation method for quadraped robot is proposed. An IMU fixedly installed on the quadraped robot and joint rotation angle information fed back by a joint encoder in real time in the motion process of the quadraped robot are adopted to calculate the running speed of the quadraped robot, the difference between the speed calculated by the IMU and the speed calculated by the joint rotation angle information is used as the observed quantity of a Kalman filter, a Kalman filtering equation is established, the navigation error calculated by the IMU is estimated, And perform real-time feedback correction to improve that accuracy of the integrated navigation of the quadraped robot. The method makes full use of the necessary sensors of the quadraped robot, and does not need to add new navigation hardware. The simulation results show that the integrated navigation algorithm can realize the high precision integrated navigation of quadraped robot under the set simulation conditions.

Keywords: quadraped robot; inertial combination navigation; joint encoder; Kalman filtering algorithm

0 引言

近年来, 随着智能化控制技术和运动关节技术的快速发展, 四足机器人逐渐在非结构化环境中突显优势, 目前已经实现多种复杂环境中稳定行走、敏捷机动、快速通行等功能, 被广泛应用于军事察打、工业巡检、安防巡逻、应急消防等多个领域^[1-6]。

四足机器人适用于地面崎岖复杂地形环境, 对其定位导航精度提出更高的要求: 一方面, 其定位导航系统需满足其自身运动的需求; 另一方面, 也需要为其任务载荷提供高精度的导航定位信息, 如侦察目标定位、火力打击引导等^[7]。目前, 四足机器人自主导航常用 IMU/激光雷达组合导航、IMU/

激光测距传感器组合导航、IMU/深度相机组合导航等多种组合导航方法, 存在对导航传感器依赖较多的问题^[8]。

伴随四足机器人运动控制算法的发展, 四足机器人运动控制逐渐由基于模型预测控制(model predictive control, MPC)转向基于无环境感知的强化学习(reinforcement learning, RL)运动控制^[9]。同时, 受限于安装空间、硬件成本等多种因素^[10-12], 四足机器人运动控制依赖的环境感知传感器越来越少, 甚至仅依赖 IMU 传感器, 即可实现四机器人良好的运动控制能力。

笔者充分利用四足机器人必备的 IMU 传感器和关节编码器进行高精度的组合导航解算, 无需新

收稿日期: 2024-08-25; 修回日期: 2024-09-28

基金项目: 面向高原高寒的智能四足机器人关键技术研究及应用(2024ZDZX0004)

第一作者: 周振华(1989—), 男, 河南人, 硕士。

增导航硬件，为四足机器人在复杂环境中自主导航提供一种有效的解决方法。

1 解算原理

四足机器人 IMU/关节编码器惯性组合导航原理如图 1 所示，通过 GNSS 或手动设置四足机器人初始位置，利用四足机器人 IMU 输出的载体三轴角速度和三轴加速度信息进行初始对准及纯惯性解算，可解算出四足机器人姿态、速度、位置等导航信息。同时，利用四足机器人编码器采集的角度信息和建立的运动学速度模型，可计算出四足机器人运动速度信息，以纯惯性解算出的速度信息与运动学速度模型解算出的速度作差，作为卡尔曼滤波器观测方程的观测量，建立卡尔曼滤波方程，进行纯惯性解算导航信息误差估计，采用卡尔曼滤波器估算的误差信息反馈修正纯惯性解算的导航信息，以实现四足 IMU/关节编码器的高精度组合导航。

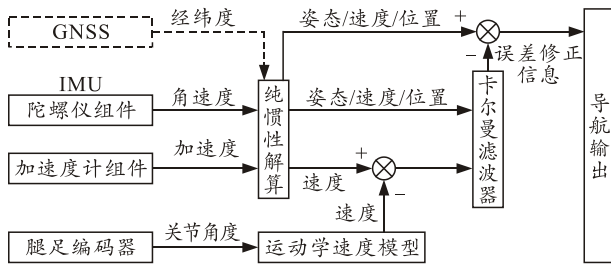


图 1 四足机器人 IMU/关节编码器组合导航原理

2 解算算法

2.1 机器人运动学模型

为方便计算，可将四足机器人主体简化为一个长方体，腿部结构简化为旋转关节和连杆，其运动学模型如图 2 所示，每条腿由 3 个旋转关节组成，分别为侧摆关节、髋关节和膝关节，共计 12 个自由度。

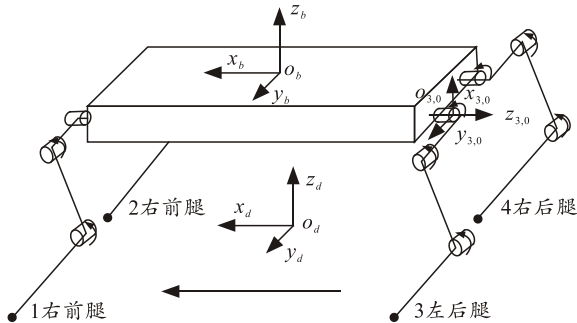


图 2 四足机器人运动学简化模型

图 2 中，将四足机器人左前腿标号为 1，右前腿标号为 2，左后腿标号为 3，右后腿标号为 4，基于以上模型建立相关基准坐标系，通过建立的基准坐标系，便于描述四足机器人各个部件之间的运动

关系及其坐标转换，本文中主要坐标系如下：

1) 世界坐标系 $\{O_d\}$ ：该坐标系原点位于环境水平面的中心位置， x_d 指向四足机器人前进的方向， z_d 指向竖直向上的方向， y_d 指向四足机器人左侧。

2) 载体坐标系 $\{O_b\}$ ：该坐标系原点位于四足机器人躯干的质心处， x_b 指向四足机器人躯干前进的方向， z_b 指向四足机器人躯干向上的方向， y_b 指向四足机器人躯干左侧。

3) 导航坐标系 $\{O_n\}$ ：导航坐标系选用东北天坐标系，即坐标原点位于四足机器人 IMU 传感器坐标原点， x_n 指向东向， y_n 指向北向， z_n 指向天向。

4) 过渡坐标系 $\{O_{m,0}\}$ ($m=1, 2, 3, 4$ ，表示 4 条腿编号)：该坐标系原点位于侧摆关节与四足机器人躯干的连杆处， $x_{m,0}$ 表示竖直向上的方向， $z_{m,0}$ 表示旋转轴上指向四足机器人的正后方， $y_{m,0}$ 由遵守右手定则。

5) 关节坐标系 $\{O_{m,n}\}$ ($m=1, 2, 3, 4$ ，表示 4 条腿编号； $n=1, 2, 3$ ，表示 3 个旋转关节)：该定义在单腿运动学模型分析中详细介绍。

2.2 单腿运动学模型

以四足机器人左后腿为例，采用 D-H 方法建立四足机器人运动学模型如图 3 所示。其中，坐标系 $\{O_{3,0}\}$ 与坐标系 $\{O_{3,1}\}$ 重叠，位于侧摆关节处；坐标系 $\{O_{3,2}\}$ 与坐标系 $\{O_{3,3}\}$ 的原点分别位于髋关节和膝关节位置；坐标系 $\{O_{3,4}\}$ 的原点位于足端。

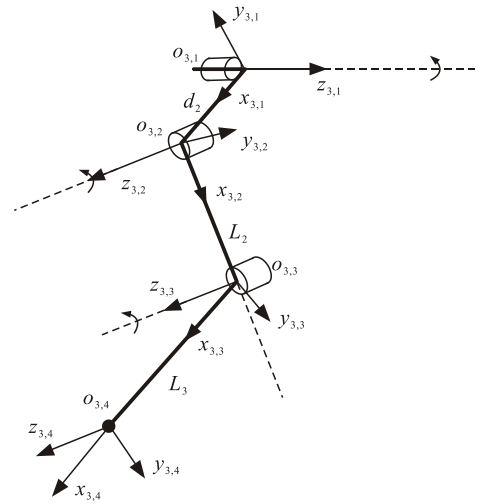


图 3 四足机器人左后腿模型

图 3 中，杆件长度 a_{i-1} 表示从 z_{i-1} 到 z_i 沿 x_{i-1} 轴的平移距离；杆件扭角 a_{i-1} 表示从 z_{i-1} 到 z_i 沿 x_{i-1} 轴的旋转角度；关节距离 d_i 表示从 x_{i-1} 到 x_i 沿 z_i 轴的平移距离；关节转动角度 θ_i 表示从 x_{i-1} 到 x_i 沿 z_i 轴的旋转角度。

基于以上建立的坐标关系, 则坐标系 $\{O_{k,i}\}$ 与坐标系 $\{O_{k,i-1}\}$ 的转换关系 ${}^{i-1}T_i$ 为:

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos a_{i-1} & \cos \theta_i \cos a_{i-1} & -\sin a_{i-1} & -d_i \sin a_{i-1} \\ \sin \theta_i \sin a_{i-1} & \cos \theta_i \sin a_{i-1} & \cos a_{i-1} & d_i \cos a_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $i=1, 2, 3, 4$ 。

2.3 单腿正运动学分析

四足机器人单腿正运动学是已知连杆物体参数和关节电机转动角度的信息, 计算四足机器人足端

$$P = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + L_3 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 - d_2 \sin \theta_1 - L_3 \cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \\ L_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 + L_3 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 + d_2 \cos \theta_1 - L_3 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \\ L_2 \sin \theta_2 - L_3 \cos \theta_2 \sin \theta_3 - L_3 \sin \theta_2 \cos \theta_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

将连杆物理参数和运动关节编码器实时采集的角度信息代入上式, 即可计算出四足机器人足端相对于过渡坐标系的位姿 (P_x, P_y, P_z) 。

基于以上实时计算的四足机器人足端相对于过渡坐标的位姿, 可计算采样周期 T 内四足机器人前向运动速度 V_{bx} 、侧向运动速度 V_{by} 和垂直方向速度 V_{bz} 为:

$$\begin{bmatrix} V_{bx} \\ V_{by} \\ V_{bz} \end{bmatrix} = \frac{1}{T} \begin{bmatrix} P_x - P_{x-1} \\ P_y - P_{y-1} \\ P_z - P_{z-1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.4 系统误差方程

导航系统误差方程主要包含速度误差方程、姿态误差方程和位置误差方程, 其中, 速度误差方程在导航坐标系下系统速度误差方程的向量形式可表示为:

$$\dot{\bar{V}}_{ep} = \bar{f} - (2\bar{\omega}_{ie} + \bar{\omega}_{ep}) \times \bar{V}_{ep} + \bar{g} \quad (5)$$

式中: $\dot{\bar{V}}_{ep}$ 为进行导航解算时所需获得的载体相对地球表面的加速度向量; $\bar{f}$ 为加速度计所测量的比力向量在数学平台系的投影; $-(2\bar{\omega}_{ie} + \bar{\omega}_{ep}) \times \bar{V}_{ep}$ 为由地球自转和载体相对地球运动而产生的哥氏加速度; $\bar{g}$ 为重力加速度向量。

设载体所在地球的纬度为 L , 数学平台系和导航系之间的误差角为 φ_E 、 φ_N 、 φ_U , 则加速度计输出的比力为:

$$\bar{f} = C_n^b [f_E + \nabla_E \quad f_N + \nabla_N \quad f_U + \nabla_U]^T \quad (6)$$

相对于过渡坐标的位姿。由四足机器人运动学建模可知, 4 条腿足结构基本相同, 因此, 分析其中一条腿正向运动学模型即可。

以左后腿为例, 根据建立的单腿运动学模型, 按照式(1), 计算坐标系 $\{O_{k,4}\}$ 相对于过渡坐标系 $\{O_{k,0}\}$ 的转换矩阵为:

$${}^0T_4 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & P_x \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & P_y \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

可计算足端相对于过渡坐标系的位姿为:

式中: f_E 、 f_N 、 f_U 为导航系下加速度计比力; ∇_E 、 ∇_N 、 ∇_U 为导航系下加速度计零偏; C_n^b 为导航坐标系与载体坐标系的转换矩阵, 由于误差角一般很小, 其转换矩阵可表示为:

$$C_n^b = \begin{bmatrix} \& & 1 & \varphi_U & -\varphi_N \\ -\varphi_U & & 1 & & \varphi_E \\ \& & \varphi_N & -\varphi_E & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

地球自转引起的角速度为:

$$\bar{\omega}_{ie} = [0 \quad \omega_{ie} \cos L \quad \omega_{ie} \sin L]^T \quad (8)$$

载体相对地球运动引起的角速度为:

$$\bar{\omega}_{ep} = \left[-\frac{V_N}{R_m} \quad \frac{V_E}{R_n} \quad \frac{V_E}{R_n} \tan L \right]^T \quad (9)$$

式中 R_n 、 R_m 分别为所在位置的子午、卯酉曲率半径。重力加速度向量为 $\bar{g} = [0 \quad 0 \quad g]^T$ 。

位置误差方程即经度误差、纬度误差、高度误差方程为:

$$\delta \dot{\lambda} = \frac{\delta V_E}{R_n} \sec L + \frac{V_E}{R_n} \tan L \cdot \sec L \cdot \delta L; \quad (10)$$

$$\delta \dot{L} = \frac{\delta V_N}{R_m + h}, \quad \delta \dot{h} = \delta V_U \quad (11)$$

系统姿态误差方程为:

$$\dot{\phi} = C_b^n \delta \omega_{in}^n + \delta \omega_{in}^n - \omega_{in}^n \phi \quad (12)$$

式中 C_b^n 为 IMU 系到导航系的转换矩阵。

$$\omega_{in}^n = \omega_{ie}^n + \omega_{en}^n =$$

$$\left[-\frac{\delta V_N}{R_m} \quad \omega_{ie} \cos L + \frac{V_E}{R_n} \quad \omega_{ie} \sin L + \frac{V_E \tan L}{R_n} \right]^T \quad (13)$$

$$\delta\omega_{in}^n = \delta\omega_{ie}^n + \delta\omega_{en}^n = -\frac{\delta V_E}{R_m} - \omega_{ie} \sin L \cdot \delta L + \frac{\delta V_E}{R_n} \& (\omega_{ie} \cos L + \frac{V_E}{R_n} \sec^2 L) \delta L + \frac{\tan L}{R_n} \delta V_E; \quad (14)$$

$$C_s^n \delta\omega_{is}^s = [\varepsilon_E \quad \varepsilon_N \quad \varepsilon_U]^T. \quad (15)$$

式中 ε_E 、 ε_N 、 ε_U 为导航系下陀螺仪常值漂移。

2.5 系统滤波方程

由于四足机器人行驶路程相对较短，高度变化基本可以忽略，故整个导航过程中不考虑高度误差的影响。

2.5.1 系统状态方程

选取惯性导航系统的姿态误差、速度误差、位置误差以及陀螺仪常值漂移量和加速度计的零偏作为状态变量，即：

$$x = [\varphi_E \quad \varphi_N \quad \varphi_U \quad \delta V_E \quad \delta V_N \quad \delta V_U \quad \delta L \quad \delta \lambda \quad \varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \nabla_x \quad \nabla_y \quad \nabla_z]^T. \quad (16)$$

不考虑高度误差，陀螺仪误差包括常值漂移 ε_b 和均值为 0 的高斯白噪声 ε_w ，可表示为：

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta\omega_{ib}^b = \varepsilon_{bi} + \varepsilon_{wi} \\ \dot{\varepsilon} = 0 \quad (i = x, y, z) \end{array} \right\}. \quad (17)$$

加速度计误差包括零偏 ∇_b 和均值为 0 的高斯白噪声 ∇_w ，可表示为：

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta f^b = \nabla_{bi} + \nabla_{wi} \\ \dot{\nabla}_{bi} = 0 \quad (j = x, y, z) \end{array} \right\}. \quad (18)$$

陀螺仪常值漂移和加速度计零偏在导航系的投影满足如下关系：

$$[\varepsilon_E \quad \varepsilon_N \quad \varepsilon_U]^T = C_s^n [\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z]^T; \quad (19)$$

$$[\nabla_E \quad \nabla_N \quad \nabla_U]^T = C_s^n [\nabla_x \quad \nabla_y \quad \nabla_z]^T. \quad (20)$$

整理可得系统状态方程为：

$$\dot{x} = Ax + w. \quad (21)$$

式中： A 为系统状态转移阵； w 为系统噪声且表示为：

$$w = [0_{1 \times 8} \quad \varepsilon_{wx} \quad \varepsilon_{wy} \quad \varepsilon_{wz} \quad \nabla_{wx} \quad \nabla_{wy} \quad \nabla_{wz}]^T. \quad (22)$$

2.5.2 系统量测方程

由于通过四足机器人关节编码器和运动学模型计算出的值为其坐标系下的 3 维速度，关节编码器通过运动学模型计算速度误差为零均值的高斯白噪声 w_D ，其输出速度 V_D 在载体坐标系下的投影 V_D^b 为：

$$V_D^b = V_D + w_D. \quad (23)$$

将导航系统解算输出的速度与关节编码器通过运动学模型计算速度等效到导航系的速度之差作为系统量测量，建立系统量测量方程为：

$$z = V_{INS}^n - V_D^n = Hx + v. \quad (24)$$

式中观测矩阵 H 为：

$$H = \begin{bmatrix} 0 & V_U & -V_N \\ -V_U & 0 & V_E \\ V_N & -V_E & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 8} \end{bmatrix}. \quad (25)$$

矩阵 V 为零均值的测量高斯白噪声，且 v 和 w 相互独立。

3 仿真实验

3.1 仿真条件设置

为验证四足机器人 IMU/关节编码器组合导航的可行性，分析该组合导航主要误差为 IMU 陀螺仪和加速度计误差，分别设定 A、B、C 3 组误差进行分析验证，其中，设定 A 组陀螺仪常值漂移误差为 $0.1 (^{\circ})/h$ ，随机漂移误差为 $0.01 (^{\circ})/h^{1/2}$ ，加速度计零位偏置为 $100 \mu g$ ，加速计随机游走误差 $10 \mu g/(Hz)^{1/2}$ ；设定 B 组陀螺仪常值漂移误差为 $1 (^{\circ})/h$ ，随机漂移误差为 $0.1 (^{\circ})/h^{1/2}$ ，加速度计零位偏置为 $1000 \mu g$ ，加速计随机游走误差 $100 \mu g/(Hz)^{1/2}$ ；设定 C 组陀螺仪常值漂移误差为 $5 (^{\circ})/h$ ，随机漂移误差为 $0.5 (^{\circ})/h^{1/2}$ ，加速度计零位偏置为 $5000 \mu g$ ，加速计随机游走误差 $500 \mu g/(Hz)^{1/2}$ 。四足机器人关节编码器通过运动学模型计算速度误差为 5% ，不考虑其他误差。设置四足机器人行走速度为 1 m/s ，行驶轨迹为正方形，理论行走距离约为 1327 m 。

3.2 仿真结果与分析

图 4 为四足机器人在不同 IMU 精度条件下的组合导航精度；图 5 为 3 种 IMU 精度下组合导航航向误差。

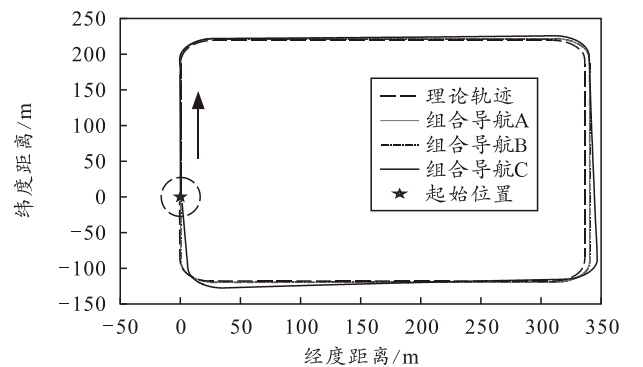


图 4 组合导航运动轨迹

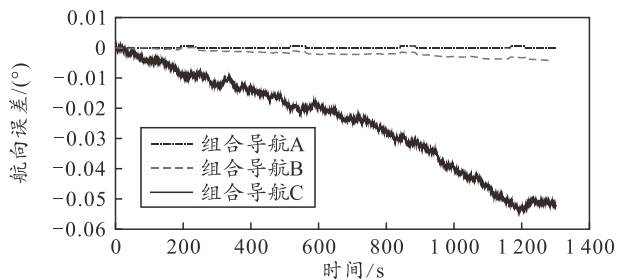


图 5 组合导航航向误差

由图 5 可见：3 种 IMU 精度下组合导航航向误差均可收敛至 0.06° 以内，高精度 IMU 组合导航后误差可收敛至 0.02° 以内；图 6 为 3 种 IMU 精度组合导航下速度误差。

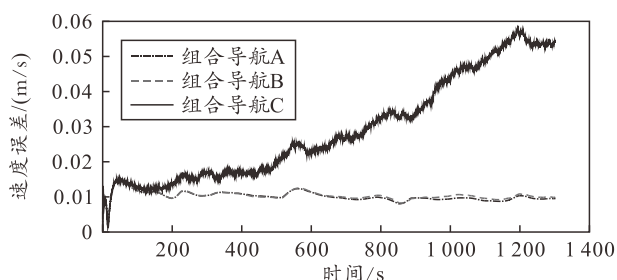


图 6 组合导航速度误差

由图 6 可见：3 种 IMU 精度组合导航下速度误差可收敛至 0.06 m/s ，高精度 IMU 组合导航后速度误差可收敛至 0.02 m/s 。图 7 为 3 种 IMU 精度组合导航后位置误差。

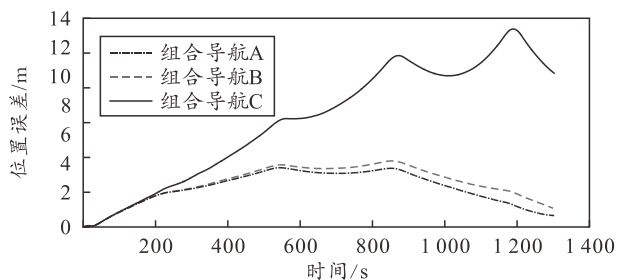


图 7 组合导航位置误差

由图 7 可见：3 种 IMU 精度组合导航后位置误差均可收敛至 14 m 以内，高精度 IMU 组合导航后误差可收敛至 5 m 以内。

4 结论

笔者提出一种对四足机器人 IMU/关节编码器

组合导航方法，进行理论分析与仿真验证，重点比较了不同 IMU 精度下组合导航系统的结果。仿真结果表明：在设定仿真条件下，该组合导航算法可以实现四足机器人高精度组合导航，为四足机器人 IMU/关节编码器组合导航工程化应用奠定了理论基础。此外，四足机器人具有非结构化路面通过性优势，在建筑物内、废墟等复杂环境下应用广泛，若结合 IMU 测算四足机器人姿态倾角变化，折算修正高度、平面位移等数据，将极大提高复杂环境下的导航精度。

参考文献：

- [1] 王智莹. 面向野外非结构环境的四足机器人自主导航技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
- [2] 戴慎超, 顾保虎, 孙景富, 等. 未知环境下的消防机器人智能灭火技术[J]. 兵工自动化, 2023, 42(1): 86-91.
- [3] 陈斌, 陶卫军. 室内巡检机器人的定位方法[J]. 兵工自动化, 2024, 43(5): 90-96.
- [4] 丁林祥, 陶卫军, 黄潇. 一种基于 ROS 的分布式安防巡逻机器人系统[J]. 兵工自动化, 2024, 43(6): 87-90.
- [5] 张洪川, 任君凯, 潘海南, 等. 基于多智能体强化学习的履带机器人摆臂控制方法[J]. 兵工自动化, 2025, 44(2): 92-95.
- [6] 邱彦佳, 董安林, 胡文雷, 等. 智能四足仿生机器人城镇作战运用[J]. 兵工自动化, 2025, 44(2): 108-112.
- [7] 梁启星. 复杂地形下四足机器人稳定运动控制与自适应调整算法的研究与实现[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2022.
- [8] 路永乐, 苏胜, 罗毅. 足端惯性信息辅助的四足机器人惯性导航算法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 12(45): 32-41.
- [9] 秦海鹏, 秦瑞, 施晓芬, 等. 基于模型预测的四足机器人运动控制[J]. 浙江大学学报(工学版), 2024, 58(8): 1565-1576.
- [10] 邢羽航, 张洲谔, 袁吉伟, 等. 狭小检测空间下多传感融合四足机器人自主导航策略[J]. 机械制造与自动化, 2024, 53(4): 214-218.
- [11] 张福斌, 林家昀. 深度相机与微机电惯性测量单元松组合导航算法[J]. 兵工学报, 2021, 42(1): 159-166.
- [12] 唐管政. 复杂纹理环境的光流/惯性组合导航方法[J]. 兵工自动化, 2021, 40(6): 26-31, 53.