

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412479

# 基于单轴光学陀螺与 MEMS IMU 的室内 移动机器人寻北\*

谭彩铭<sup>1,2</sup>, 谢晓龙<sup>1,2</sup>

(1. 南京邮电大学自动化学院 人工智能学院 南京 210023; 2. 南京邮电大学机器人信息感知与控制研究所 南京 210023)

**摘要:**三轴高精度光学陀螺成本高体积大,限制了陀螺寻北技术在移动机器人领域的应用。针对该问题,提出一种基于单轴光学陀螺和微机电系统(MEMS)惯性测量单元的室内移动机器人寻北方法,达到或者接近三轴光学陀螺的寻北精度,成本和体积降低约2/3。移动机器人于第1位置静止时,根据单轴光学陀螺的输出与MEMS三轴加速度计的输出,获得两个可能方位角,以相同的方式获得移动机器人在第2位置的两个可能方位角,两个位置的方位角相减得到4个可能的方位角变化值,通过和MEMS捷联惯导系统所得方位角变化值比较,确定第2位置的唯一方位角。误差分析显示在方位角接近90°和270°时,所提出的方法接近三轴光学陀螺的寻北精度,仿真实验和跑车实验证实了所提出方法的有效性。

**关键词:** 陀螺寻北;捷联惯导;单轴光学陀螺;MEMS IMU;室内移动机器人

中图分类号: V249.32+2 TH761 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4020

## Indoor mobile robot north-finding based on single-axis optical gyroscope and MEMS IMU

Tan Caiming<sup>1,2</sup>, Xie Xiaolong<sup>1,2</sup>

(1. College of Automation & College of Artificial Intelligence, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China; 2. Robotics Information Sensing and Control Institute, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** The high cost and large volume of three-axis high-precision optical gyroscope have hindered the widespread application of the gyroscope-based north-finding technology in the field of mobile robotics. In response to this issue, a method for indoor mobile robot north-finding based on a single-axis optical gyroscope and Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) Inertial Measurement Unit is proposed. This method achieves or approaches the heading accuracy of three-axis optical gyroscope while reducing costs and volume by approximately two-thirds. When the mobile robot is stationary at its initial position, two potential heading angles are obtained by combining the output of the single-axis optical gyroscope with the output of a MEMS three-axis accelerometer. Similarly, two potential heading angles at the second position are obtained in the same manner. By subtracting the heading angles at the two positions, four potential heading change values are derived. A unique heading angle for the second position is determined by comparing these values with the heading change value obtained from the MEMS strapdown inertial navigation system. Error analysis shows that the proposed method achieves a heading accuracy close to three-axis optical gyroscopes, especially when the heading angles are near 90° and 270°. Experimental results from on-vehicle tests confirm the effectiveness of the proposed method.

**Keywords:** gyroscope-based north-finding; inertial navigation; single-axis optical gyroscope; MEMS IMU; indoor mobile robot

## 0 引言

室内环境下,全球导航卫星系统失效,室内移动机器人定位面临挑战。目前主流的室内机器人定位方法包括视觉定位<sup>[1-2]</sup>、激光定位<sup>[3]</sup>、微机电系统(micro-electromechanical system, MEMS)惯导/里程计组合定位<sup>[4-5]</sup>。其中, MEMS 惯导/里程计组合定位方法因为具有成本低、算法轻量、不受环境影响等特点而得到广泛应用,但是其最突出问题是方位误差随时间发散。磁力计通过感知地磁场获得北向,但其对周围的金属和电子设备非常敏感,容易受到较大的干扰<sup>[6]</sup>。陀螺寻北技术利用高精度陀螺感知地球自转进而获得北向<sup>[7-8]</sup>,其寻北精度高且不受环境影响,在军用领域得到广泛应用<sup>[9-10]</sup>。

陀螺寻北通常采用的方案有2类。第1类是利用高精度惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)实现寻北。高精度IMU通常由三轴高精度光学陀螺和三轴加速度计构成。较为经典的方法为解析对准方法<sup>[11]</sup>,即在静基座上,三轴光学陀螺感知地球自转矢量,三轴加速度计感知重力加速度矢量,通过三轴姿态测定(triaxial attitude determination, TRIAD)算法得到IMU相对于地球的姿态,从而实现寻北。后来为了抑制基座的晃动,出现了惯性系对准方法<sup>[7]</sup>,该方法因其出色的抗基座晃动性能得到广泛应用。第1类方法要求使用三轴高精度光学陀螺,成本较高,达数万元乃至几十万元以上。第2类是基于单轴高精度光学陀螺和单轴精密转台来实现寻北。常见的对准方法包括四位置寻北法<sup>[12]</sup>,即控制单轴精密转台从当前位置再依次准确转动 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 和 $270^\circ$ ,利用4个位置下的单轴光学陀螺输出进行寻北。由于对称位置消除了光学陀螺标度因数误差和零偏的影响,该方法寻北精度较高,然而该方法对转台的转位精度要求较高,类似的方法还有二位置寻北法<sup>[13]</sup>、多位置寻北法<sup>[14]</sup>。此外,还有连续旋转寻北法<sup>[8]</sup>,该方法要求精密转台以恒定速度保持旋转,对安装精度和转轴的转速精度要求高。第2类方法虽只需单轴光学陀螺,但精密转台导致成本和体积增加。

综上所述,现有陀螺寻北方案存在成本较高的问题,制约了陀螺寻北技术在民用领域的推广应用。MEMS陀螺成本较低体积小,但是其精度低,通常不能完成寻北<sup>[15]</sup>。

文献[16]指出双矢量观测信息对于确定三轴姿态是信息冗余的,给定双矢量中的3个元素便能得出姿态的多个可能解,但需要确定唯一解。在此理论上,本文提出了一种基于单轴光学陀螺和MEMS IMU的室内移动机器人寻北方法<sup>[17]</sup>,达到或接近基于三轴光学陀螺的寻北精度,并且成本和体积均降低约2/3,有助于陀螺寻北技术在民用领域的推广应用。

## 1 基于三轴光学陀螺的传统寻北方法

静止状态下,高精度IMU相对于地球的姿态可以根据非共线的重力加速度向量和地球自转向量而直接得到,称之为解析对准。

如图1所示,当地东北天地理坐标系作为导航坐标系,记为 $O-x_n y_n z_n$ ,简记为 $n$ 系;重力加速度向量和地球自转向量分别记为 $\mathbf{g}$ 和 $\mathbf{w}_{ie}$ ;  $\mathbf{g}^n$ 为重力加速度向量在 $n$ 系下的投影,满足 $\mathbf{g}^n = [0, 0, -g]^T$ ,  $g$ 为重力加速度大小;  $\mathbf{w}_{ie}^n$ 为地球自转向量在 $n$ 系下的投影,满足 $\mathbf{w}_{ie}^n = [0, w_{ie} \cos L, w_{ie} \sin L]^T$ ,  $w_{ie}$ 为地球自转加速度大小,  $L$ 为载体所在纬度。

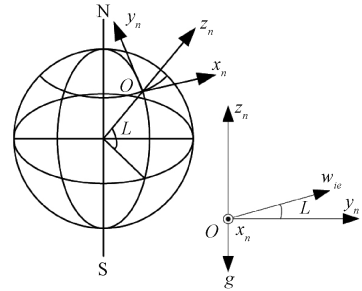


图1 重力向量及地球自转向量在导航坐标系下的投影  
Fig. 1 Projection of the gravity vector and the earth's rotation vector in the navigation coordinate system

静止状态下,忽略传感器误差和基座晃动的影响,式(1)成立。

$$\begin{cases} -\mathbf{f} = \mathbf{C}_n^s \mathbf{g}^n \\ \mathbf{w} = \mathbf{C}_n^s \mathbf{w}_{ie}^n \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{f}$ 为三轴加速度计输出,满足 $\mathbf{f} = [f_x, f_y, f_z]^T$ ;  $\mathbf{w}$ 为三轴陀螺输出,满足 $\mathbf{w} = [w_x, w_y, w_z]^T$ ; 沿IMU各轴的惯组坐标系为 $s$ 系,  $\mathbf{C}_n^s$ 为 $n$ 系到 $s$ 系的坐标变换矩阵。解析对准基于三轴姿态测定 TRIAD 算法<sup>[11]</sup>,其计算式为:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_n^s = & [-\mathbf{f}, -\mathbf{f} \times \mathbf{w}, (-\mathbf{f} \times \mathbf{w}) \times (-\mathbf{f})] \cdot \\ & [\mathbf{g}^n, \mathbf{g}^n \times \mathbf{w}_{ie}^n, (\mathbf{g}^n \times \mathbf{w}_{ie}^n) \times \mathbf{g}^n]^{-1} \end{aligned} \quad (2)$$

定义姿态角为:

$$\mathbf{C}_s^n = \text{rot}(z, -\psi) \text{rot}(x, \theta) \text{rot}(y, \gamma) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{C}_s^n = (\mathbf{C}_n^s)^T$ ,  $\gamma$ 、 $\theta$ 和 $\psi$ 分别指IMU的横滚角、俯仰角和方位角,范围分别为 $-\pi < \gamma \leq \pi$ ,  $-\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ ,  $0 \leq \psi < 2\pi$ ;  $\text{rot}(j, \varphi)$ 表示原坐标系沿着该系 $j$ 轴根据右手定则转动 $\varphi$ 得坐标系到原坐标系的坐标变换矩阵, $j$ 表示 $x$ 、 $y$ 或 $z$ 。由式(2)和(3)可求解出姿态角 $\gamma$ 、 $\theta$ 和 $\psi$ ,实现陀螺寻北。根据式(1)可知,陀螺的轴数为3,且能感知地球自转,通常为三轴高精度光学陀螺。

## 2 基于单轴光学陀螺的改进寻北方法

改进方法将陀螺寻北所需的三轴光学陀螺减少为单轴光学陀螺,结合一个低成本 MEMS IMU,通过比较第 1 位置到第 2 位置的方位角变化来确定北向,从而显著降低成本且缩小体积,寻北装置如图 2 所示,其中记载体坐标系  $b$  系为移动机器人右前上坐标系,记沿 MEMS IMU 各轴的惯组坐标系为  $s$  系, $s$  系与  $b$  系经过校准后一致,单轴光学陀螺轴向沿  $s$  系  $y$  轴方向。

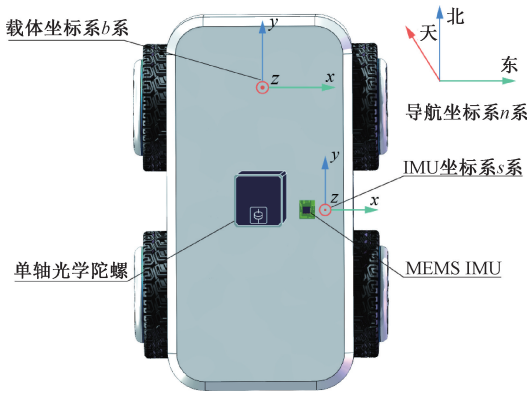


图 2 基于单轴光学陀螺与 MEMS IMU 的寻北装置与坐标系定义示意图

Fig. 2 North-finding device utilizing a single-axis optical gyroscope and MEMS IMU within the defined coordinate systems

### 2.1 第 1 位置得到两个可能寻北解

移动机器人在第 1 位置静止一小段时间,对静止时的单轴光学陀螺输出数据及 MEMS 三轴加速度计输出数据分别进行平均运算,其结果分别记为  $\bar{w}_{y1}$  和  $\bar{f}_1$ ,由它们计算并且得到第 1 位置处移动机器人方位角的两个可能值。记第 1 位置处  $n$  系到  $s$  系的坐标变换矩阵为  $C_n^s[1]$ ,对应的横滚角、俯仰角和方位角分别记为  $\gamma_1$ 、 $\theta_1$  和  $\psi_1$ 。三轴加速度计在理想状态下的输出满足式(4)。

$$\bar{f}_1 = C_n^s[1] \cdot (-g^n) = \begin{bmatrix} -g \sin \gamma_1 \cos \theta_1 \\ g \sin \theta_1 \\ g \cos \gamma_1 \cos \theta_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

由式(4)求得第 1 位置处的俯仰角和横滚角为:

$$\theta_1 = \text{asin}\left(\frac{\bar{f}_{y1}}{g}\right) \quad (5)$$

$$\gamma_1 = \text{atan2}(-\bar{f}_{x1}, \bar{f}_{z1}) \quad (6)$$

式中:  $\bar{f}_1 = [\bar{f}_{x1} \ \bar{f}_{y1} \ \bar{f}_{z1}]^T$ ;  $\text{asin}(\cdot)$  表示反正弦函数;  $\text{atan2}(\cdot)$  是反正切函数  $\text{atan}(\cdot)$  的一个变种,其值域为  $(-\pi, \pi]$ 。记第 1 位置处静止情况下理想三轴陀螺平均

输出为  $\bar{w}_1 = [\bar{w}_{x1} \ \bar{w}_{y1} \ \bar{w}_{z1}]$ ,满足式(7)。

$$\begin{bmatrix} \bar{w}_{x1} \\ \bar{w}_{y1} \\ \bar{w}_{z1} \end{bmatrix} = C_n^s[1] \times w_{ie}^n \quad (7)$$

由式(7)可得,第 1 位置处  $y$  轴光学陀螺的平均输出满足式(8)。

$$\bar{w}_{y1} = w_{ie} \cos L \cos \theta_1 \cos \psi_1 + w_{ie} \sin L \sin \theta_1 \quad (8)$$

由式(8)可得:

$$\cos \psi_1 = \frac{\bar{w}_{y1} - w_{ie} \sin L \sin \theta_1}{w_{ie} \cos L \cos \theta_1} \quad (9)$$

由式(9)可得,方位角有两个可能解,分别记为  $\psi_{1(1)}$ 、 $\psi_{1(2)}$ ,两者之和等于  $2\pi$ 。由式(9)可知,计算方位角不需要横滚角,只需  $y$  轴 MEMS 加速度计。

### 2.2 移动到任意第 2 位置确定唯一寻北解

通常情况下,基于单轴光学陀螺在每个位置得到两个可能的方位角,通过将机器人移动到第 2 位置,可确定方位角的唯一解。

如图 3 所示,移动机器人由第 1 位置开始行驶,到第 2 位置停止,其方位角变化为  $\Delta\psi$ 。低成本 MEMS IMU 虽然不能获得北向,但是可以获得方位角变化。利用 MEMS IMU 输出运行捷联惯性导航算法<sup>[18]</sup>(初始方位角设为  $0^\circ$ ),直到移动机器人到达第 2 位置处停止,由 MEMS 捷联惯性导航得到的方位角变化值记为  $\Delta\psi_{\text{INS}}$ ,在短时间内  $\Delta\psi_{\text{INS}}$  的精度可以在  $1^\circ$  以内<sup>[19]</sup>。在第 2 位置处,采用同 2.1 节方法得到第 2 位置两个可能的方位角,分别记为  $\psi_{2(1)}$  和  $\psi_{2(2)}$ ,两者之和等于  $2\pi$ 。

分别记第 1 位置和第 2 位置的方位角的两个可能解为:

$$\begin{cases} \psi_{1(1)} = \alpha \\ \psi_{1(2)} = 2\pi - \alpha \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \psi_{2(1)} = \beta \\ \psi_{2(2)} = 2\pi - \beta \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $0 \leq \alpha < 2\pi, 0 \leq \beta < 2\pi$ 。将第 2 位置与第 1 位置的方位角相减得到  $\Delta\psi_{\text{gyro}}$ ,共有 4 个可能解:

$$\Delta\psi_{\text{gyro}} = \begin{cases} \psi_{2(1)} - \psi_{1(1)} \\ \psi_{2(1)} - \psi_{1(2)} \\ \psi_{2(2)} - \psi_{1(1)} \\ \psi_{2(2)} - \psi_{1(2)} \end{cases} = \begin{cases} -\alpha + \beta \\ \alpha + \beta - 2\pi \\ -\alpha - \beta + 2\pi \\ \alpha - \beta \end{cases} \quad (12)$$

通常,  $\Delta\psi_{\text{gyro}}$  的 4 个可能解是不相等的,  $\Delta\psi_{\text{gyro}}$  可能解中,最接近  $\Delta\psi_{\text{INS}}$  的为正解,以此确定第 2 位置唯一方位角。其中,当  $\alpha = \pi$  时,  $\psi_1$  的两个可能解重合,当  $\beta = \pi$  时,  $\psi_2$  的两个可能解重合。

### 2.3 实现步骤

综合以上解算过程,本文所提出的基于单轴光学陀

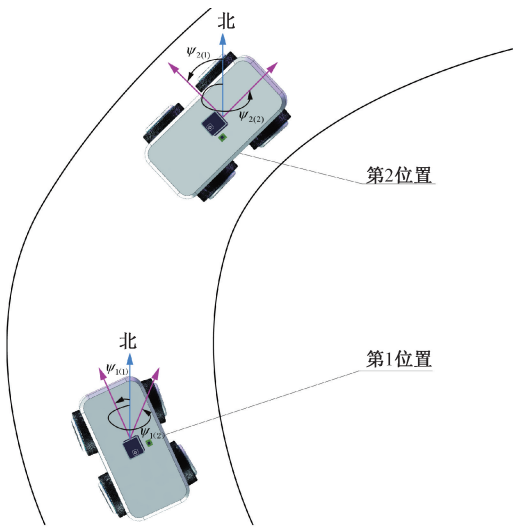


图3 基于单轴光学陀螺获得移动机器人分别在第1和第2位置的两个可能方位角

Fig. 3 Two possible heading angles of the mobile robot at the first and second positions, determined using a single-axis optical gyroscope

螺寻北方法的具体步骤如下。

1) 在第1位置,由单轴光学陀螺的输出和三轴MEMS加速度计的输出,采用式(5)和(9)获得两个可能的第1方位角。

2) 移动机器人开始运动前,基于MEMS IMU输出运行捷联惯性导航算法(初始方位角设为 $0^\circ$ ),移动机器人运动到第2位置处停止,MEMS惯导系统输出第1位置到第2位置的方位角变化值 $\Delta\psi_{INS}$ 。

3) 在第2位置,根据单轴光学陀螺的输出和三轴MEMS加速度计的输出,采用式(5)和(9)获得两个可能的第2方位角。

4) 两个可能第2方位角减去两个可能第1方位角,得到4个方位角变化值 $\Delta\psi_{gyro}$ ,4个方位角变化值与MEMS捷联惯导系统得到的方位角变化值 $\Delta\psi_{INS}$ 相比较,确定最接近的变化值 $\Delta\psi_{gyro}$ 。

5) 确定当前位置的方位角。

### 3 误差分析

#### 3.1 基于三轴光学陀螺的传统寻北方法

由TRIAD方法(式(2))进行寻北时,影响方位精度的主要是陀螺输出误差,这里且不考虑加速度计输出误差,方位误差角为<sup>[11]</sup>:

$$\phi_{TRIAD} = \frac{\delta w_E}{w_{ic} \cos L} \quad (13)$$

式中:  $[\delta w_E, \delta w_N, \delta w_U]^T = C_s^n [\delta w_x, \delta w_y, \delta w_z]^T, \delta w_x, \delta w_y$

和 $\delta w_z$ 为由惯性器件本身的误差和基座晃动导致的陀螺输出误差,设为随机误差。在水平状态下有:

$$C_s^n = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

从而有:

$$\delta w_E = \delta w_x \cdot \cos \psi + \delta w_y \cdot \sin \psi \quad (15)$$

由式(13)和(15)可知,水平状态下,方位误差角主要取决于水平方向陀螺输出, $\delta w_x$ 和 $\delta w_y$ 不相关,且二者方差相等,将式(15)代入式(13),并进行方差分析,得到基于三轴光学陀螺的方位误差角方差为:

$$D(\phi_{TRIAD}) = \frac{D(\delta w_y)}{w_{ic}^2 \cos^2 L} \quad (16)$$

式中:  $D(\cdot)$ 表示对随机变量进行方差计算。

#### 3.2 基于单轴光学陀螺的改进寻北方法

在水平与静止状态下,由式(8)可知,单轴光学陀螺输出 $w_y$ 满足式(17):

$$w_{ic} \cos L \cos \psi = w_y \quad (17)$$

对式(17)两边方位角 $\psi$ 和 $w_y$ 进行微分,得到:

$$-w_{ic} \cos L \sin \psi \cdot d\psi = dw_y \quad (18)$$

式中:  $d\psi$ 和 $dw_y$ 均为微小增量,可以使用较小的误差值 $\delta\psi$ 和 $\delta w_y$ 来近似的表示。故式(18)也可写为:

$$-w_{ic} \cos L \sin \psi \cdot \delta\psi = \delta w_y \quad (19)$$

对式(19)进行方差分析,得到基于单轴光学陀螺的改进寻北方法的方位误差角的方差:

$$D(\phi_{gyro}) = \frac{1}{\sin^2 \psi} \cdot \frac{D(\delta w_y)}{w_{ic}^2 \cos^2 L} = \frac{1}{\sin^2 \psi} D(\phi_{TRIAD}) \quad (20)$$

由式(20)可知,当方位角 $\psi$ 为 $90^\circ$ 或者 $270^\circ$ 时, $D(\phi_{gyro}) = D(\phi_{TRIAD})$ ,可见在接近这两个角度下,单轴光学陀螺寻北精度接近三轴光学陀螺寻北精度。由于移动机器人通常处于水平或接近水平的状态,故式(16)和(20)可近似用于寻北误差分析。

### 4 仿真实验

采用蒙特卡洛方法进行仿真实验,比较提出的单轴光学陀螺寻北方法与三轴光学陀螺寻北方法在不同方位角时的寻北精度。仿真实验在MATLAB软件上进行,横滚角设置为 $5^\circ$ ,俯仰角设置为 $5^\circ$ ,方位角设置为从 $1^\circ \sim 359^\circ$ 每隔 $10^\circ$ 取一次值。惯性传感器的误差设为随机误差,三轴加速度计误差的标准差为 $100 \mu\text{g}$ ,三轴光学陀螺误差的标准差为 $0.01^\circ/\text{h}$ 。在每组姿态下,通过randn()函数产生1000组IMU输出,可计算得到方位角均方根误差(root mean square error, RMSE),用

于表示寻北实验精度。式(16)和(20)所得结果作为理论精度。单轴光学陀螺与三轴光学陀螺精度比较如图4所示。

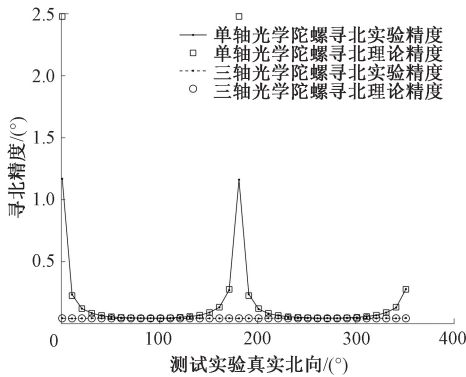


图4 单轴光学陀螺寻北与三轴光学陀螺寻北精度比较  
Fig. 4 Comparison of north-finding accuracy between using single-axis optical gyroscope and using three-axis optical gyroscope

图4中理论精度和实验精度基本一致。在方位角为 $50^\circ \sim 130^\circ$ 、 $230^\circ \sim 300^\circ$ 时,单轴光学陀螺寻北精度接近三轴光学陀螺寻北精度。在方位角为 $0^\circ$ 和 $180^\circ$ 左右时单轴光学陀螺寻北精度最低,此时其均方根误差为 $1.25^\circ$ 。

### 5 车辆寻北实验

基于单轴光学陀螺的车辆寻北实验在湖南长沙市的开放道路上进行,车辆寻北实验装置如图5所示。图5中车载IMU由三轴光学陀螺和三轴加速度计组成。光学陀螺的零偏不稳定性在 $0.008^\circ/\text{h}$ 以内,加速度计的零偏不稳定性在 $0.5 \text{ mg}$ 以内,IMU的采样频率为 $100 \text{ Hz}$ 。该IMU由国防科技大学制造,并已经和车辆进行了很好的对准。



图5 车辆寻北实验装置

Fig. 5 Setup for a north-finding experiment on a land vehicle

车辆在起始点(北纬 $28.361735^\circ$ )静止3 min左右(发动机怠速),随后,车辆沿城市道路行驶十多分钟,然后再次停止3 min左右。重复以上行驶和停车过程4次,将起始点考虑在内,车辆共在5个位置停止(发动机均处于怠速状态)。连续的两个停止位置构成了一次单轴光学陀螺寻北测试,共进行4次测试。

采用y轴光学陀螺进行单轴光学陀螺两位置寻北,4次测试中第1和第2位置处,均得到两个可能解。如表1所示,测试2第2位置处(或测试3第1位置处),两个可能解相同,均为 $180^\circ$ 。将两个位置处的单轴光学陀螺寻北解作差,得到4组(或2组)可能解。基于捷联惯导算法得到第1位置到第2位置的方位角变化值,与单轴光学陀螺寻北所得方位角变化值比较,获得第2位置唯一寻北解。将第2位置IMU的6轴输出代入TRIAD计算公式得到的方位角作为“真值”用以计算单轴光学陀螺寻北误差。在测试1和测试2中方位角的数值接近 $180^\circ$ ,单轴陀螺的寻北误差较大,分别为 $4.77^\circ$ 和 $2.72^\circ$ ;在测试3和测试4中,方位角远离 $0^\circ$ 和 $180^\circ$ ,寻北误差较小,结果分别为 $0.90^\circ$ 和 $0.03^\circ$ ,与误差分析式(20)所得结论一致。

表1 使用y轴单轴光学陀螺仪进行车辆寻北的实验结果

Table 1 Experimental results of the vehicle north-finding using a single-axis optic gyroscope in y-axis

测试	单轴光学陀螺寻北可能解/ $(^\circ)$		第1位置到第2位置的方位角变化/ $(^\circ)$		第2位置的寻北解/ $(^\circ)$		
	第1位置	第2位置	单轴光学陀螺寻北	捷联惯导	单轴光学陀螺寻北	TRIAD	误差
1	121.34、238.66	163.75、196.25	42.41、-74.91、74.91、-42.41	69.48	196.25	191.47	4.77
2	163.75、196.25	180.00、180.00	16.25、-16.25	-8.0	180.00	182.72	-2.72
3	180.00、180.00	127.97、232.03	-52.03、52.03	51.20	232.03	232.93	-0.90
4	127.97、232.03	114.03、245.97	-13.94、-118.00、118.00、13.94	-120.41	114.03	114.06	-0.03

实际使用时,使用低成本MEMS捷联惯导系统获得第1位置到第2位置的方位角变化,应缩短室内移动机器人从第1位置到第2位置的时间,1 min以内足以使MEMS捷联惯导系统所得方位角变化值控制在 $1^\circ$ 以内<sup>[19]</sup>,能用于确定单轴光学陀螺寻北唯一解。

此外,为达到较高的寻北精度,第2位置的方位角应远离 $0^\circ$ 和 $180^\circ$ ,即单轴光学陀螺( $y$ 轴)的输出的绝对值要尽可能小。

## 6 结 论

本文提出了基于单轴光学陀螺和MEMS IMU的任意两位置寻北法,误差分析显示,在方位角不接近 $0^\circ$ 和 $180^\circ$ 时,所提方法的寻北精度接近基于三轴光学陀螺的寻北精度。该结论通过蒙特卡洛仿真实验和车辆寻北实验验证,由于方法仅基于单轴光学陀螺和一个低成本MEMS IMU,体积和成本降低约 $2/3$ ,使所提方法适用于室内移动机器人的定位导航,有助于陀螺寻北技术在民用领域的推广应用。

## 参考文献

- [ 1 ] 李秀智,梁兴楠,贾松敏,等.基于视觉测量的智能轮椅床自动对接[J].仪器仪表学报,2019,40(4):189-197.  
LI X ZH, LIANG X N, JIA S M, et al. Visual measurement based automatic docking for intelligent wheelchair/bed [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(4): 189-197.
- [ 2 ] XIA L L, MENG D, ZHANG J J, et al. Visual-inertial simultaneous localization and mapping: dynamically fused point-line feature extraction and engineered robotic applications[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 5019211.
- [ 3 ] 王子润,燕必希,董明利,等.基于激光雷达与改进AMCL的爬壁机器人定位方法[J].仪器仪表学报,2022,43(12):220-227.  
WANG Z R, YAN B X, DONG M L, et al. A localization method of wall-climbing robot based on lidar and improved AMCL[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(12): 220-227.
- [ 4 ] WANG M S, WU W Q, HE X F, et al. Consistent ST-EKF for long distance land vehicle navigation based on SINS/OD integration [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(11): 10525-10534.
- [ 5 ] ONYEKPE U, PALADE V, KANARACHO S, et al. IO-VNBD: Inertial and odometry benchmark dataset for ground vehicle positioning[J]. Data in Brief, 2021, 35: 106885.
- [ 6 ] 刘轶凡,肖文栋,吴健康,等.基于牛顿迭代和椭球拟合的磁力和惯性传感器校准方法[J].仪器仪表学报,2020,41(8):142-149.  
LIU Y F, XIAO W D, WU J K, et al. Calibration method of magnetic and inertial sensors based on Newton iteration and ellipsoid fitting [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8): 142-149.
- [ 7 ] 谭彩铭,王宇,苏岩,等.优化的抗线晃动惯性系相对准算法[J].系统工程与电子技术,2016,38(1):142-146.  
TAN C M, WANG Y, SU Y, et al. Optimized inertial coarse alignment algorithm against line swinging [J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(1): 142-146.
- [ 8 ] 段苛苛,李邓化.光纤陀螺寻北仪连续旋转寻北方案及算法研究[J].仪器仪表学报,2014,35(4):801-806.  
DUAN K K, LI D H. Continuous rotation north seeking scheme and algorithm for fiber optic gyroscopic north finder [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(4): 801-806.
- [ 9 ] 赵坤,胡小毛,刘伯晗.舰船长航时光纤陀螺惯导系统技术及未来发展[J].中国惯性技术学报,2022,30(3):281-287.  
ZHAO K, HU X M, LIU B H. Technology and future development of ship long-duration fiber optic gyro inertial navigation systems [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2022, 30(3): 281-287.
- [ 10 ] 谭彩铭.车载捷联惯导系统动基座初始对准方法研究[D].南京:南京理工大学,2016.  
TAN C M. Research on the initial alignment of SINS employed in land moving vehicle[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [ 11 ] JIANG Y F. Error analysis of analytic coarse alignment methods [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(1): 334-337.
- [ 12 ] DUAN K K, LI D H, PEI R ZH. Study on the error of four-position north seeking system based on the single axis fiber optic gyroscope [J]. Advanced Materials Research, 2012, 503-504: 1158-1163.
- [ 13 ] 卜继军,魏贵玲,李勇建,等.陀螺寻北仪二位置寻北方案[J].中国惯性技术学报,2002,10(3):47-50.  
BU J J, WEI G L, LI Y J, et al. Two-position detecting scheme for gyro-based north seeker [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2002, 10(3): 47-50.
- [ 14 ] HE CH H, YANG CH CH, WANG X Y, et al. Enhanced multilocation method to suppress the north

finding error caused by bias drift with fiber optic gyroscopes[J]. Applied optics, 2013, 52(21): 5303-5311.

- [15] KIRKKO-JAAKKOLA M, COLLIN J, TAKALA J. Bias prediction for MEMS gyroscopes [J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(6): 2157-2163.

- [16] 谭彩铭, 高翔, 徐国政, 等. 基于不完整双矢量观测的三轴姿态确定算法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 140-146.

TAN C M, GAO X, XU G ZH, et al. Three-axis attitude determination from incomplete two vector observations[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11): 140-146.

- [17] 谭彩铭. 基于单轴高精度陀螺的陆用寻北方法及装置: 中国, 202311120350. 7[P]. 2024-01-16.

TAN C M. Land-based north-finding method and device based on single-axis high-precision gyro: China, 202311120350. 7[P]. 2024-01-16.

- [18] TITERTON D, WESTON J L. Strapdown inertial navigation technology [M]. London: The Institution of Engineering and Technology, 2004.

- [19] AHMED H, TAHIR M. Accurate attitude estimation of a moving land vehicle using low-cost MEMS IMU sensors[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 18(7): 1723-1739.

## 作者简介



谭彩铭(通信作者), 分别在 2009 年和 2016 年于南京理工大学获得学士学位和博士学位, 现为南京邮电大学讲师, 主要研究方向为定位导航技术。

E-mail: tancm314@hotmail.com

**Tan Caiming** (Corresponding author) received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from Nanjing University of Science and Technology in 2009 and 2016, respectively. Now he is a lecturer at Nanjing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include positioning and navigation technology.



谢晓龙, 2023 年于河南科技大学获得学士学位, 现为南京邮电大学硕士研究生, 主要研究方向为机器人定位导航。

E-mail: xiexiaolong202301@163.com

**Xie Xiaolong** received his B. Sc. degree from Henan University of Science and Technology in 2023. He is currently a M. Sc. candidate at Nanjing University of Posts and Telecommunications. His main research interest is positioning and navigation of robot.