

外部测量装置的捷联惯导对准方法

洪天琦¹, 黄喆¹, 杨凌辉¹, 郭思阳¹, 邹剑², 叶声华¹

(1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;

2. 军械工程学院 光学与电子工程系, 河北 石家庄 050003)

摘要: 在室内组合定位系统中, 不同子系统之间相互姿态关系的确定是通过对准过程实现的。使用惯性器件进行组合定位, 通常航姿参考系统 AHRS 是以地理坐标系(E-N-U)作为导航坐标系。然而, 在室内导航任务中, 导航坐标系一般根据用户需求建立在厂内标志点或工装坐标系等自定义位置。针对这一问题, 提出一种将地理坐标系与自定义坐标系相互转换的新方法, 通过激光跟踪仪建立的外部基准, 提出了基于方向余弦矩阵的标定算法, 实现了地理坐标系与外部参考坐标系之间的相互转换。实验结果表明: AHRS 任意位姿下的转换姿态角度均方根误差小于 0.25° 。

关键词: 组合定位; 方向余弦矩阵; 捷联惯导; 激光跟踪仪

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0531002

Alignment of strapdown inertial navigation system based on extra measuring device

Hong Tianqi¹, Huang Zhe¹, Yang Linghui¹, Guo Siyang¹, Zou Jian², Ye Shenghua¹

(1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Department of Optics & Electronic Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In an integrated location system, the establishment of mutual attitude relationships between different subsystems is accomplished by the alignment processing. When the inertial component is used for positioning, the attitude and heading reference system (AHRS) is generally based on geographic coordinate system (E-N-U) as the navigation coordinate system. However, during indoor navigation task, the navigation coordinate system is generally based on the users' requirement such as marked points or workpiece coordinate system. In this paper a new alignment method based on direction cosine matrix was proposed for the integrated positioning system of indoor mobile object. The transformation between geographic coordinate system and external reference coordinate system can be achieved by the method. Then coordinate system of laser tracker became navigation reference and real-time and precise transformation between different coordinate systems can be realized by this new alignment method. Experimental results show that the measured RMS errors for attitude angles after transformation are less than 0.25° while the AHRS is in arbitrary position and orientation.

Key words: integrated location; direction cosine matrix; strapdown inertial navigation system; laser tracker

收稿日期: 2015-10-05; 修订日期: 2015-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(51405338)

作者简介: 洪天琦(1991-), 男, 硕士生, 主要从事光电测量及组合导航方面的研究。Email: hongtianqi@tju.edu.cn

导师简介: 杨凌辉(1981-), 男, 讲师, 博士, 主要从事激光及光电测试技术方面的研究。Email: icelinker@tju.edu.cn

0 引言

近年来,无人机(UAV)及自动引导车(AGV)等智能移动设备被越来越多地用来执行复杂环境下的各类任务^[1]。室内 AGV 定位过程中,里程计、惯性导航等航迹推算方案受外界影响较小,但测量误差随时间累积;全站仪、激光跟踪仪等绝对定位方案精度高,但普遍存在测量光线被物体遮挡问题。为提高智能移动设备位姿信息的精确性与可靠性,通常采用多种传感器组合的方式对其进行测量与定位^[2-3]。其中,基于惯性器件的航姿参考系统(AHRS)作为一类常用的姿态获取部件,在移动平台的控制反馈回路中起着极为关键的作用。AHRS 的输出以地理坐标系(东-北-天)为基准,激光跟踪仪等测量系统以自身坐标系为基准,并通常被用户作为工业现场的测量坐标系,二者很难结合。因此,如何建立工业现场测量坐标系与地理坐标系之间的转换关系,使 AHRS 的姿态信息依照用户要求的基准输出,成为组合定位过程中的关键问题。

文中针对这一问题展开研究,阐述了工业现场组合定位系统的基本原理,提出了一种基于水平转台的标定方法,完成了子系统之间的对准。根据文中所提出的方法,以激光跟踪仪作为外部测量装置,以高精度激光捷联惯导系统作为 AHRS 模块,直接计算出了地理坐标系与外部测量装置坐标系之间的相互转换关系。实验表明,该方法具备很强的通用性和有效性,为两种坐标系之间的相互标定以及两类定位方案的融合提供了一套新颖实用的解决方案。

1 组合定位原理

通常 AHRS 由三轴加速度计,三轴陀螺仪以及三轴地磁传感器组成,可连续稳定输出相对于自身载体坐标系 b 的加速度、角速度、姿态角度(航向角 ψ 、俯仰角 θ 和横滚角 γ)^[4]。如图 1 所示。

AHRS 与激光跟踪仪组合对 AGV 进行定位时,靶球随 AGV 在空间中运动,若跟踪仪与靶球之间不存在遮挡,此时靶球中心的三维坐标由跟踪仪直接测出;当 t_0 时,其运动到无法被跟踪仪探测到的空间位置,系统以 t_0 时刻跟踪仪所测量的三维坐标为初始值,由 AHRS 测得其当前位置。上述过程可表示为:

不存在遮挡时

$$p_t = p_{t-LR} \quad (1)$$

存在遮挡时

$$p_t = p_{t-LR} + \vec{v}^n \cdot \Delta T \quad (2)$$

其中, $p_{t-LR} = [p_{x,LR} \ p_{y,LR} \ p_{z,LR}]$, $\vec{v}^n = [v_x^n \ v_y^n \ v_z^n]$ 。

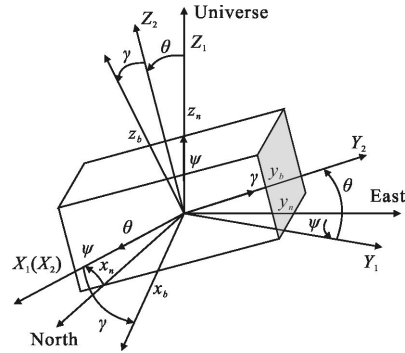


图 1 姿态角

Fig.1 Attitude angles

公式(1)和(2)的测量坐标系为激光跟踪仪坐标系,即导航坐标系 n 。 p_{t-LR} 表示在 t 时刻由激光跟踪仪测量的相对于坐标系 n 的三维点坐标, v_n 表示 AHRS 相对于导航坐标系(激光跟踪仪)的速度, ΔT 为 AHRS 系统测量位姿计算的时间间隔。在公式(2)中, p_{t-LR} 及 ΔT 均为已知量,因此参数 \vec{v}^n 的实时求取成为解决组合定位问题的关键。AHRS 相对于地理坐标系 g 的速度 \vec{v}^g 由如下微分方程得出^[5]:

$$\begin{aligned} \vec{v}^g &= [v_x^g \ v_y^g \ v_z^g]^T \\ \dot{v}_x^g &= f_x^g + \left(2\omega_e \sin L + \frac{v_x^g}{R_N+h} \tan L \right) v_y - \left(2\omega_e \cos L + \frac{v_x^g}{R_N+h} \right) v_z \\ \dot{v}_y^g &= f_y^g - \left(2\omega_e \sin L + \frac{v_x^g}{R_N+h} \tan L \right) v_x - \frac{v_y^g}{R_M+h} v_z \\ \dot{v}_z^g &= f_z^g - \left(2\omega_e \cos L + \frac{v_x^g}{R_N+h} \right) v_x + \frac{v_y^g}{R_M+h} v_y - g \\ \vec{f}^g &= [f_x^g \ f_y^g \ f_z^g] \end{aligned} \quad (3)$$

在确定的环境下,公式(3)中地球自转角速度 ω_e 、当地纬度 L 、地球半径 R_N 、地面高度 h 及重力加速度 g 等与地球相关的物理量均为已知。 \vec{f}^g 为 AHRS 相对于地理坐标系的加速度,通过公式(4)计算:

$$\vec{f}^g = C_b^g \cdot \vec{f}^b$$

$$\vec{f}^b = [f_x^b \ f_y^b \ f_z^b]^T \quad (4)$$

式中： \vec{f}^b 为 AHRS 相对于自身载体坐标系 b 的三轴加速度，通过内置加速度计直接输出； C_b^g 为载体坐标系相对于地理坐标系的姿态转换矩阵，通过 AHRS 内置的陀螺仪辅以初始对准算法得出^[5-6]。

因此，经过上述计算，AHRS 相对于地理坐标系 g 的速度 \vec{v}^g 可以得出。而在场地中，若实现激光跟踪仪信号被遮挡的情况下输出稳定的位置信息，由公式(2)可知，AHRS 相对于导航坐标系 n 的速度 \vec{v}^n 需要被求出。根据刚体的空间变换理论^[7]，与公式(4)相似， \vec{v}^n 可表示为：

$$\vec{v}^n = C_g^n \cdot \vec{v}^g \quad (5)$$

式中： C_g^n 为地理坐标系 g 相对于导航坐标系 n 的姿态转换矩阵。因此，围绕如何精确标定出转换矩阵 C_g^n ，文中将进行详细介绍。

2 标定算法

由于用户自定义的导航坐标系 n 与反映地球方位信息的地理坐标系 g 很难直接建立相互位姿关系，因此 C_g^n 无法被直接计算得出。参照工业机器人标定 TCP 的方法^[8-9]，文中通过在系统中增加过渡装置实现各部分位姿关系的传递，从而完成 C_g^n 的求解。

如图 2 所示，在 AHRS 模块上安装一个靶标板 (Target board)，靶标自身坐标系 t 定义为： o 点为原点，其指向 x_t 点的方向矢量为 x 轴，过 o 点与 o, x_t, y_t 点所组成平面垂直的射线方向为 z 轴， y 轴方向通过右手定则获得。表 1 为 3 个点在 t 系内坐标。

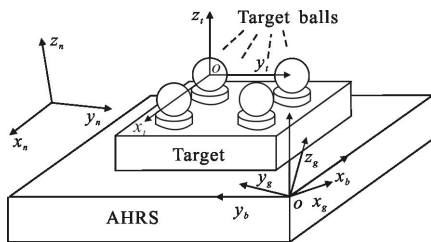


图 2 AHRS 与辅助标定靶

Fig.2 AHRS and target board

表 1 靶标标定点的坐标数据

Tab.1 Target coordinates

No.	x/mm	y/mm	z/mm
1	0	0	0
2	48.202	0	0
3	0.136	48.055	0

因此，地理坐标系与导航坐标系之间姿态矩阵即被拆分成多个子矩阵的组合(如图 3 所示)：

$$C_g^n = (C_n^g)^{-1} = (C_b^g \cdot C_t^b \cdot C_n^t)^{-1} \quad (6)$$

式中： C_g^n 可通过分别计算 C_b^g 、 C_t^b 及 C_n^t 得出，下文将分别给出介绍。

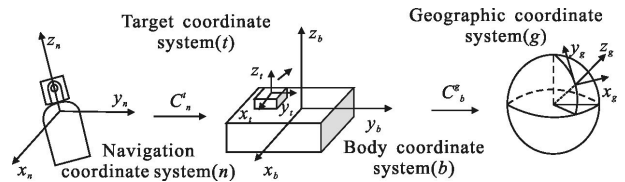


图 3 坐标系定义及姿态矩阵传递关系

Fig.3 Coordinate systems and transition of attitude matrices

2.1 求解 C_b^g

公式(6)中， C_t^b 为 AHRS 载体坐标系 b 相对地理坐标系 g 的姿态矩阵。由 AHRS 输出的姿态角(航向 Ψ 、俯仰 θ 、横滚 γ)， C_t^b 可表示为^[5]：

$$C_t^b = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \Psi & -\sin \Psi & 0 \\ \sin \Psi & \cos \Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

而正交阵 $C_b^g = [C_t^b]^{-1}$ ，可通过公式(7)计算得到。

2.2 求解 C_t^b 及 C_n^t

公式(6)中的 C_t^b 代表靶标坐标系 t 相对于 AHRS 载体坐标系 b 的姿态矩阵。对于 C_t^b 的求解，文中提出一种基于水平转台的空间轴线拟合法。通过对 AHRS 和辅助靶标构成的标定系统进行三次姿态调整及旋转(图 4)，以求取 t 系 3 个坐标轴与 b 系对应坐标轴之间的夹角，进而获得两坐标系之间的姿态

转换矩阵。

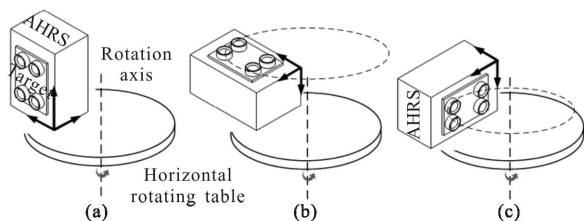


图 4 标定步骤

Fig.4 Calibration experiment

为计算 C_t^b , 需求取靶标坐标系 t 与载体坐标系 b 对应轴之间的方向余弦。为计算两坐标系对应轴之间的方向余弦, 文中将图 2 所示装置放置在水平转台上, 通过调节转台的水平支撑座, 使转台的旋转轴线与水平面垂直。同时微调 AHRS 的姿态, 保证其三轴输出角度中的某两个示值趋近于零 (如图 4 所示, 分别将其正向、竖向及侧向放置)。待系统调整完毕且 AHRS 输出稳定后, 每间隔一定角度旋转一次水平转台, 同时用激光跟踪仪记录辅助靶标上 o 点在 n 坐标系下的三维坐标。若干次旋转后, o 点的轨迹在空间中形成一段圆弧, 根据空间圆弧的法向量与 b 坐标系某一坐标轴平行, 可得到该坐标轴的方向向量。以 AHRS 正向放置为例(图 4(b)), 由于此时 AHRS 输出俯仰角、横滚角示值理论上为零, 航向轴与水平面垂直, 即其平行于水平转台的旋转轴。因此, 通过 o 点在空间中形成的圆弧轨迹, 可通过最小二乘法拟合出水平转台的旋转轴(即水平面法向量, 平行于 AHRS 的航向轴)。

同时, 对于系统旋转过程中的任意一个位置, 分别测量 o, x_i, y_i 号点在 n 系中的三维坐标, 此时 o, x_i, y_i 号点在 n 坐标系与 t 坐标系中的坐标均已知, 可计算出 t 坐标系中 3 个坐标轴在 n 坐标系中的方向向量^[9], 分别记作 n_{nx}, n_{ny}, n_{nz} 。根据 3 对同名点坐标系转换方法^[7], 导航坐标系 n 相对于靶标坐标系 t 的姿态矩阵 C_n^t 可被求出(公式(8)), 表示如下:

$$C_n^t = [n_{nx} \ n_{ny} \ n_{nz}] = \begin{bmatrix} n_{nx1} & n_{nx2} & n_{nx3} \\ n_{ny1} & n_{ny2} & n_{ny3} \\ n_{nz1} & n_{nz2} & n_{nz3} \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

同时, 通过最小二乘拟合得 AHRS 航向轴的方向向量, 记作:

$$n_{nbYAW} = [n_{nbYAW1} \ n_{nbYAW2} \ n_{nbYAW3}]^T \quad (9)$$

以图 4 所示姿态重复上述步骤, 可得 AHRS 的俯仰轴以及横滚轴的方向向量, 如公式(10)所示:

$$\begin{aligned} n_{nbPITCH} &= [n_{nbPITCH1} \ n_{nbPITCH2} \ n_{nbPITCH3}]^T \\ n_{nbROLL} &= [n_{nbROLL1} \ n_{nbROLL2} \ n_{nbROLL3}]^T \end{aligned} \quad (10)$$

则 AHRS 航向轴与靶标坐标系三坐标轴的方向余弦分别为:

$$\begin{aligned} \cos(n_{nbYAW}, n_{nx}) &= \frac{n_{nbYAW} \cdot n_{nx}}{|n_{nbYAW}| \cdot |n_{nx}|} = c_1 \\ \cos(n_{nbYAW}, n_{ny}) &= \frac{n_{nbYAW} \cdot n_{ny}}{|n_{nbYAW}| \cdot |n_{ny}|} = c_2 \\ \cos(n_{nbYAW}, n_{nz}) &= \frac{n_{nbYAW} \cdot n_{nz}}{|n_{nbYAW}| \cdot |n_{nz}|} = c_3 \end{aligned} \quad (11)$$

同理, AHRS 的俯仰轴、横滚轴与靶标坐标系 t 三坐标轴夹角构成的方向余弦分别被表示为 $[c_4 \ c_5 \ c_6]$ 、 $[c_7 \ c_8 \ c_9]$ 。设 t 坐标系中的点记作 $P_t = [X_t \ Y_t \ Z_t]^T$, 则该点在 b 坐标系中可被表示为:

$$\begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 X_t + c_2 Y_t + c_3 Z_t \\ c_4 X_t + c_5 Y_t + c_6 Z_t \\ c_7 X_t + c_8 Y_t + c_9 Z_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \\ c_4 & c_5 & c_6 \\ c_7 & c_8 & c_9 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: $\begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \\ c_4 & c_5 & c_6 \\ c_7 & c_8 & c_9 \end{bmatrix}$ 即为所求 C_t^b 。综上, g 系相对 n 系

的姿态矩阵 C_g^n 可以求得。

3 实验

为验证方法的准确性与可靠性, 本节对实验步骤进行详细说明: 实验所用激光跟踪仪型号为 LEICA-AT901LR, 其三维坐标测量误差主要成分为测角误差, 定位精度 $15 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}/\text{m}$, 有效测量范围 160 m; 水平转台为“九江精达-ZDFT-552”多齿分度台, 其转动精度为 $0.2''$; AHRS 模块为高精度激光捷联惯导系统, 姿态测量精度达 0.1° 。通过微调分度台下面 3 个支撑座, 其旋转轴与水平面垂直。在整个标定对准过程中, 激光跟踪仪的位置始终保持不变。水平转台每旋转一定角度后, 移动靶球, 按照固定顺序记录 1、2、3 号点的三维坐标。

3.1 轴线矢量拟合

标定实验现场见图 5, 右侧为激光跟踪仪, 左侧为组合装置、水平转台, 其中水平转台已调至旋转轴与重力垂线方向平行, 激光跟踪仪的位置保持不变。

依据 2.2 节方法, 每次将 AHRS 变换一个姿态放置在水平转台上, 旋转角度, 移动靶球, 按照顺序记录 1、2、3 点坐标, 总共记录 120 个位置数据, 每个位置的三维点坐标及拟合轴线如图 6 所示(以 AHRS 平放为例, 轴线拟合示意图)。

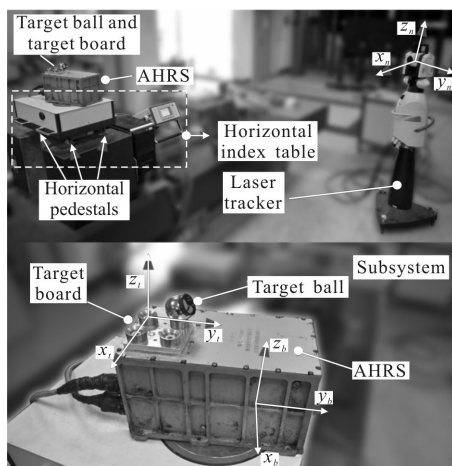


图 5 实验场景及装置

Fig.5 Experiment environment and experimental device

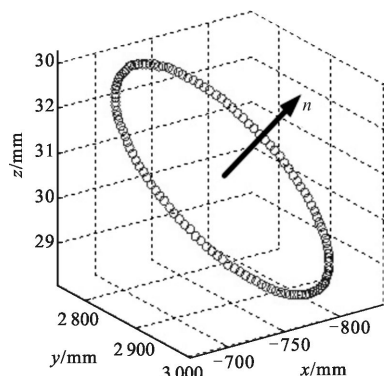


图 6 轴线拟合示意图

Fig.6 Schematic diagram of axes fitting

3.2 计算姿态矩阵

b 坐标系的轴向矢量确定后, 根据第 2 节标定算法所述, 计算得姿态矩阵 C_g^n 。因 C_i^b 保持不变, 为确保实验结果的一般性, 改变激光跟踪仪位置, 重新记录 12 种姿态下 AHRS 的数据。按照上述实验过程, 每种姿态均可以得到一个 C_g^n 值(见表 2)。

表 2 中各元素值基本恒定, 由转换矩阵求解导航坐标系 n 与地理坐标系 g 之间的一组欧拉角进一步分析对准结果, 其标准差小于 0.25° (表 3), 能够满足 AGV 工作中所需的姿态精度。

表 2 转换矩阵, 对应欧拉角

Tab.2 Coordinate transformation matrix, Euler angles

No.	Matrix elements			Euler angles/(°)	
1	0.757 416	-0.651 733	0.024 910	-40.774 7	Yaw
	0.654 029	0.758 383	0.001 283	-0.073 5	Pitch
	-0.019 009	0.021 026	1.000 554	1.426 1	Roll
2	0.757 119	-0.651 896	0.026 083	-40.764 3	Yaw
	0.652 924	0.757 371	0.001 478	-0.084 6	Pitch
	-0.018 271	0.021 079	0.998 987	1.495 6	Roll
3	0.757 974	-0.652 143	0.027 562	-40.807 5	Yaw
	0.653 540	0.756 935	0.001 680	-0.096 3	Pitch
	-0.018 103	0.020 992	0.999 910	1.578 9	Roll
4	0.757 985	-0.652 466	0.029 978	-40.800 3	Yaw
	0.653 212	0.756 744	0.001 483	-0.085 0	Pitch
	-0.018 677	0.021 310	0.999 823	1.717 4	Roll
5	0.757 841	-0.652 721	0.031 622	-40.757 2	Yaw
	0.652 559	0.757 139	0.000 458	-0.026 2	Pitch
	-0.018 629	0.021 459	0.999 799	1.811 6	Roll
6	0.757 423	-0.653 157	0.032 481	-40.735 2	Yaw
	0.652 142	0.757 245	-0.000 785	0.045 0	Pitch
	-0.018 384	0.021 155	0.999 613	1.861 1	Roll
7	0.756 933	-0.653 137	0.033 510	-40.721 2	Yaw
	0.652 297	0.757 797	-0.002 553	0.146 3	Pitch
	-0.018 496	0.021 436	0.999 777	1.919 7	Roll
8	0.756 674	-0.653 063	0.033 942	-40.736 2	Yaw
	0.652 569	0.757 712	-0.004 342	0.248 8	Pitch
	-0.018 640	0.021 584	0.999 661	1.944 6	Roll
9	0.756 116	-0.653 025	0.033 457	-40.739 1	Yaw
	0.652 366	0.757 399	-0.005 652	0.323 8	Pitch
	-0.018 815	0.021 140	0.998 846	1.918 4	Roll
10	0.756 837	-0.652 028	0.031 902	-40.783 0	Yaw
	0.653 875	0.757 977	-0.007 708	0.441 6	Pitch
	-0.017 988	0.021 068	1.000 151	1.827 0	Roll
11	0.756 666	-0.651 712	0.030 546	-40.772 8	Yaw
	0.653 309	0.757 593	-0.008 838	0.506 4	Pitch
	-0.018 008	0.020 953	0.999 132	1.751 1	Roll
12	0.756 969	-0.651 890	0.029 360	-40.811 9	Yaw
	0.653 830	0.757 152	-0.009 041	0.518 0	Pitch
	-0.017 475	0.020 421	0.999 472	1.682 6	Roll

表 3 欧拉角统计特征值

Tab.3 Statistical characteristics of Euler angles

Name	Max/(°)	Min/(°)	Average/(°)	Standard deviation
Yaw	-40.721 2	-40.811 9	-40.767	0.029
Pitch	0.518 0	-0.096 3	0.155	0.233
Roll	1.944 6	1.426 1	1.745	0.171

4 结 论

文中着重设计了基于外部测量坐标系的 AHRS 姿态信息对准模型,最终坐标轴对准精确度 RMS 误差小于 0.25°。坐标系转换关系将激光跟踪仪坐标系作为外部测量坐标系与地理坐标系相关联,有效了解决组合定位的对准问题。同时,该方法适用多种外部测量装置,并能将航迹推算与绝对定位两类方案相融合,相比单独一类进行定位具有更优的性能,为工业现场多传感器导航提供了新的组合方案。

该方案在对准过程中的系统误差主要为轴线拟合误差。经分析其包含算法固有因素和实验装置因素的影响,前者可以通过合理选择测量点及数量来减小,后者主要包括水平转台的倾斜误差、激光跟踪仪测量误差及 AHRS 自身姿态误差。选用更高精度的实验装置能够有效减小上述误差影响,而后续研究工作重点在于对现有误差进行补偿,深入研究影响坐标转换准确度的因素,改进标定对准模型与转换矩阵求取,以进一步提高标定精度,使该方法更加便捷、稳定。

参 考 文 献:

[1] Oleari F, Magnani M, Ronzoni D. Industrial AGVs: toward a pervasive diffusion in modern factory ware houses[C]//2014 IEEE International Conference on Intelligent Computer

Communication and Processing, 2014: 233-238.

[2] Yuan Beijiang, Chen Dongdong, Wang Tianmiao. AGV system based on multi-sensor information fusion [C]//2014 International Symposium on Computer, Consumer and Control, 2014: 900-5.

[3] Han Lu, Jing Zhanrong, Duan Zhemin. Laser gyro/GPS integrated attitude estimation system for ballistic missile [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 915-920. (in Chinese)
韩璐, 景占荣, 段哲民. 采用激光陀螺/GPS 的导弹组合定姿系统[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5): 915-920.

[4] Huang Yuan, Wang Kedong, Liu Bao. INS/CNS integration schemes for a maneuvering spacecraft[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1622-1528. (in Chinese)
黄远, 王可东, 刘宝. 机动天基平台惯性/天文导航组合模式研究[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1622-1528.

[5] Qin Yongyuan. Inertial Navigation II [M]. Beijing: Scinces Press, 2014. (in Chinese)
秦永元. 惯性导航(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2014.

[6] Tazartes D. An historical perspective on inertial navigation systems [C]//2014 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems, 2014, 12: 25-26.

[7] Zhang Guangjun. Vision Measurement [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)
张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

[8] Cui Kai, Liu Zhaohui, Li Zhiguo, et al. Calibrating tracing errors for space-used telescope by coordinate transformation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (S): 151-156. (in Chinese)
崔凯, 刘朝晖, 李治国, 等. 坐标变换在空间望远镜误差标定中的应用[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(S): 151-156.

[9] Zhang Bo, Wei Zhenzhong, Zhang Guangjun. Rapid coordinate transformation between a robot and a laser tracker [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31 (9): 1986-1990. (in Chinese)
张博, 魏振忠, 张广军. 机器人坐标系与激光跟踪仪坐标系的快速转换方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(9): 1986-1990.