

引文格式: 刘净瑜, 石卫江, 党锦龙, 等. 一种 AGV 高精度空间定位的光电传感网络[J]. 航空制造技术, 2022, 65(22): 80–86, 93.

LIU Jingyu, SHI Weijiang, DANG Jinlong, et al. Photoelectric sensor network for AGV high-precision spatial positioning[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(22): 80–86, 93.

一种 AGV 高精度空间定位的光电传感网络*

刘净瑜¹, 石卫江², 党锦龙², 武介成², 王 颜¹, 刘志刚²

(1. 北京卫星制造厂有限公司, 北京 100080;

2. 西安交通大学机械工程学院设计科学与基础部件研究所, 西安 710049)

[摘要] AGV 移动平台作为一种自动化装卸、搬运设备以及高精度运载平台, 在智慧工厂、智能仓储和智慧物流等领域都有广泛的应用, 对于 AGV 自动导航定位的研究具有十分重要的意义。针对 AGV 运动毫米级空间定位精度的应用场景, 研究了一种正交线性激光扫描机构与光电传感网络感知的角度测量方法, 提出了一种基于虚拟相机投影模型的空间定位方法, 并对系统基于光束平差法的参数标定方法进行了研究, 实现对 AGV 移动平台的高精度三维空间定位。

关键词: AGV 移动平台; 虚拟相机投影模型; 空间定位; 参数标定; 光电传感网络

Photoelectric Sensor Network for AGV High-Precision Spatial Positioning

LIU Jingyu¹, SHI Weijiang², DANG Jinlong², WU Jiecheng², WANG Yan¹, LIU Zhigang²

(1. Beijing Spacecrafts Co., Ltd., Beijing 100080, China;

2. Institute of Design Science and Basic Components, School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

[ABSTRACT] As a kind of automated loading and unloading, handling equipment and high-precision transportation platform, the AGV mobile platform has a wide range of applications in the fields of smart factories, smart warehousing and smart logistics. It is of great significance for the research of AGV automatic navigation and positioning. Aiming at the application scenarios of AGV motion millimeter-level spatial positioning accuracy, this paper studies an angle measurement method of orthogonal line laser scanning mechanism and photoelectric sensor network perception, and proposes a spatial positioning method based on a virtual camera projection model. The system parameter calibration method that is based on the beam adjustment method is studied to realize the high-precision 3D positioning of the AGV mobile platform.

Keywords: AGV mobile platform; Virtual camera projection model; Spatial positioning; Parameter calibration; Photoelectric sensor network

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.22.080

自动导航系统是实现 AGV 移动机器人智能化的基础, 近年来得到了广泛的研究和发展。目前 AGV 大多通过激光、磁感应、视觉、惯性、无线通信等方式进行导航定位。激光导航^[1]是通过测量接收激光所用时间(从激光器发射激光到靶点), 并与光速相乘, 最终得到 AGV 与障

碍物之间的距离^[2]。目前德国 SICK 激光扫描仪的物体分辨率最高可达 30 mm, 该方法定位精度一般为厘米级, 且一般为二维定位^[3]。磁性器件导航^[4]通过获取 AGV 在路径上的磁场信号来获取现在行驶路线和预设路线的偏差, 该方法定位精度低, 导引路径单一; 视觉定位通

* 基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1701300)。

过摄像机采集图像信息,经过图像处理确定 AGV 位置,该方法具有测量范围广、精度高等优点,但是对环境抗干扰能力差。视觉与惯性相结合的双摄像头扫码导航,通过视觉测量的方法,结合惯性传感器得到偏航误差,再纠正 AGV 位姿^[5-7]。无线定位技术中,UWB 定位比 WIFI、蓝牙定位稳定性更强、测量范围更广,目前可达到 10 cm 定位精度。综上所述,目前国内外定位技术难以达到毫米级的三维空间定位,针对毫米级精度要求的 AGV 三维空间定位导航需求,本文构建光电传感网络定位系统对 AGV 进行定位导航:将激光扫描机构安装在 AGV 上,通过预设的传感器网络,得到 AGV 车的实时位姿信息,并通过上位机对 AGV 进行路径纠正和规划。

1 光电传感网络角度测量模型

单台激光扫描机构可测量出目标点的水平角及俯仰角,为光电传感网络定位模型奠定了基础。另外,光电传感网络的测角精度也是影响最终的定位精度的误差之一。

1.1 光电传感网络硬件组成

如图 1 所示,系统由光电传感网络节点(包含光电传感器和节点处理器)、激光扫描机构、同步光源系统、路由器和上位机软件组成。测量时,在空间内合理布置多个光电传感网络节点,将小型化的激光扫描机构安装在定位对象上,光电传感器接收到激光扫描机构的激光信号和同步光源系统的基准光信号,经由节点处理器计算后发给上位机进行定位对象的轨迹显示。其中,同步光源的作用在于为光电传感网络提供时钟基准。

1.2 单台激光扫描机构角度测量模型

单个光电传感器的角度测量原理如图 2 所示。建立激光扫描机构的相机坐标系 $O-XYZ$,其中, Z 轴与旋转轴重合。激光扫描机构在空间内 360° 高速旋转,每

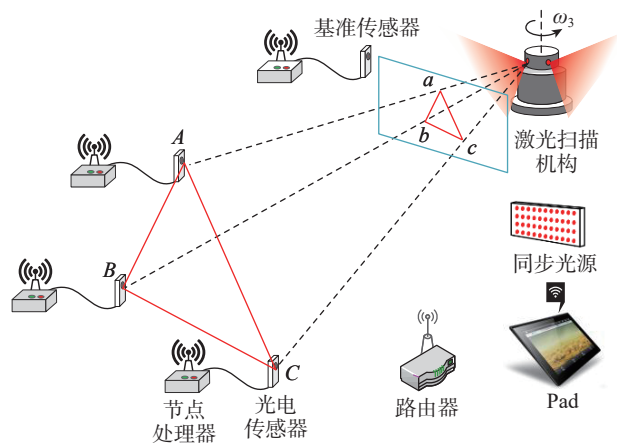


图 1 光电传感网络硬件组成

Fig.1 Photoelectric sensor network hardware composition

一圈扫过基准传感器 T_0 处为零位时刻。设定激光平面 L_p 扫过基准传感器的时刻为初始时刻 r_1 ,随着激光扫描头的旋转,光电传感器节点 T_1 将探测到激光平面 L_p 和 L_q ,记为时刻 p_1 和 p_2 。据此可以得到第 k 个测量周期内激光平面 L_p 和 L_q 从基准传感器位置旋转到光电传感器节点 T_1 位置的转角,即

$$\begin{cases} \theta_1(k) = \frac{p_1(k) - r_1(k)}{r_1(k) - r_1(k-1)} \cdot 2\pi \\ \theta_2(k) = \frac{p_2(k) - r_1(k)}{r_1(k) - r_1(k-1)} \cdot 2\pi \end{cases} \quad (1)$$

为了将系统所有的光电传感器时钟统一起来,将同步光源时钟序列作为标准的始终序列,将基准传感器 T_0 与光电传感器节点 $T_1 \sim T_n$ 的时钟周期全统一在标准序列之下。由同步光源时钟序列及光电传感器收到的脉冲序列图可知(图 3),第 k 个测量周期内的 r_1 、 p_1 、 p_2 经同步光源校准后的值 R 、 P_1 、 P_2 分别为

$$\begin{cases} R(k) = t_{da}(n) + [r_1(k) - t_{da}(n)] \cdot \left[\frac{t_a(n+1) - t_a(n)}{t_{da}(n+1) - t_{da}(n)} \right] \\ P_1(k) = t_{sa}(n) + [p_1(k) - t_{sa}(n)] \cdot \left[\frac{t_a(n+1) - t_a(n)}{t_{sa}(n+1) - t_{sa}(n)} \right] \\ P_2(k) = t_{sa}(n) + [p_2(k) - t_{sa}(n)] \cdot \left[\frac{t_a(n+1) - t_a(n)}{t_{sa}(n+1) - t_{sa}(n)} \right] \end{cases} \quad (2)$$

式中, t_a 表示同步光脉冲时序; t_{sa} 表示节点光电传感器脉冲时序; t_{da} 表示基准传感器脉冲时序。

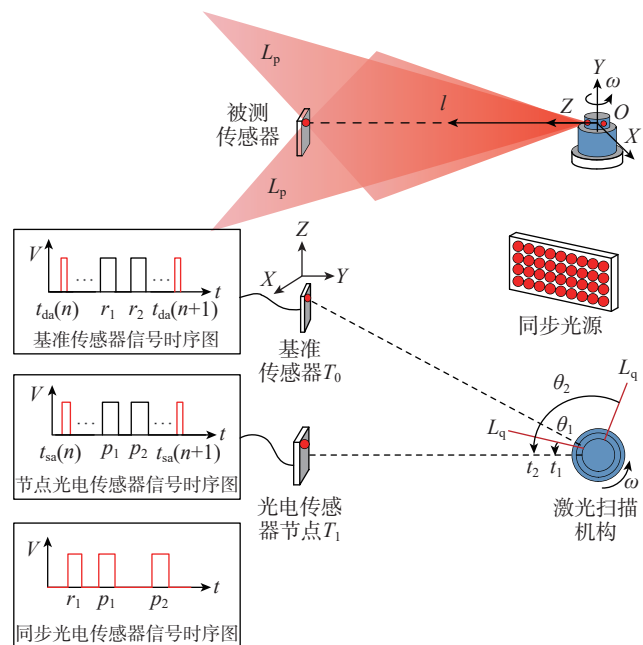


图 2 光电传感定位网络测角模型

Fig.2 Angular measurement model of photoelectric sensor positioning network

将 R 、 P_1 、 P_2 代入式(2)后即可得到第 k 个测量周期内激光平面 L_p 和 L_q 从基准传感器位置(零位时刻)旋转到光电传感器节点 T_1 位置的转角精确值,即

$$\begin{cases} \theta_1(k) = \frac{P_1(k) - R(k)}{R(k) - R(k-1)} \cdot 2\pi \\ \theta_2(k) = \frac{P_2(k) - R(k)}{R(k) - R(k-1)} \cdot 2\pi \end{cases} \quad (3)$$

则激光平面由零位时刻扫过光电传感器节点 T_1 时的旋转矩阵为

$$\begin{aligned} R_{\theta_1} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ R_{\theta_2} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

设两个激光平面在零位时刻的初始法向量分别为 N_1 、 N_2 , 光电传感器节点 T_1 在相机坐标系下的三维坐标为 T_1 , 则激光扫描机构位置 O (相机坐标系原点) 到光电传感器节点 T_1 的一条空间直线 L 为

$$\begin{cases} (R_{\theta_1} N_1) \cdot (T_1 - O) = 0 \\ (R_{\theta_2} N_2) \cdot (T_1 - O) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

该直线的方向向量 α 为

$$\alpha = [a \quad b \quad c]^T = (R_{\theta_1} N_1) \times (R_{\theta_2} N_2) \quad (6)$$

进而可以计算出节点 T_1 相对相机坐标系 O -XYZ 的水平角 A 和俯仰角 E , 角度定义如图 4 所示。

$$\begin{aligned} A &= \arctan\left(\frac{c}{a}\right), \\ E &= \arcsin\left(\frac{b}{\sqrt{a^2 + c^2}}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

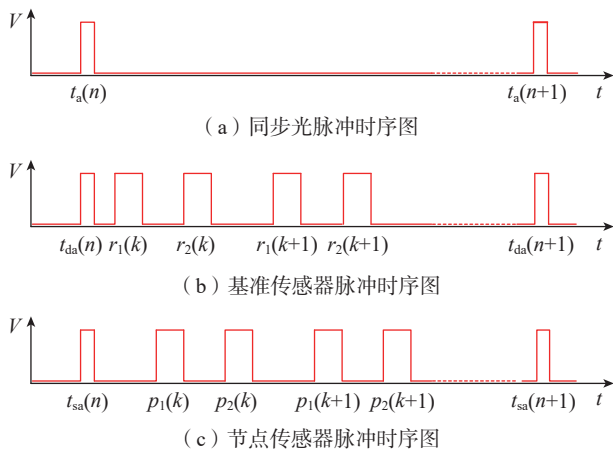


图3 光电传感定位网络脉冲时序图

Fig.3 Pulse sequence diagram of photoelectric sensor positioning network

2 基于虚拟相机模型的光电传感网络定位方法及参数标定

由前述分析可知,单台激光扫描机构可求得目标点的水平角及俯仰角,接下来通过空间内布置光电传感网络节点,来求解激光扫描机构位姿,进而实现对 AGV 导航定位。

2.1 定位模型

设定光电传感网络 4 个节点 $T_1 \sim T_4$ 的世界坐标系坐标为 A 、 B 、 C 、 D , 在相机坐标系下的三维坐标值为 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 。定位模型如图 5 所示。

其中, A 、 B 、 C 3 个点为计算点, D 为验证点。 α 、 β 、 γ 分别为相机坐标系原点 O 到各个节点 $T_1 \sim T_3$ 的方向向量, 由测角模型可知:

$$\begin{cases} \alpha = (R_{\theta_{11}} N_1) \times (R_{\theta_{12}} N_2) \\ \beta = (R_{\theta_{21}} N_1) \times (R_{\theta_{22}} N_2) \\ \gamma = (R_{\theta_{31}} N_1) \times (R_{\theta_{32}} N_2) \end{cases} \quad (8)$$

相机坐标系原点 O 到节点 $T_1 \sim T_3$ 的距离为 OT_1 、 OT_2 、 OT_3 , 由余弦定理得到

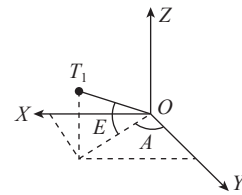


图4 光电传感网络水平角与俯仰角

Fig.4 Horizontal angle and pitch angle of photoelectric sensor network

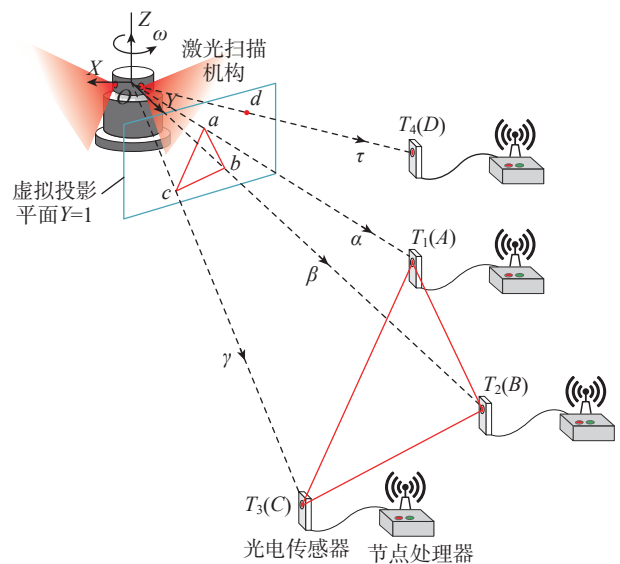


图5 光电传感定位模型

Fig.5 Photoelectric sensing positioning model

$$\begin{cases} OT_1^2 + OT_2^2 - 2 \cdot OT_1 \cdot OT_2 \cdot \cos \langle \alpha, \beta \rangle = T_1 T_2^2 \\ OT_1^2 + OT_3^2 - 2 \cdot OT_1 \cdot OT_3 \cdot \cos \langle \alpha, \gamma \rangle = T_1 T_3^2 \\ OT_2^2 + OT_3^2 - 2 \cdot OT_2 \cdot OT_3 \cdot \cos \langle \beta, \gamma \rangle = T_2 T_3^2 \end{cases} \quad (9)$$

式中, $\cos \langle \alpha, \beta \rangle = \frac{\alpha \cdot \beta}{|\alpha| \cdot |\beta|}$, $\cos \langle \alpha, \gamma \rangle = \frac{\alpha \cdot \gamma}{|\alpha| \cdot |\gamma|}$, $\cos \langle$

$$\beta, \gamma \rangle = \frac{\beta \cdot \gamma}{|\beta| \cdot |\gamma|}$$
, $T_1 T_2, T_1 T_3, T_2 T_3$ 的距离分别为
$$\begin{cases} T_1 T_2 = AB = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (z_A - z_B)^2} \\ T_1 T_3 = AC = \sqrt{(x_A - x_C)^2 + (y_A - y_C)^2 + (z_A - z_C)^2} \\ T_2 T_3 = BC = \sqrt{(x_B - x_C)^2 + (y_B - y_C)^2 + (z_B - z_C)^2} \end{cases} \quad (10)$$

消元化简, 同除以 OT_3^2 , 令 $x = \frac{OT_1}{OT_3}$, $y = \frac{OT_2}{OT_3}$, $u = \frac{T_1 T_2^2}{OT_3^2}$,

$v = \frac{T_2 T_3^2}{T_1 T_2^2}$, $w = \frac{T_1 T_3^2}{T_1 T_3^2}$, 可得

$$\begin{cases} x^2 + y^2 - 2 \cdot x \cdot y \cdot \cos \langle \alpha, \beta \rangle = u \\ x^2 + 1 - 2 \cdot x \cdot \cos \langle \alpha, \gamma \rangle = w \\ y^2 + 1 - 2 \cdot y \cdot \cos \langle \beta, \gamma \rangle = v \end{cases} \quad (11)$$

将式(11)的第1个方程代入式(11)的第2、3个方程, 可以化简为

$$\begin{cases} (1-w)x^2 - w \cdot y^2 - 2 \cdot x \cdot \cos \langle \alpha, \gamma \rangle + 2 \cdot w \cdot x \cdot y \cdot \cos \langle \alpha, \beta \rangle + 1 = 0 \\ (1-v)x^2 - v \cdot y^2 - 2 \cdot y \cdot \cos \langle \beta, \gamma \rangle + 2 \cdot v \cdot x \cdot y \cdot \cos \langle \alpha, \beta \rangle + 1 = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式(12)为二元二次方程组, $w, v, \cos \langle \alpha, \beta \rangle, \cos \langle \alpha, \gamma \rangle, \cos \langle \beta, \gamma \rangle$ 均为已知。利用 Wu-Ritt 零点分解方法, 式(12)可等效为

$$\begin{cases} a_4 x^4 + a_3 x^3 + a_2 x^2 + a_1 x + a_0 = 0 \\ b_1 y - b_0 = 0 \end{cases} \quad (13)$$

$a_0 \sim a_4, b_0, b_1$ 均可对应求出, 进而可求出 x, y 的值。理论上, 式(13)有4组解, 后文将利用第4个节点 T_4 来验证取得最优解。先将4组不同解分别代入式(9)中, 可求得每组解对应的相机坐标系原点到各个节点的距离 OT_1, OT_2, OT_3 , 进而求出节点 $T_1 \sim T_3$ 在相机坐标系下的三维坐标值 $T_1 \sim T_3$ 为

$$\begin{cases} T_1 = \frac{\alpha}{|\alpha|} \cdot OT_1 \\ T_2 = \frac{\beta}{|\beta|} \cdot OT_2 \\ T_3 = \frac{\gamma}{|\gamma|} \cdot OT_3 \end{cases} \quad (14)$$

设定相机坐标系 $O_C-X_C Y_C Z_C$ 和世界坐标系 $O_W-X_W Y_W Z_W$, 图6为两坐标系变换示意图, R 表示相机坐标系相对于世界坐标系的旋转矩阵; t 表示相机坐标系相对于世界坐标系的平移矩阵。

节点 $T_1 \sim T_3$ 在相机坐标系下的三维坐标值 $T_1 \sim T_3$ 与世界坐标系下的三维坐标 A, B, C 之间的关系为

$$\begin{cases} T_1 = RA + t \\ T_2 = RB + t \\ T_3 = RC + t \end{cases} \quad (15)$$

将 R, t 展开为

$$\begin{cases} R = R_x R_y R_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos r_x & -\sin r_x \\ 0 & \sin r_x & \cos r_x \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \cos r_y & 0 & \sin r_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin r_y & 0 & \cos r_y \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \cos r_z & -\sin r_z & 0 \\ \sin r_z & \cos r_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ t = [t_x \quad t_y \quad t_z]^T \end{cases} \quad (16)$$

相机坐标系相对于世界坐标系的实时旋转矩阵 R 、平移矩阵 t 即反映了激光扫描机构的实时姿态状态, 旋转矩阵 R 由式(16)确定的欧拉角反映了激光扫描机构的姿态角度; 平移矩阵 t 为激光扫描机构的空间平移量, 反映了实时位置。

设定 $T=[T_1 \ T_2 \ T_3]$ 与 $P=[A \ B \ C]=[P_1 \ P_2 \ P_3]$ 分别为节点 $T_1 \sim T_3$ 在相机坐标系和世界坐标系下的点集。则式(15)等价于

$$T = RP + t \quad (17)$$

点集 T 与 P 的中心点 μ_T, μ_P 分别为

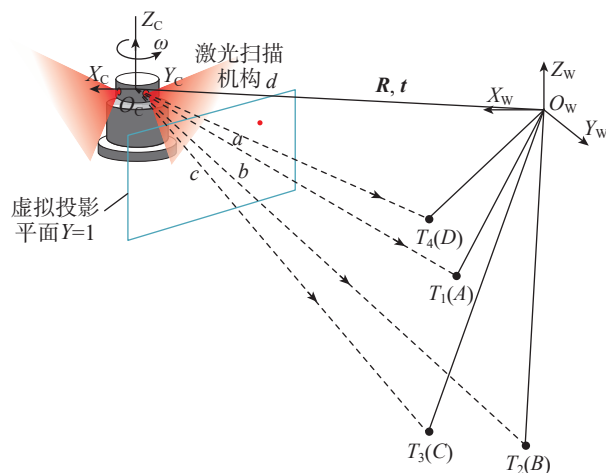


图6 坐标转换示意图

Fig.6 Coordinate conversion diagram

$$\begin{cases} \mu_T = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 T_i \\ \mu_P = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 P_i \end{cases} \quad (18)$$

则点集之间的协方差矩阵为

$$H = \sum_{i=1}^3 (P_i - \mu_P)(T_i - \mu_T)^T \quad (19)$$

通过奇异值分解法(SVD)获取矩阵 U 、 S 、 V

$$[U \ S \ V] = \text{SVD}(H) \quad (20)$$

进而计算旋转矩阵 R 为

$$R = VU^T \quad (21)$$

最后可通过 R 计算出平移矩阵 t 为

$$t = \mu_T - R\mu_P \quad (22)$$

由此,求得了式(15)每组解对应的相机坐标系相对于世界坐标系的旋转、平移矩阵 R 、 t 。接下来利用节点 T_4 来验证,确定最优的位姿结果。设定相机坐标系下原点 O 到节点 T_4 的直线向量为 τ ,则有

$$\tau = (R_{\theta_{41}} N_1) \times (R_{\theta_{42}} N_2) = [x_c \ y_c \ z_c]^T \quad (23)$$

将 T_4 在世界坐标系下的坐标值 D 代入每组解对应的旋转平移矩阵 R 、 t 中,求得经坐标系变换之后的坐标值 T'_4 为

$$T'_4 = RD + t = [x_D \ y_D \ z_D]^T \quad (24)$$

在相机坐标系前方 $Y=1$ 的平面建立虚拟的投影平面,则 T_4 、 T'_4 的齐次坐标为

$$\begin{cases} t_c = \begin{bmatrix} x_c & 1 & z_c \\ y_c & & y_c \end{bmatrix}^T \\ t_w = \begin{bmatrix} x_D & 1 & z_D \\ y_D & & y_D \end{bmatrix}^T \end{cases} \quad (25)$$

建立投影误差函数为

$$\psi = \left(\frac{x_c}{y_c} - \frac{x_D}{y_D} \right)^2 + \left(\frac{z_c}{y_c} - \frac{z_D}{y_D} \right)^2 \quad (26)$$

求解使得 ψ 最小的一对 R 、 t ,即为最优的激光发射机构位姿 R 、 t 解。激光扫描机构坐标系原点 O_c 与其在世界坐标系下的坐标值 O_w 之间转换关系为

$$O_c = RO_w + t \quad (27)$$

由于 $O_c = [0 \ 0 \ 0]^T$,由式(27)可计算出激光扫描机构坐标系原点在世界坐标系下的坐标值 O_w ,即为激光扫描机构的位姿结果。

$$O_w = -R^T t \quad (28)$$

2.2 光电传感网络参数标定

2.2.1 参数定义

激光扫描机构的初始法向量 N_1 、 N_2 为激光平面 L_p 扫过基准传感器时两激光平面 L_p 与 L_q 各自的法向量,

即为零位时刻的平面法向量。激光扫描机构的坐标系,即相机坐标系如图7所示。

两个激光平面 L_p 、 L_q 与旋转轴相交于原点 O , Z 轴与旋转轴重合, X 轴为激光平面 L_p 与平面 XOY 的相交线, Y 轴可由右手定则确定。设定激光平面 L_p 、 L_q 与平面 XOY 的夹角分别为 φ_1 、 φ_2 ,激光平面 L_p 、 L_q 与平面 XOY 交线之间夹角为 φ_r 。则初始法向量 N_1 、 N_2 可表示为

$$\begin{cases} N_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_1 & -\sin \varphi_1 \\ 0 & \sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ N_2 = \begin{bmatrix} \cos \varphi_r & -\sin \varphi_r & 0 \\ \sin \varphi_r & \cos \varphi_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_2 & \sin \varphi_2 \\ 0 & -\sin \varphi_2 & \cos \varphi_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (29)$$

因此, φ_1 、 φ_2 、 φ_r 3 个角度参数即为激光扫描机构平面初始法向量参数,可表征两激光平面 L_p 、 L_q 的初始位置。

2.2.2 基于光束平差法的参数标定

光束平差法是计算机视觉中基于视觉参数的优化问题,将观测图像位置和预测图像位置进行最小误差匹配,误差用非线性函数的最小平方和来表示,一般以 Levenberg-Marquardt 非线性迭代算法来最小化误差^[8-10],此算法能借由修改步长因子达到结合高斯-牛顿算法以及梯度下降法的优点,并改善两者的不足,算法稳定性较高。以光束平差的思想来优化激光扫描机构平面初始法向量参数,主要过程为:首先获取各节点的坐标值,估算激光扫描机构初始位姿及初始法向量参数,建立目标函数的数学模型,以估算值作为优化迭代的初始值,利用 Levenberg-Marquardt 算法最小化目标函数,以此确定各特征参数。基于光束平差的参数标定流程如图8所示。

根据前文的定位模型,可得到相机坐标系原点 O 到各节点 $T_1 \sim T_i$ 的空间直线方程组为

$$L: \begin{cases} (RR_{\theta_{i1}} N_1) \cdot (P_i - t) = 0 \\ (RR_{\theta_{i2}} N_2) \cdot (P_i - t) = 0 \end{cases} \quad (30)$$

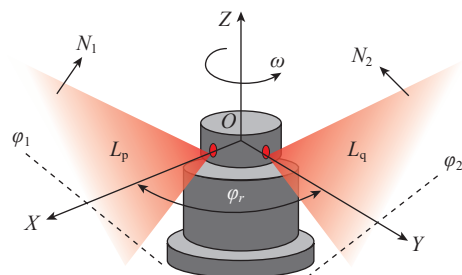


图7 激光扫描机构平面初始法向量参数
Fig.7 Initial plane normal vector parameters of laser scanning mechanism

式(30)中的未知参数有

$$\begin{cases}
 N_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_1 & -\sin \varphi_1 \\ 0 & \sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\
 N_2 = \begin{bmatrix} \cos \varphi_r & -\sin \varphi_r & 0 \\ \sin \varphi_r & \cos \varphi_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_2 & \sin \varphi_2 \\ 0 & -\sin \varphi_2 & \cos \varphi_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\
 R = R_x R_y R_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos r_x & -\sin r_x \\ 0 & \sin r_x & \cos r_x \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} \cos r_y & 0 & \sin r_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin r_y & 0 & \cos r_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos r_z & -\sin r_z & 0 \\ \sin r_z & \cos r_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 t = [t_x \quad t_y \quad t_z]^T
 \end{cases} \quad (31)$$

可见未知参数有： $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_r, r_x, r_y, r_z, t_x, t_y, t_z$ 共9个位姿参数。将 n 个节点 $T_1 \sim T_n$ 组成的点集 $P_i = [A \ B \ C \ \dots] = [P_1 \ P_2 \ P_3 \ \dots \ P_n]$ 代入式(28)中, 联立得到一个非线性超定方程:

$$\begin{cases}
 (RR_{\theta_{11}} N_1) \cdot (P_1 - t) = 0 \\
 (RR_{\theta_{12}} N_2) \cdot (P_1 - t) = 0 \\
 (RR_{\theta_{21}} N_1) \cdot (P_2 - t) = 0 \\
 (RR_{\theta_{22}} N_2) \cdot (P_2 - t) = 0 \\
 \vdots \\
 (RR_{\theta_{n1}} N_1) \cdot (P_n - t) = 0 \\
 (RR_{\theta_{n2}} N_2) \cdot (P_n - t) = 0
 \end{cases} \quad (32)$$

式中, $n \geq 5$ 。采用 Levenberg-Marquardt 优化算法对方程进行迭代求解, 算法目标函数为

$$\Phi = \sum_{k=1}^n \left\{ [(RR_{\theta_{k1}} N_1) \cdot (P_k - t)]^2 + [(RR_{\theta_{k2}} N_2) \cdot (P_k - t)]^2 \right\} \quad (33)$$

运用 LM 算法优化求解上式满足最小值时的9个参数值, 从而得到激光扫描机构平面初始法向量参数

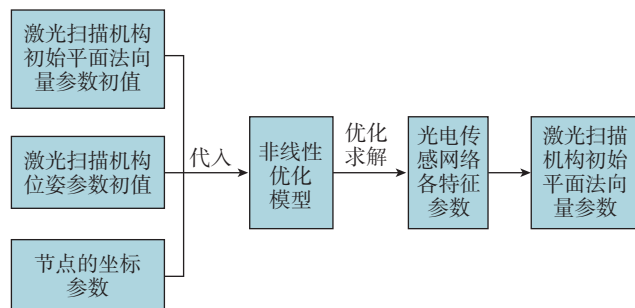


图8 基于光束平差的参数标定流程图

Fig.8 Flow chart of parameter calibration based on beam adjustment

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_r$ 。

3 AGV 空间定位试验与结果分析

3.1 AGV 空间定位系统搭建

试验前, 在空间内布置多个光电传感器和节点处理器组成光电传感网络, 利用激光跟踪仪将节点 $T_1 \sim T_i$ 在世界坐标系下的三维坐标 A, B, C, D, \dots 进行标定。将激光扫描机构与基准传感器安装在 AGV 上, 如图9所示, 尽可能将基准传感器与激光扫描机构布置在 AGV 的中线位置, 以保证相机坐标系 $O_c - X_c Y_c Z_c$ 的 X_c 轴与 AGV 行驶方向共线, Z_c 轴垂直于 AGV 车身安装面, 安装完成后标定出激光扫描机构的角度参数 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_r$ 。实验室系统搭建如图10所示。

在固定在墙面上的铝合金型材桁架上安装6个光电传感器, 与节点处理器组成的节点 $T_1 \sim T_6$ 构建光电传感网络, 利用其中可接收到完整信号的4个节点即可计算 AGV 的位姿。在 AGV 上安装有基准传感器与数据处理器, 其中基准传感器所配套的数据处理器在程序上只有节点处理器的高频计数与信号识别模块, 主要作用是将基准传感器所接收到的激光平面与同步光信号进

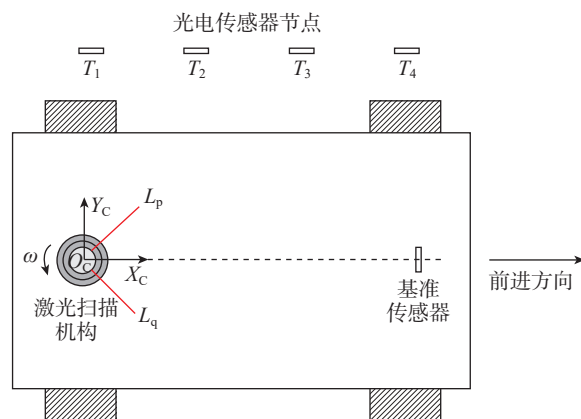


图9 AGV 导航示意图

Fig.9 AGV navigation diagram

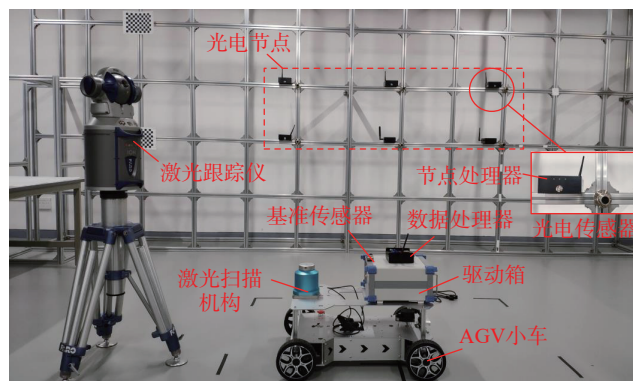


图10 光电传感网络系统搭建

Fig.10 Photoelectric sensor network system construction

行高频计数,并对信号进行识别,处理完成后将标记好的信息发送给节点处理器,结合节点处理器内部处理完成的信息,即可计算出扫描角度。

本文选用美国 FARO 高精度激光跟踪仪,测量范围 70 m,测量精度为 $18 \mu\text{m} \pm 3 \mu\text{m}/\text{m}$ 。在对基于光电传感网络定位系统的 AGV 停车精度评估时,利用激光跟踪仪的测量值作为标准值,将光电传感网络定位系统测量值与之对比,求其残差作为本文研究系统应用于 AGV 定位的停车误差。

3.2 性能评估

3.2.1 AGV 重复定位精度评估

AGV 相对于世界坐标系的实时位姿信息由激光扫描机构坐标系原点在世界坐标系下的坐标值 $O_W = -R^T t$ 来反映。将测量值各序列减去序列均值得到各自坐标分量的误差序列,即为图 11 所示结果。可以看出, x 分量波动在 $\pm 2 \text{ mm}$ 以内, y, z 分量波动均在 $\pm 5 \text{ mm}$ 以内, x 分量的波动范围要小于 y, z 分量。

经计算,各坐标分量误差序列的标准差分别为 $\sigma_x = 0.4014, \sigma_y = 2.6179, \sigma_z = 2.7976$ 。可见, x 分量误差标准差也小于 y, z 分量。由上文可知, AGV 重复定位各坐标波动是由虚拟投影坐标的波动造成的,归根到底是由系统的测量角度波动所引起。

3.2.2 AGV 停车精度评估

在空间内,将 AGV 在 50~1000 mm 的范围内任意移动 30 次,通过对起止点位置的定位坐标求解距离,比较激光跟踪仪与光电传感网络定位系统得到的距离,将二者结果作差,得到的残差如图 12 所示。可以看出,基于光电传感网络定位系统的 AGV 停车精度为 $\pm 10 \text{ mm}$ 以内,而且 AGV 停车精度与行驶距离无关,这说明系统对每一个位置定位误差都是随机且不相关的。

4 结论

针对 AGV 移动机器人高精度导航定位要求,本文构建具有毫米级三维空间定位能力的光电传感网络定位系统,首先介绍了光电传感网络硬件组成,并对基于单台正交线性激光扫描机构测角模型进行研究,以及对基于虚拟相机投影模型的光电传感网络定位方法及参数标定方法进行了研究。最后对系统性能进行评估,得出 AGV 重复定位精度优于 $\pm 5 \text{ mm}$, AGV 停车精度优于 $\pm 10 \text{ mm}$ 。

参考文献

[1] 丁健,甘钰桦,黄强.一种基于激光导航的叉车 AGV 控制系统:CN211110917U[P].2020-07-28.
DING Jian, GAN Yuhua, HUANG Qiang. A control system for forklift AGV based on laser navigation: CN211110917U[P]. 2020-07-28.

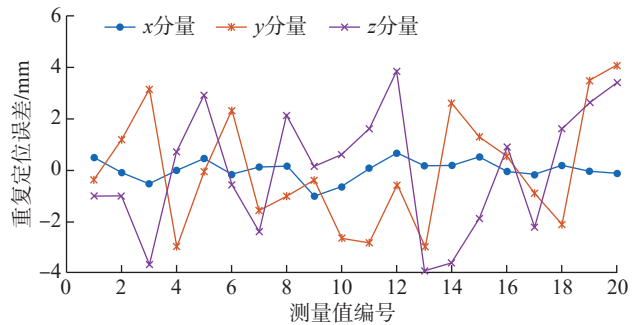


图 11 AGV 重复定位各坐标分量误差

Fig.11 Each coordinate component error when AGV repeatedly positioning

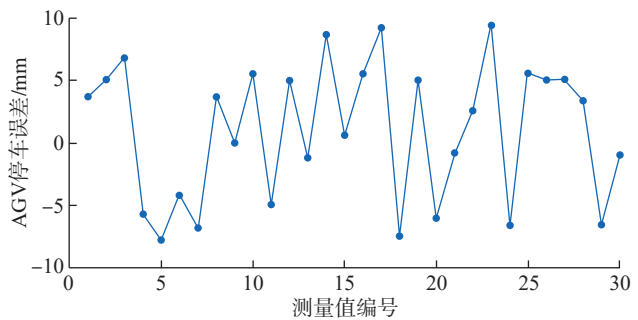


图 12 AGV 停车精度

Fig.12 AGV parking accuracy

[2] 蔡自兴,贺汉根,陈虹.未知环境中移动机器人导航控制理论与方法[M].北京:科学出版社,2009.

CAI Zixing, HE Hangen, CHEN Hong. The theory and method of navigation control of mobile robot in unknown environment[M]. Beijing: Science Press, 2009.

[3] 胡艳.基于激光导航路径识别的实验室自动引导小车(AGV)设计[J].装备制造技术,2017(5):19-25.

HU Yan. Design of laboratory automatic guiding vehicle (AGV) based on laser navigation path identification[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2017(5): 19-25.

[4] 王彪.磁导航 AGV 车载控制系统的研究与实现[D].桂林:桂林电子科技大学,2019.

WANG Biao. Research and implementation of magnetic navigation AGV vehicle control system[D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2019.

[5] 芦姝冰,于宝成,王春梅,等.基于双摄像头扫码的 AGV 运动轨迹修正方法[J].计算机工程与设计,2020,41(12):3544-3549.

LU Shubing, YU Baocheng, WANG Chunmei, et al. Moving trajectory correction method of AGV based on dual camera scanning code[J]. Computer Engineering and Design, 2020, 41(12): 3544-3549.

[6] 潘薇,蔡自兴,陈白帆.基于改进粒子滤波器的移动机器人同时定位与建图方法[J].模式识别与人工智能,2008,21(6):843-848.

PAN Wei, CAI Zixing, CHEN Baifan. An approach to mobile robot simultaneous localization and mapping based on improved particle filter[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2008, 21(6): 843-848.

[7] 李雁斌,曹作良,刘常杰,等.基于粒子滤波的全方位视觉传感器实现移动机器人导航[J].传感技术学报,2009,22(5):745-750.

(下转第 93 页)

1220–1228.

[9] 任杉, 张映锋, 黄彬彬. 生命周期大数据驱动的复杂产品智能制造服务新模式研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(22): 194–203.

REN Shan, ZHANG Yingfeng, HUANG Binbin. New pattern of lifecycle big-data-driven smart manufacturing service for complex product[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(22): 194–203.

[10] WANG Y, ZHENG L, HU Y, et al. Multi-source heterogeneous data collection and fusion for manufacturing workshop based on complex event processing[C]//Multi-Source Heterogeneous Data Collection and Fusion for Manufacturing. Auckland, 2019.

[11] 陈伟兴, 李少波, 黄海松. 离散型制造物联网过程数据主动感知及管理模型[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(1): 166–176.

CHEN Weixing, LI Shaobo, HUANG Haisong. Active perception and management model for manufacturing data in discrete IoMT-based process[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(1): 166–176.

[12] ZHONG R Y, NEWMAN S T, HUANG G Q, et al. Big data for supply chain management in the service and manufacturing sectors: Challenges, opportunities, and future perspectives[J]. Computers & Industrial Engineering, 2016, 101: 572–591.

[13] CAO H R, ZHOU K, CHEN X F. Chatter identification in end milling process based on EEMD and nonlinear dimensionless indicators[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 92: 52–59.

[14] 刘勤明, 李亚琴, 吕文元, 等. 基于自适应隐式半马尔可夫模型的设备健康诊断与寿命预测方法[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(9): 2187–2194.

LIU Qinming, LI Yaqin, LÜ Wenyuan, et al. Equipment health diagnostics and prognostics method based on adaptive HSMM[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(9): 2187–2194.

[15] 姚雪梅. 多源数据融合的设备状态监测与智能诊断研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.

YAO Xuemei. Research on device condition monitoring and intelligent diagnosis based on multi-source data fusion[D]. Guiyang: Guizhou University, 2018.

[16] 冯金金, 邓昌义, 张健. 基于工业互联网的数控机床数据采集平台应用研究[J]. 制造技术与机床, 2020(3): 124–129.

FENG Jinjin, DENG Changyi, ZHANG Jian. Application research of data acquisition platform for CNC machine tools based on industrial Internet[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2020(3): 124–129.

[17] LIU C Q, LI Y G, WANG Q, et al. A synchronous association approach of geometry, process and monitoring information for intelligent manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 58: 120–129.

[18] 魏芳, 关大力, 饶媛洁. 基于 OPC 技术的机器人数据采集与实时监控[J]. 航空精密制造技术, 2020, 56(1): 24–26.

WEI Fang, GUAN Dali, RAO Yuanjie. Robot data acquisition and real time monitoring based on OPC technology[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2020, 56(1): 24–26.

[19] 魏芳, 高诚, 张盛桂. 基于华中 HNC-8 试验平台控制系统设计[J]. 航空精密制造技术, 2021, 57(2): 60–62.

WEI Fang, GAO Cheng, ZHANG Shenggui. Design of control system based on HNC-8 test platform[J]. Aviation Precision

Manufacturing Technology, 2021, 57(2): 60–62.

[20] 王勇, 张跃. Kafka 与 HBase 在健康监测大数据平台中的应用研究[J]. 软件导刊, 2021, 20(4): 188–193.

WANG Yong, ZHANG Yue. Application research of Kafka and HBase in health monitoring big data platform[J]. Software Guide, 2021, 20(4): 188–193.

[21] 李云婷, 张海明, 黎建辉. 一种大规模 MongoDB 集群监控方案的设计与实现[J]. 科研信息化技术与应用, 2019, 10(4): 30–40.

LI Yunting, ZHANG Haiming, LI Jianhui. Design and implementation of a monitoring solution for large-scale MongoDB clusters[J]. E-Science Technology & Application, 2019, 10(4): 30–40.

[22] 刘峰, 王昭鹏, 于波, 等. 基于消息中间件及 MongoDB 的物联网应用服务平台[J]. 计算机系统应用, 2019, 28(5): 90–94.

LIU Feng, WANG Zhaopeng, YU Bo, et al. IoT application service platform based on message middleware and MongoDB[J]. Computer Systems & Applications, 2019, 28(5): 90–94.

通讯作者: 张立伟, 高级工程师, 研究方向为智能机床设计与加工技术、机床补偿技术、高速与高精度机床等。

(责编 七七)

(上接第 86 页)

LI Yanbin, CAO Zuoliang, LIU Changjie, et al. Omni-directional visual sensor for mobile robot navigation based on particle filter[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2009, 22(5): 745–750.

[8] 胡钊政, 赵斌, 李娜, 等. 基于虚拟三面体的摄像机与二维激光测距仪外参数最小解标定新算法[J]. 自动化学报, 2015, 41(11): 1951–1960.

HU Zhaozheng, ZHAO Bin, LI Na, et al. Minimal solution to extrinsic calibration of camera and 2D laser rangefinder based on virtual trihedron[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(11): 1951–1960.

[9] 刘排英, 贺少帅. LM 算法在稀疏矩阵光束法区域网平差中的应用[J]. 地理空间信息, 2019, 17(2): 96–99, 11.

LIU Paiying, HE Shaoshuai. Application of LM algorithm in bundle adjustment regional network for sparse matrix[J]. Geospatial Information, 2019, 17(2): 96–99, 11.

[10] 许文丁, 钟婷. Levenberg–Marquardt 算法收敛性研究[J]. 经贸实践, 2015(7): 138–145.

XU Wending, ZHONG Ting. Research on the convergence of Levenberg–Marquardt algorithm[J]. Economic & Trade, 2015(7): 138–145.

通讯作者: 刘志刚, 教授, 博士, 研究方向为面向高端制造的光学 GPS 系统、精密光机电系统设计、测量与控制, 三维光场成像与光学感知。

(责编 七七)