DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2023.01.043

# 基于高斯投影的惯导/GPS 机器人组合定位研究

赵毅,聂晓根,方少东,吴浩鑫

(福州大学 机械工程及自动化学院,福建 福州 350108)

摘 要:针对移动机器人室外环境下的定位问题,提出一种惯导/GPS的组合定位算法。通过 高斯-克吕格坐标投影,将机器人的地理位置坐标转换为直角坐标系坐标,利用 EKF 滤波融合 传感器信息进行组合定位,基于 STM32 开发平台搭建移动机器人硬件平台进行实验,并用 MATLAB 软件仿真对比,实验和仿真结果表明:该组合定位算法具有较高的定位精度。 关键词:移动机器人;高斯投影;EKF 滤波;组合定位 中图分类号:TP242 文献标志码:A 文章编号:1671-5276(2023)01-0173-04

# Research on Inertial Navigation/GPS Robot Combined Positioning Based on Gaussian Projection

ZHAO Yi, NIE Xiaogen, FANG Shaodong, WU Haoxin

(School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: To cope with the positioning problem of mobile robots in outdoor environments, a combined inertial navigation/GPS positioning algorithm is proposed. Through Gauss – Krüger coordinate projection, the robots ' geographic location coordinates are converted to rectangular coordinate system coordinates, EKF filter is used to fuse sensor information for combined positioning, and based on the STM32 development platform, the mobile robot hardware platform is built for experiments, with which simulation comparison is performed by MATLAB with the results showing that the proposed combined positioning algorithm has high positioning accuracy.

Keywords: mobile robot; Gaussian projection; EKF filter; combined positioning

## 0 引言

随着移动机器人的迅猛发展,对定位导航系统的性能 有着更高的要求<sup>[1]</sup>,近年来,随着智能领域和机器人技术的 快速发展,室外环境下自主移动机器人的定位技术已经成 为机器人研究的关键。定位技术不仅可单独用于移动平台 的定位,还实现了与其他传感器技术结合<sup>[2]</sup>。单一的定位 导航系统已经难以满足需求,研究基于多传感器信息融合 的组合导航系统已成为新的趋势,如与 GPS 技术结合,运 用航位推算误差修正来提高移动机器人定位精度<sup>[3]</sup>。

定位导航技术是移动机器人控制系统设计中一个十 分重要的关键技术,也是机器人寻边建图以及路径规划的 前提<sup>[4]</sup>。机器人的自主定位是基于上一时刻的姿态估 计,利用当前时刻的姿态估计来对移动机器人在环境地图 中进行定位<sup>[5]</sup>。移动机器人的定位方法主要有以下3种: 第1种是绝对定位,采用导航信标、主动或被动标识、全球 定位系统进行定位;第2种是相对定位,又称航迹推算,是 在已知移动机器人当前时刻位置的条件下,利用里程计、 陀螺仪等内部传感器,通过测量机器人相对于初始状态的 变化量来定位<sup>[6]</sup>;第3种是组合定位,这种方法针对前面 两种方法的不足,采用算法将相对和绝对定位信息融合在 一起<sup>[7]</sup>。

综上所述,本文提出了一种惯导/GPS 组合自定位算

法,为室外移动机器人提供精确稳定的定位信息。首先通 过高斯-克吕格坐标投影算法,将机器人的地理位置坐标 转换为直角坐标系坐标,然后利用 EKF 滤波融合传感器 信息,进行组合定位,最后利用 STM32 嵌入式开发平台, 搭建移动机器人硬件平台进行实验,并利用 MATLAB 对 EKF 滤波、航位推算两种定位方法进行仿真对比。

## 1 基于高斯-克吕格投影的坐标转换

高斯-克吕格投影又名"等角横切椭圆柱投影",是地 球椭球面和平面间正形投影的一种<sup>[8]</sup>。高斯-克吕格投 影的本质是等角投影,其目的是将地球的经纬度坐标转换 为平面的二维直角坐标,其几何示意图如图1所示。



基金项目:国家自然科学基金项目(61801122)

第一作者简介:赵毅(1996—),男,安徽六安人,硕士研究生,研究方向为机器人设计与研究、机电系统一体化。

由于高斯-克吕格投影后除中央经线外其他元素的 长度都会出现或多或少的改变,这个变化量是随着所在元 素与中央经线的距离增大而增大的。因此,需要按照一定 的距离给地球表面划分投影带来限制元素长度的变形。 本文采用的投影划分形式为 3°带,即从东经 1.5°子午线 开始,每隔3°经差向东划分为一带,从而实现分带投影, 带号依次为1,2,3,…,120。因此在已知某点的地理位置 为g(L, W)的条件下(L为该点的经度,W为该点的纬 度),可以得到该点的3°带投影带带号公式为

$$n = \frac{L - 1.5}{3}$$
 (1)

式中n为投影带带号。还可以通过投影带带号算出该投 影带的中央经度,对于东半球而言,投影带中央经度L。为

$$L_0 = 3 \times n \tag{2}$$

高斯-克吕格投影的目的是把地理位置坐标(L,W) 转换为机器人工作环境直角坐标系坐标(x,y)。须注意 这里的x坐标是与中央经线平行的纵向坐标,y坐标才是 横向坐标。

在给出高斯-克吕格投影公式之前,先对几个地球几 何参数做出说明:假设地球为旋转椭球体,且 a 为地球椭 球体长半轴的长度,b为地球椭球体短半轴的长度,e,为地 球椭球体的第一偏心率, e, 为地球椭球体的第二偏心 率,有:

$$e_1 = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}}$$
(3)

$$e_2 = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{b^2}}$$
(4)

除此之外,还需要知道地球的卯酉圈曲率半径R<sub>N</sub>和子 午圈曲率半径R<sub>M</sub>,其计算公式为式(5)和式(6),从赤道到 所在点纬度 W 的子午线长度 S,计算公式为式(7)。

$$R_{\rm N} = \frac{a^2/b}{\sqrt{1 + e_2^2 \cos^2 W}} \tag{5}$$

$$R_{\rm M} = \frac{a^2(1-e_1^2)}{\sqrt{(1+e_2^2\sin^2 W)^{3/2}}}$$
(6)

$$S = a(1 - e_1^2) \left[ AW - \frac{B}{2} \sin 2W + \frac{C}{4} \sin 4W - \frac{D}{6} \sin 6W + \right]$$

$$\frac{E}{8}\sin 8W] \tag{7}$$

式(7)中A、B、C、D、E各个系数的计算公式如式(8)所示。

45

$$\begin{cases} A = 1 + \frac{3}{4}e_1^2 + \frac{45}{64}e_1^4 + \frac{175}{256}e_1^6 + \frac{11\ 025}{16\ 384}e_1^8 + \cdots \\ B = \frac{3}{4}e_1^2 + \frac{15}{16}e_1^4 + \frac{525}{512}e_1^6 + \frac{2\ 205}{2\ 048}e_1^8 + \cdots \\ C = \frac{15}{64}e_1^4 + \frac{105}{256}e_1^6 + \frac{2\ 205}{4\ 096}e_1^8 + \cdots \\ D = \frac{35}{512}e_1^6 + \frac{315}{2\ 048}e_1^8 + \cdots \\ E = \frac{315}{16\ 384}e_1^8 + \cdots \end{cases}$$
(8)

由以上已知的量,可得高斯-克吕格正向投影 x、y 坐 标公式为

$$\begin{cases} x = S + \frac{R_N}{2} l^2 \sin W \cos W + \frac{R_N}{24} l^4 \sin W \cos^3 W (5 - \tan^2 W + 9\eta^2 + 4\eta^4) + \frac{R_N}{72} l^6 \sin W \cos^5 W (61 - 58\tan^2 W + \tan^4 W + 270\eta^4 - 330\eta^2 \tan^2 W) + \cdots \\ y = N l \cos W + \frac{R_N}{6} l^3 \cos^3 W (1 - \tan^2 W + \eta^2) + \frac{R_N}{120} l^5 \cos^5 W (5 + 14\eta^2 - 58\eta^2 \tan^2 W - 18\tan^2 W + \tan^4 W) + \cdots \end{cases}$$

上式中的1是该点位置到投影带中央经线位置的经 差,即:

$$l = L - L_0 \tag{10}$$

η为辅助参数,为

$$\eta = e_2 \cos W \tag{11}$$

# 2 基于 EKF 滤波 算法的组合定位 模型

以  $X(k) = [x(k), y(k), \theta(k), v(k), \omega(k)]^{\mathsf{T}}$  描述移 动机器人 k 时刻的运动状态量,其中 x(k), y(k)为机器人 的坐标矢量;v(k)、 $\omega(k)$ 为机器人的速度和角速度矢量, 当更新时间T足够短时,由此可建立移动机器人的状态更 新方程为

$$\boldsymbol{X}(k) = f(\boldsymbol{X}(k-1)) + \boldsymbol{\Gamma}(k-1) \boldsymbol{w}(k-1)$$
(12)

$$\boldsymbol{\Gamma}(k-1) \, \boldsymbol{\beta} \, \boldsymbol{\mathcal{S}} \, \boldsymbol{\mathcal{K}} \, \boldsymbol{\mathcal{I}} \, \boldsymbol{\mathcal{Z}} \, \boldsymbol{\mathbb{W}} = \boldsymbol{\beta} \, \boldsymbol{\widehat{\boldsymbol{\Omega}}} \, \boldsymbol{\widehat{\boldsymbol{\Sigma}}} \, \boldsymbol{\mathcal{S}} \, \boldsymbol{\mathcal{K}} \, \boldsymbol{\mathcal{I}} \, \boldsymbol{\mathcal{Z}} \, \boldsymbol{\mathbb{W}} = \boldsymbol{\widehat{\boldsymbol{\Gamma}}} \, \boldsymbol{\widehat{\boldsymbol{\Omega}}} \, \boldsymbol{\widehat{\boldsymbol{\Omega$$

由于量测模型是线性模型,则可以建立量测更新状态 方程为

$$\mathbf{Z}(k) = \mathbf{H}(k) \cdot \mathbf{X}_{\mathrm{m}}(k) + \mathbf{v}(k)$$
(14)

(9)

在以上的量测更新状态方程(14)中,可知 X<sub>m</sub>(k)为 该系统的状态变量的观测值向量[ $x_{CPS}(k), y_{CPS}(k)$ ,  $\theta_{\text{IMU}}(k), v_{\text{IMU}}(k), \omega_{\text{IMU}}(k)]^{\text{T}}, 其中x_{\text{CPS}}(k)和y_{\text{CPS}}(k)是通过$ GPS 模块获取的经纬度值经高斯-克吕格投影和坐标转 换后得到的机器人环境坐标系下的x, y坐标值, $\theta_{MII}(k)$ 是 IMU 模块获取的移动机器人航向角周期变化量,而通过对 IMU 模块实时输出的三轴加速度以及三轴角加速度进行 积分就能得到移动机器人的速度值v<sub>mu</sub>(k)以及角速度值  $\omega_{IMU}(k)$ 。H(k)则是观测值转换矩阵,为

$$\boldsymbol{H}(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(15)

对雅克比矩阵  $\boldsymbol{\Phi}_{kk-1}$  的计算如下:

$$\boldsymbol{\Phi}_{k/k-1} = J(f(\boldsymbol{X}(k-1))) = \frac{\partial f(\boldsymbol{X}(k-1))}{\partial \boldsymbol{X}(k-1)^{\mathrm{T}}}$$
(16)

通过上面的计算,运用到 EKF 滤波算法中去,对 GPS 与 IMU 输出的信息进行融合,再经过一个滤波周期后得 到下一个状态估计量,令 k=k+1 重复滤波,从而得到动态 的导航定位参数,实现移动机器人的组合定位,其组合定 位 EKF 滤波器框图如图 2 所示。



# 3 实验及仿真结果分析

## 3.1 实验平台搭建

图 3 为本实验所采用的移动机器人平台,主体由 4 个 麦克纳姆轮和车体及硬件系统组成,平台硬件系统包括微 处理器模块 STM32F103 驱动板;GPS 模块、IMU 模块、无 线通信模块,执行电机为直流无刷电机,以 STM32F103 为 主控单元。其中 IMU 模块内部集成高精度的陀螺仪、加 速度计、磁力计、气压计,可以输出 10 个轴信息,模块内 部的 MCU采用姿态解算算法以及数字滤波技术对输入 的姿态信息进行处理,直接给外部连接的主控芯片输出 高精度的数据。



图 3 移动机器人实验平台

### 3.2 EKF 滤波仿真结果及分析

扩展卡尔曼滤波要求动态系统的激励噪声序列 $W_k$ 以及量测噪声序列 $V_k$ 均为高斯白噪声。根据所选模块的说明书以及实际情况,可知系统的激励噪声序列方差阵 $Q_k$ 以及量测噪声序列 $R_k$ 分别为

	1	0	0	0	0	
	0	1	0	0	0	
$\boldsymbol{Q}(k) =$	0	0	0.01	0	0	(17)
	0	0	0	0.000 1	0	
	0	0	0	0	0.001 6	

	6.25	0	0	0	0	]	
	0	6.25	0	0	0		
$\boldsymbol{R}(k) =$	0	0	0.01	0	0	(18)	
	0	0	0	0.000 4	0		
	0	0	0	0	0.002 5		
strade strand ment and the trade state of the second strands and the strands and the strands and the strands and the second strands and the st							

当移动机器人作直线运动时,设定 EKF 滤波仿真的 初始条件  $X(0) = [0,0,45^{\circ},1,0]^{T}$ ,P(0) = zeros(5),滤波 周期 T = 0.5 s,总时长  $C = 1\ 000 \text{ s}$ 。如图 4 所示,从上到下 分别为传感器航位推算轨迹、EKF 滤波定位轨迹、理想 轨迹。



当移动机器人作曲线运动时,设定 EKF 滤波仿真 的初始条件  $X(0) = [0,0,0,1,5]^{T}$ ,  $P(0) = Z_{eros}(5)$ ,滤 波周期 T = 0.5 s,总时长为 C = 500 s。如图 5 所示,从上 到下分别为传感器航位推算轨迹、EKF 滤波定位轨迹、 理想轨迹。



从图 4-图 5 可以看出,当移动机器人作直线和曲线 运动时,直接由传感器得出的航位推算进行定位时,其轨 迹与理想轨迹偏差较大,且随着时间的推移,其累计下来 的误差会逐渐增大。相比而言,采用 EKF 滤波定位,能够 更加接近于理想情况。

## 3.3 组合定位结果及分析

为了验证本文方法在实际工作环境下的定位效果,将 实际位置和机器人定位位置进行比较,选取室外环境下一 个 200 cm × 200 cm 的模拟工作环境进行运动,如图 6 所示。



图6 实验场景

将移动机器人接上 PC 端进行定位数据采集,先让机

器人从1处出发按逆时针方向沿着环境边缘运动一圈获 取环境信息进行地图建模,然后再将机器人从1处逆时针 运动一圈,并分别对地图上的1、2、3、4、5、6、7、8、9标记处 进行航位推算定位以及扩展卡尔曼滤波定位,再分别将定 位数据输出,与实际的位置信息相比较,可得到具体数据 如表1所示。

从表1中可知,使用航位推算进行定位时,其位置误差比较大,并且是随着距离的增大而增大,最大可达到 39.195 cm。相比之下,使用 EKF 滤波算法进行定位后,其 位置误差较小,最大位置误差只有4.828 cm。因此,结合 前面的 EKF 滤波仿真结果以及本实验可以得到结论:使 用 EKF 滤波对传感器信息进行融合能够有效地提高移动 机器人的定位精度。

			表1	定位实验数据	居比较			单位:cm	
标记处 ——	实际	实际位置		航位推算位置及误差			EKF 滤波位置及误差		
	x	y	x	у	$\Delta L$	x	у	$\Delta L$	
1	0	0	2.561	-2.204	3.379	-3.156	3.441	4.669	
2	100	0	105.221	4.259	6.738	103.263	3.559	4.828	
3	200	0	208.732	7.343	11.409	203.288	-3.317	4.670	
4	200	100	211.691	110.104	15.452	197.011	103.198	4.377	
5	200	200	214.264	214.976	20.682	197.109	197.216	4.014	
6	100	200	117.998	217.553	25.140	103.221	203.006	4.406	
7	0	200	20.198	219.634	28.168	3.258	197.636	4.025	
8	0	100	23.004	123.209	32.678	3.355	97.165	4.392	
9	100	100	127.504	127.925	39.195	97.111	103.423	4.479	

## 4 结语

本文提出的惯导/GPS 组合定位方法具有较高的定位 精度,很好地解决了移动机器人在室外环境下的定位问 题。通过高斯-克吕格投影将机器人地理位置坐标转换 成平面直角坐标,并将惯性导航系统和 GPS 模块进行融 合,通过 EKF 滤波算法得到精确的定位参数,随后通过 MATLAB 进行了 EKF 滤波定位仿真,并搭建了机器人实 验平台进行组合定位实验,验证了本文组合定位算法的精 确性,显著提高定位的精度和稳定性,便于进行机器人后 续的路径规划。

#### 参考文献:

[1] 钱晓明,张浩,王晓勇,等. 基于激光扫描匹配的移动机器人 相对定位技术研究[J]. 农业机械学报,2016,47(3):14-21.

[2] 东辉,陈刚,林蔚韡,等. 移动机器人航位误差推算算法研

#### (上接第172页)

- [5] MELEXIS CORPORATION. MLX90614 DataSheet[Z]. [S. I]: Melexis Corporation, 2007.
- [6]夏候凯顺,曾宪金,胡立坤,等.基于 MLX90614 和 ZigBee 技术的体温实时监控系统的设计[J].自动化与仪表,2011, 26(11):23-26.
- [7] FRANK R. GIORDANO, WILLIAM P. FOX, STEVEN B.

究[J]. 机械制造与自动化,2019,48(6):142-144.

- [3] 侯加林,蒲文洋,李天华,等. 双激光雷达温室运输机器人导航系统研制[J]. 农业工程学报,2020,36(14):80-88.
- [4] 储星,文桂林,卢远志.一种移动机器人自主避障与导航方 法[J].机械科学与技术,2016,35(6):939-945.
- [5] 王宁, 王坚, 李丽华. 一种改进的 AMCL 机器人定位方法[J]. 导航定位学报, 2019, 7(3): 31-37.
- [6] 刘光伟,王巍,祁贤雨,等. 室内移动机器人主动 SLAM 技术 研究[J]. 机械设计与制造,2020(3):246-249.
- [7] TANG K H, LUO B, HE X F. Simplified ultra-tightly coupled BDS/INS integrated navigation system [J]. Science China Information Sciences, 2016, 59(11):1-16.
- [8] 胡伟凡,杨恢先,于洪,等. 基于高斯投影的经纬度距离参数 修正方法[J]. 计算机工程,2010,36(2):244-246,251.

#### 收稿日期:2021-09-08

HORTON, et al. 数学建模 [M].4 版. 北京:机械工业出版社,2014. [8] 魏勇. 煤矿采掘装备喷雾降尘效率曲线拟合 [J]. 矿山机械, 2015,43(11):130-133.

[9] 魏勇. 煤场喷雾降尘自适应模糊控制[J]. 煤矿安全,2018, 49(2):166-169.

#### 收稿日期:2021-09-14