

基于 EKF 的巡检机器人 INS/GPS 紧耦合导航算法

孙雪雁,李文萱,杨永琳,孙素军

(滁州职业技术学院,安徽 滁州 239000)

摘要:巡检用机器人作用通道较为狭窄,作业区域较小,如独立使用 GPS 卫星导航系统或 INS 惯性导航系统,难以满足巡检机器人的定位精度要求。因此,本文为提高导航精度,采用组合导航方式,提出以卫星的伪距、伪距率为观测量的 INS/GPS 紧耦合模式。为规范其运动轨迹,依据机器人当前位置、速度、姿态信息,建立 INS/GPS 紧耦合系统的数学模型,并使用扩展卡尔曼滤波算法进行数据融合。与传统的 INS/GPS 松耦合模式相比,本文算法拥有更高的定位精度,能满足设计要求。

关键词:巡检机器人;导航;INS/GPS 紧耦合;扩展卡尔曼滤波

中图分类号:TP242

文献标识码:A

文章编号:1671-5993(2025)02-0051-05

INS/GPS Tightly-coupled Navigation Algorithm for Inspection Robot Based on EKF

SUN Xueyan, LI Wengxuan, YANG Yonglin, SUN Sujun

(Chuzhou Polytechnic, Chuzhou 239000, China)

Abstract: The inspection robot operates in relatively narrow passageways and small working space. The separate use of GPS satellite navigation or the INS inertial navigation system cannot satisfy the requirements of the positioning accuracy. In order to overcome this problem, an INS/GPS tightly-coupled navigation is proposed in the paper, which takes the satellite's pseudo-range and pseudo-range rate as observed variables. To regulate its trajectory, the mathematical model of tightly-coupled system is established according to the robot's current position, velocity and attitude information. The data is fused by using the extended Kalman filter algorithm and the navigation accuracy is improved. Compared with the traditional INS/GPS loosely-coupled model, the proposed algorithm achieves a high positioning accuracy and can meet the design requirements.

Key words: inspection robot; navigation; INS/GPS tightly coupled; extended Kalman filter

一、引言

2020 年,新冠肺炎疫情席卷全球,多国医疗体系不堪重负,全球卫生事业受到巨大冲击,人民健康安全受到严重威胁。我国作为抗疫前沿,通过大量防疫经验表明,严格执行隔离措施,按时对环境消杀,是控制新冠疫情蔓延的最有效的方式之一^[1]。后疫情时代,人们对于环境巡检消杀的需

求并未随着新冠阴霾的散去而减弱,因此,针对学校、医院、宾馆、商场等公共区域设计巡检消杀机器人的研究很有必要^[2]。

医院、宾馆等公共场所,通常通道狭窄,人员较为密集,综合考虑单个机器人的负载能力,其设计作业面积较小。同时,考虑成本因素,巡检机器人不宜使用价格过于昂贵的导航设备,因此单一

收稿日期:2024-12-12

基金项目:滁州职业技术学院自科一般项目"基于 SLAM 技术的智能消杀机器人导航系统研究" (ZKY-2024-8);安徽省级重点项目"深度学习理论及其在滚动轴承故障诊断中的应用研究" (2024AH051440);安徽省级质量工程项目"机电一体化技术服务十大新兴产业特色专业" (2023sdxx209)

作者简介:孙雪雁(1991—),女,安徽全椒人,硕士研究生,助教。

使用 GPS 导航或 INS 惯性导航难以满足其导航精度需求。为此,INS/GPS 组合导航系统成为不二选择。INS/GPS 组合导航系统有松耦合和紧耦合两种模式,其中,传统的松耦合模式要求 GPS 和 INS 都要有独立的导航解,且卡尔曼滤波算法要求观测噪声在时间上不相关,然而实践中,松耦合模式观测输入(即:GPS 输出的位置和速度)噪声与时间相关,这就限制了卡尔曼滤波增益与测量更新频率,进而降低了 INS/GPS 松耦合组合导航精度^[3-6]。

为实时精确估计巡检机器人的位置、速度、姿态信息,本文提出采用集中式扩展卡尔曼滤波器的 INS/GPS 的紧耦合导航模式,本文首先简述巡检机器人的基本结构,然后提出紧耦合数学模型,再利用扩展卡尔曼滤波器对 INS/GPS 导航进行数据融合分析,最后仿真验证本文算法的有效性。

二、巡检机器人系统构架

巡检机器人的结构如图 1 所示,机器人主体为机身,机身底部两侧位置设置有履带驱动组件,机身上部两侧设置有机械臂,主要用于环境消杀;机身顶部设置有视觉单元,外表面设置有触控智能屏,用于人机交互;触控智能屏的上方设置有扫码窗口,下方设置有货仓出口,主要出货物品为口罩;货仓出口的下方设置有电控箱门,机身顶部安装有导航天线,其他导航设备安装于电控箱内^[7-8]。

巡检机器人采用 INS/GPS 紧耦合组合导航方式,其控制系统框图如图 2 所示^[9]。导航模块先采用 GPS 处理器获取的当前时刻机器人距离各测量卫星间的伪距、伪距率信息作为测量输入,进而估算出 INS 惯性导航系统的位置、速度、姿态误差以及 GPS 接收机的钟差和钟漂信息。组合导航的系统模型依据惯性导航方程建立,由于 GPS 中伪距和伪距率的信息具有强非线性,故采用扩展卡尔曼滤波器估计 INS 误差,再对 INS 导航参数进行校正。经过校正后的 INS 导航参数作为组合导航输出,送到巡检机器人的控制器中,与规划的目标位置、速度、航向信息作比较做差,输出信息作为左、右履带带轮速度的控制信号,从而调整机器人的行进状态^[10-11]。

三、INS/GPS 紧耦合系统数学模型

本文以 ECEF 地心地固坐标系(地球坐标系)

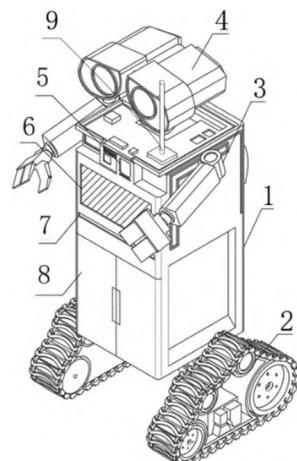


图 1 巡检机器人结构图

1. 机身, 2. 履带结构, 3. 机械臂, 4. 视觉单元, 5. 扫码窗口, 6. 触摸屏, 7. 货仓出口, 8. 电控箱门, 9. 导航天线

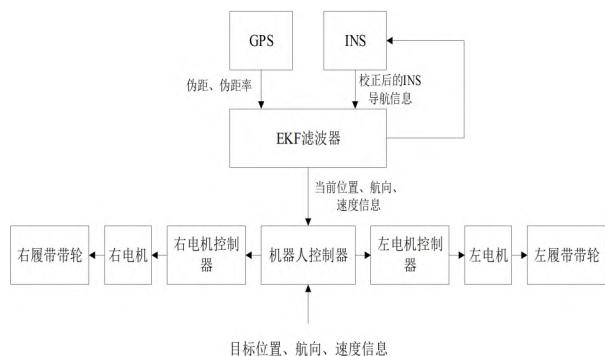


图 2 巡检机器人系统框图

作为目标坐标系。

(一) 系统模型

依据 INS 导航方程建立系统模型,其运动学方程为^[12-13]:

$$\begin{cases} \dot{\delta\psi}_{eb}^e = -\Omega_{ie}^e \delta\psi_{eb}^e + C_b^e b_g \\ \dot{\delta v}_{eb}^e = f_{eb}^e \psi_{eb}^e + \delta g_b^e(r_{eb}^e) \\ -2\delta\Omega_{eb}^e v_{eb}^e - 2\Omega_{eb}^e \delta v_{eb}^e \\ \dot{\delta r}_{eb}^e = \delta v_{eb}^e \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\delta\psi_{eb}^e$ 、 δv_{eb}^e 、 $\dot{\delta r}_{eb}^e$ 分别为地球坐标系中机器人姿态、速度、位置误差向量, Ω_{ie}^e 为地球转动角速度矢量的反对称矩阵。本文选用 WGS84 重力学模型下地球自转角速度,亦即: $\Omega_{ie}^e = 7.292115 \times 10^{-5} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$; C_b^e 为当地导航坐标系向地球坐标系转换矩阵, b_g 为陀螺仪零偏, Ω_{eb}^e 为机器人相对于地球产生的角速度矢量的反对称矩阵, f_{eb}^e 为加速度计测量的比力, $\delta g_b^e(r_{eb}^e)$ 为机器人当前位置在 WGS84 重力学模型下重力加速度误差。

同时,由于 INS/GPS 紧耦合导航系统的观测模型需采用 GPS 接收机接收到的伪距、伪距率误差作为观测向量,因此需估计接收机的钟差 $\delta\rho_c^a$ 、钟漂 $\dot{\delta\rho}_c^a$ 。

综上所述,建立 t 时刻 INS/GPS 导航系统模型:

$$\dot{x}(t) = F(t)x(t) + G(t)w_s(t) \quad (2)$$

式中,状态向量

$x(t) = (\delta\psi_{eb}^e \ \delta v_{eb}^e \ \delta r_{eb}^e \ b_a \ b_g \ \delta\rho_c^a \ \dot{\delta\rho}_c^a)^T$, b_a 为加速度计的零偏, $G(t)$ 为连续系统噪声分布矩阵, $w_s(t)$ 为系统噪声向量。

$$F = \begin{bmatrix} F_I & 0_{15 \times 2} \\ 0_{2 \times 15} & F_G \end{bmatrix},$$

$$F_I = \begin{pmatrix} -\Omega_{ie}^e & 0_3 & 0_3 & 0_3 & \hat{C}_b^e \\ F_{21}^e & -\Omega_{ie}^e & F_{23}^e & \hat{C}_b^e & 0_3 \\ 0_3 & I_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 \\ 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 \\ 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 \end{pmatrix},$$

$$F_G = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$F_{21}^e = [-(\hat{C}_b^e \hat{f}_{ib}^b) \wedge], F_{23}^e = -\frac{2\hat{\gamma}_{ib}^e}{r_{es}^e(L_b)} \frac{\hat{r}_{eb}^{e T}}{|r_{eb}^e|}$$

公式中,参数 F 为系统矩阵, F_I 为 INS 系统矩阵, F_G 为 GPS 接收机钟差和钟漂的系统矩阵, I_3 为三阶单位矩阵, 上标 $\hat{\cdot}$ 表示参数的估计值, $\hat{\gamma}_{ib}^e$ 为 WGS84 模型下的引力加速度, r_{es}^e 为机器人所在位置与地心间半径, \hat{L}_b 为机器人所在位置的纬度信息。

(二) 观测模型

扩展卡尔曼滤波器(Extended Kalman Filter, EKF)观测模型为:

$$z(t) = h(x(t), t) + w_m(t) \quad (3)$$

式中: $h(x(t), t)$ 为状态向量的非线性函数, $w_m(t)$ 为观测白噪声。

INS/GPS 组合导航紧耦合系统中,观测向量为 GPS 芯片接收到的卫星伪距、伪距率、以及伪距、伪距率与预测值的差值信息,即:

$$z(t) = \delta z = \begin{pmatrix} \delta z_{\rho,k} \\ \delta z_{r,k} \end{pmatrix} \quad (4)$$

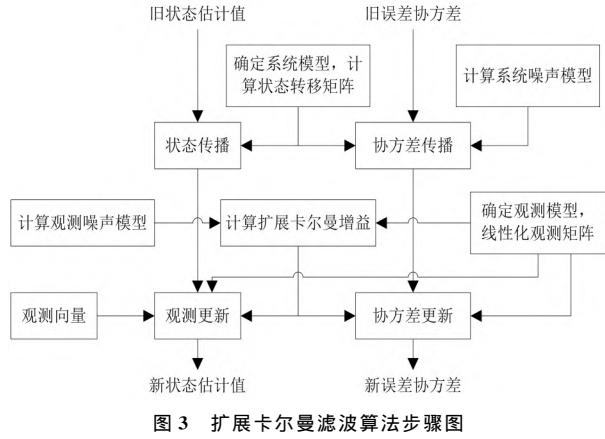
式中:

$$\begin{cases} \delta z_{\rho,k} = (\hat{\rho}_{a,C}^1 - \hat{\rho}_{a,C}^{1-}, \hat{\rho}_{a,C}^2 - \hat{\rho}_{a,C}^{2-}, \dots, \hat{\rho}_{a,C}^m - \hat{\rho}_{a,C}^{m-})_k \\ \delta z_{r,k} = (\hat{r}_{a,C}^1 - \hat{r}_{a,C}^{1-}, \hat{r}_{a,C}^2 - \hat{r}_{a,C}^{2-}, \dots, \hat{r}_{a,C}^m - \hat{r}_{a,C}^{m-})_k \end{cases},$$

$\delta z_{\rho,k}$ 为 GPS 模块伪距误差值, $\delta z_{r,k}$ 为伪距率误差值, $\hat{\rho}_{a,C}^m$ 为观测到的第 m 颗卫星的伪距, $\hat{\rho}_{a,C}^{m-}$ 为上一时刻校正后的组合导航参数、估计的接收机钟差、钟漂导航电文计算得到第 m 颗卫星的伪距, $\hat{r}_{a,C}^m$ 为观测的第 m 颗卫星伪距率, $\hat{r}_{a,C}^{m-}$ 为根据上一时刻校正后的组合导航参数、估计的接收机钟差、钟漂导航电文计算得到第 m 颗卫星的伪距率, 下标 k 为迭代次数。

四、扩展卡尔曼滤波算法

扩展卡尔曼滤波算法步骤如图 3 所示^[14]:



滤波步骤如下:

Step 1: 计算状态转移矩阵

对模型(2)中系统矩阵 F 做离散化处理:

$$\Phi \approx \exp(F\tau_s) \quad (5)$$

式中, τ_s 为系统更新间隔时间。

以时间积分进行幂级数展开,取其一阶项可得:

$$\Phi_I \approx \begin{pmatrix} I_3 - \Omega_{ie}^e \tau_s & 0_3 & 0_3 & 0_3 & \hat{C}_b^e \tau_s \\ F_{21}^e \tau_s & I_3 - 2\Omega_{ie}^e \tau_s & F_{23}^e \tau_s & \hat{C}_b^e \tau_s & 0_3 \\ 0_3 & I_3 \tau_s & I_3 & 0_3 & 0_3 \\ 0_3 & 0_3 & 0_3 & I_3 & 0_3 \\ 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 & I_3 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\Phi_G = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \tau_s & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

则,系统状态转移矩阵为:

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_I & 0_{15 \times 2} \\ 0_{2 \times 15} & \Phi_G \end{bmatrix} \quad (8)$$

Step 2:计算系统噪声协方差矩阵

INS/GPS 组合导航系统噪声协方差矩阵为:

$$Q = \begin{pmatrix} Q_I & 0_{15 \times 2} \\ 0_{2 \times 15} & Q_G \end{pmatrix} \quad (9)$$

由于传播时间间隔较短,可采用近似矩阵:

$$Q_I \approx \begin{pmatrix} S_{rg} I_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 \\ 0_3 & S_{ra} I_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 \\ 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 \\ 0_3 & 0_3 & 0_3 & S_{bad} I_3 & 0_3 \\ 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 & S_{bgd} I_3 \end{pmatrix} \tau_s \quad (10)$$

$$Q_G = \begin{pmatrix} S_{\epsilon\varphi}\tau_s & 0 \\ 0 & S_{\epsilon f}\tau_s \end{pmatrix} \quad (11)$$

式中, S_{rg} 为陀螺仪随机噪声的功率谱密度、 S_{ra} 为加速度计随机噪声的功率谱密度、 S_{bad} 为加速度计零偏的功率谱密度、 S_{bgd} 为陀螺仪零偏的功率谱密度, $S_{\epsilon\varphi}$ 为相位漂移的功率谱密度,通常取 $0.01m^2 \cdot s^{-1}$, $S_{\epsilon f}$ 为接收机时钟频率漂移的功率谱密度,通常取 $0.04m^2 \cdot s^{-1}$ 。

Step 3:一步状态预测

$$\hat{x}_k^- = \Phi_{k-1} \hat{x}_{k-1}^+ \quad (12)$$

式中,上标“-”表示更新前的数据,上标“+”表示更新后的数据。

Step 4:一步误差协方差矩阵预测

$$P_k^- = \Phi_{k-1} P_{k-1}^+ \Phi_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad (13)$$

Step 5:计算观测矩阵

线性化观测模型(3),可得:

$$H_k = \frac{\partial h(x(t), t)}{\partial x(t)} \Big|_{x=\hat{x}_k^-} = \begin{bmatrix} \frac{\partial z_\rho}{\partial \delta \psi_{eb}^e} & 0_{m,3} & \frac{\partial z_\rho}{\partial \delta r_{eb}^e} & 0_{m,3} & \frac{\partial z_\rho}{\partial \delta \rho_a^a} & 0_{m,1} \\ \frac{\partial z_r}{\partial \delta \psi_{eb}^e} & \frac{\partial z_r}{\partial \delta v_{eb}^e} & \frac{\partial z_r}{\partial \delta r_{eb}^e} & 0_{m,3} & \frac{\partial z_r}{\partial b_g} & 0_{m,1} & \frac{\partial z_r}{\partial \delta \dot{\rho}_c^a} \end{bmatrix}_k \quad (14)$$

对式(14)解析解的常用近似为:

• 54 •

$$H_k = \begin{bmatrix} 0_{1,3} & 0_{1,3} & u_{a1}^{e T} & 0_{1,3} & 0_{1,3} & 1 & 0 \\ 0_{1,3} & 0_{1,3} & u_{a2}^{e T} & 0_{1,3} & 0_{1,3} & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0_{1,3} & 0_{1,3} & u_{am}^{e T} & 0_{1,3} & 0_{1,3} & 1 & 0 \\ 0_{1,3} & u_{a1}^{e T} & 0_{1,3} & 0_{1,3} & 0_{1,3} & 0 & 1 \\ 0_{1,3} & u_{a2}^{e T} & 0_{1,3} & 0_{1,3} & 0_{1,3} & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0_{1,3} & u_{am}^{e T} & 0_{1,3} & 0_{1,3} & 0_{1,3} & 0 & 1 \end{bmatrix}_k \quad (15)$$

式中, u_{am}^e 为地球坐标系 ECEF 下,第 m 颗卫星相对于接收机 a 方向的单位矢量。

Step 6:计算观测噪声协方差矩阵

测量噪声协方差矩阵为 GPS 噪声协方差矩阵,本文 R_g 取单位矩阵。

Step 7:计算 EKF 增益矩阵

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1} \quad (16)$$

Step 8:更新系统状态

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k \delta z_k^- \quad (17)$$

Step 9:更新误差协方差矩阵

$$P_k^+ = (I - K_k H_k) P_k^- \quad (18)$$

通过上述 Step1~Step9,可以根据前一时刻状态向量的估计值和当前时刻的观测值,得到当前时刻状态向量的估计值。

五、仿真验证

本文设计的巡检机器人的参数如表 1 所示。

表 1 巡检机器人设计参数

参数	数值
机器人长 L/mm	600
机器人宽 b/mm	700
机器人高 h/mm	1000
带轮直径 D/mm	100
带轮最高转速 R/(r/min)	250
行走速度 v/(m/s)	0~1
转弯速度	18 度/s

将机器人在 INS/GPS 组合导航系统运算过程中简化为一质点,该质点位置与带轮转动轴中心位置距离很近,将其等效为同一点。针对一块 $55m \times 55m$ 的区域做仿真实验,设计路线如图 4。设计机器人正常行进速度为 $1m/s$,加减速时,加速度为 $0.2m/s^2$ 。

针对定位 4 颗以上卫星的情况做 INS/GPS

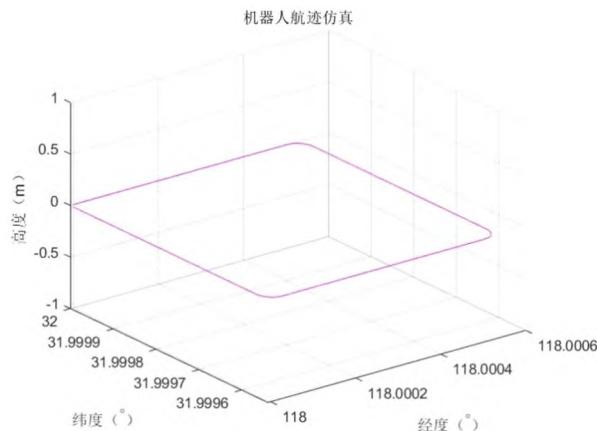


图 4 巡检机器人运动路径设计图

松耦合和紧耦合的仿真对比实验。INS/GPS 松耦合和紧耦合状态均采用低端差分定位 GPS 以及消费级 INS 模型配置。

图 5 为 INS/GPS 松耦合组合导航在 MATLAB 环境下仿真输出的各方向位置、速度、姿态误差曲线,图 6 为 INS/GPS 紧耦合组合导航误差曲线。

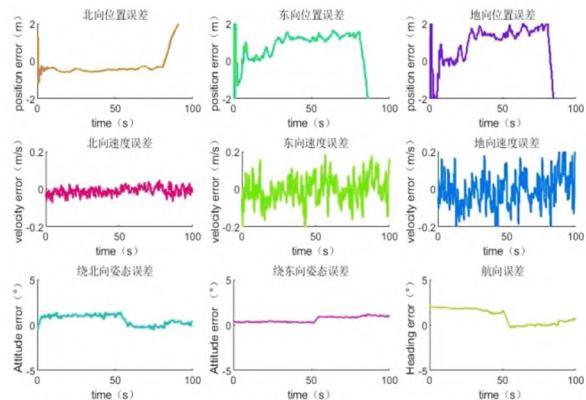


图 5 INS/GPS 松耦合组合导航误差曲线图

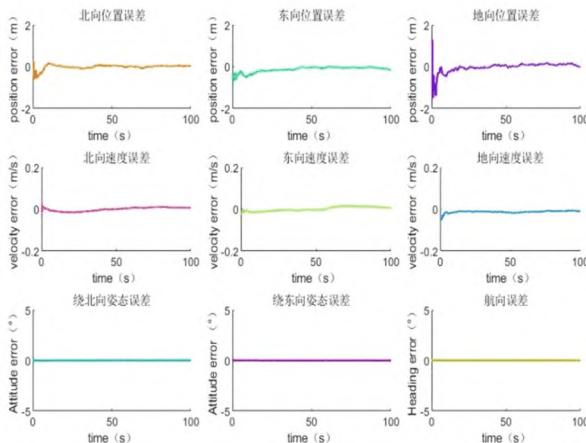


图 6 INS/GPS 紧耦合组合导航误差曲线图

对比图 5 和图 6 的误差曲线可知,在导航设备参数完全相同条件下,INS/GPS 紧耦合导航方式相较于松耦合模式,其输出的位置、速度、姿态误差曲线更为平滑稳定,导航结果更为精确。因此,在同等条件下,采用 INS/GPS 紧耦合系统能拥有更高、更稳定的导航精度。

六、结论

(1)INS/GPS 组合导航紧耦合定位模式相对于松耦合模式有更加平滑且稳定的输出曲线。

(2)当 GPS、INS 均采用较便宜的消费级器材的情况下,INS/GPS 组合导航紧耦合定位模式输出精度无论是位置、速度、姿态精度均高于松耦合定位模式,因此可用该组合模式降低了巡检机器人出厂成本。

(3)当导航系统处于稳定状态下,INS/GPS 紧耦合组合导航系统输出的北向、东向位置误差均小于 0.25m,速度误差小于 0.015m/s,满足巡检机器人设计精度要求。

参考文献:

- [1] 杨芊,徐小林,赵鸿辉,等. 公共卫生学科作用在新冠肺炎疫情防控中的凸显[J]. 治理研究,2020,36(2):75-80.
- [2] 李少强,刘浩,郭文亮,等. 智能机器人在新冠肺炎疫情期间的应用探索[J]. 中国感染控制杂志,2021,20(3):283-288.
- [3] 王金科,左星星,赵祥瑞,等. 多源融合 SLAM 的现状与挑战[J]. 中国图象图形学报,2022,27(2):368-389.
- [4] 周先林,张慧君,和涛,等. GPS/INS 松耦合组合导航的自适应卡尔曼滤波算法研究[J]. 时间频率学报,2020,43(3):222-230.
- [5] 胡旭. 基于双 GPS/SINS 松耦合组合导航方法研究[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学,2023.
- [6] 蒋荣,陈柏. 基于 UPF 的车辆紧耦合定位算法[J]. 机电工程,2018,35(4):420-424.
- [7] 殷陈君,宋家琛. 防疫消毒服务机器人造型设计[J]. 机械设计,2021,38(10):150.
- [8] 秦涛,任鹏,温景阳,等. 移动消毒防疫机器人设计与导航实现[J]. 机床与液压,2022,50(21):63-68.
- [9] Hartley R, Ghaffari M, Eustice R M, et al. Contact-aided invariant extended Kalman filtering for robot state estimation[J]. International Journal of Robotics Research, 2020, 39(4):402-430.

(下转第 67 页)

- 草本层自生植物多样性及群落组分研究[J]. 中国园林, 2021, 37(10): 123-128.
- [9] 薛正帅, 江生泉, 汤士勇. 滁州龙蟠河公园绿地植物多样性研究[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2016, 25(5): 73-74.
- [10] 李杰, 韩丽荣, 刘琼, 等. 内蒙古红花尔基伊敏河国家湿地公园维管植物区系分析[J]. 湿地科学, 2024, 22(1): 72-81.
- [11] 李晓鹏, 张思凝, 冯黎, 等. 成都城区河流廊道自生植物的生境及物种多样性[J]. 风景园林, 2022, 29(1): 64-70.
- [12] 陈程, 李林, 和太平. 广西大学校园自生植物多样性调查与分析[J]. 热带农业科学, 2023, 43(2): 83-89.

(上接第 55 页)

- [10] 连文浩, 杨小龙, 朱磊, 等. EKF 在 SINS/GNSS 深组合导航中的应用[J]. 现代防御技术, 2017, 45(5): 53-62.
- [11] 索旭东, 廖子聪, 李冀川, 等. 智能消杀安保机器人设计与实现[J]. 自动化与仪表, 2023, 38(10): 42-47.
- [12] Han H, Wang J, Wang J, et al. Performance Analysis on Carrier Phase-Based Tightly-Coupled GPS/BDS/INS Integration in GNSS Degraded and Denied Envi-

ronments[J]. Sensors, 2015, 15(4): 8685-8711.

- [13] Ye F, Pan S, Gao W, et al. An Improved Single-epoch GNSS/INS Positioning Method for Urban Canyon Environment Based on Real-time DISB Estimation[J]. IEEE Access, 2020, 8: 227566-227578.
- [14] 和涛, 张慧君, 李孝辉, 等. 应用于城市环境的 MEMS-INS/GPS 紧耦合组合导航抗差滤波器(英文)[J]. 中国惯性技术学报, 2023, 31(2): 179-188.

(上接第 22 页)

作, 推动与国际职业教育标准的对接, 争取国际认证, 提高高职院校在国际上的影响力和竞争力。

五、总结

高职院校教学数字化转型升级是适应时代发展需求的必然趋势。使用知识图谱文献计量分析揭示出数字化、互联网+、产教融合等是该领域的核心研究主题。通过分析不同研究主题之间的知识流动和演化路径, 推演出未来研究将更加注重人工智能技术与教育教学的深度融合, 探索智能化教学的新模式和新方法, 将在数字化基础设施、教学模式与方法、资源建设、教师能力提升、产教融合、国际化发展等方向取得显著进展。未来实践创新点可能聚焦在以下方向: 一是人工智能技术在教学中的应用, 包括智能教学系统、自适应学习平台和虚拟仿真实验等; 二是个性化学习路径的设计与实施, 涉及学习分析、推荐系统和智能导师等领域; 三是教学管理的智能化, 包括教学质量监控、学生行为分析和教学决策支持等。作为数字化的重要组成部分, 知识图谱技术强大的信息整合能力为教育研究者提供全面的领域认知和研究思路, 具有广阔的应用前景, 将持续推动高职院校教学质量全面提升。

参考文献:

- [1] 教育部办公厅. 教育部办公厅关于加快推进现代职业教育体系建设改革重点任务的通知: 教职成厅函〔2023〕20号 [EB/OL]. (2023-07-11). http://www.moe.gov.cn/srcsite/A07/zcs_zhgg/202307/t20230717_1069319.html.
- [2] 教育部. 职业教育专业教学标准-2025 年修(制)订 [EB/OL]. (2025-02-11). http://www.moe.gov.cn/s78/A07/zcs_ztzl/2017_zt06/17zt06_bznr/bznr_zjyjzyjxbz/.
- [3] 工业和信息化部, 中央网信办, 国家发展改革委, 等. 工业和信息化部等十二部门关于印发《5G 规模化应用“扬帆”行动升级方案》的通知: 工信部联通信〔2024〕227号 [EB/OL]. (2024-11-25). https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2024/art_09998a0a0232403aad8ad6d150c96730.html.
- [4] 肖仰华. 知识图谱: 概念与技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.
- [5] 邵浩, 张凯, 李方圆, 等. 从零构建知识图谱: 技术、方法与案例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [6] 许嘉扬, 郭福春. 数字化时代高职教育教学改革的知识图谱分析[J]. 高等工程教育研究, 2023(4): 138-144, 195.