

巷道掘进机多传感融合定位系统及试验研究*

刘送永¹, 崔玉明², 孟德远¹, 顾聪聪¹, 李洪盛¹, 江红祥^{1,3}

(1. 中国矿业大学机电工程学院 徐州, 221116)

(2. 江苏师范大学机电工程学院 徐州, 221116)

(3. 江苏省矿山智能采掘装备协同创新中心 徐州, 221008)

摘要 煤矿巷道掘进机的自主精确定位是煤矿掘进智能化发展的基础,而复杂的掘进工艺和恶劣的掘进环境使得掘进机定位存在自主性不足、精度低以及易受环境干扰等问题。为实现巷道掘进机自主精确定位,首先,基于扩展卡尔曼滤波构建了里程计辅助惯性定位系统以约束惯性定位的误差发散;其次,结合掘进机施工工艺提出柔性零速校正方法,进一步提升掘进机惯性定位精度;然后,基于误差状态卡尔曼滤波和多状态约束模型实现了惯性、视觉和里程定位的高效融合;最后,搭建了掘进机在暗环境下自主定位的样机试验系统。实验结果表明:所提柔性零速校正方法可以提升掘进机定位精度约 21.64%;所提掘进机多传感融合定位系统三轴定位误差分别可达到横向 0.13 m 以内、前向 0.17 m 以内、天向 0.02 m 以内,相比独立惯性和视觉系统的定位精度分别提升 49.62% 和 57.71%。实验结果验证了所提方法与系统的可行性与有效性,满足煤矿规程中巷道掘进机定位需求。

关键词 自主定位;惯性导航;多状态约束;视惯性融合

中图分类号 TH89;TP271.4

引言

煤炭资源是保证我国能源安全稳定供应的战略基石^[1],煤炭产量与消费量分别占我国一次能源生产和消费总量的 70% 和 50% 以上^[2]。我国煤炭以井工开采为主,目前正处于综合机械化开采、自动化开采向智能化开采过渡的发展阶段^[2-3]。煤炭生产,掘进先行,随着煤炭开采进程的逐步深入,我国每年仅国有大型煤矿新掘巷道里程已超过 12 000 km^[1]。与此同时,巷道掘进作业环境差,掘进装备发展水平滞后,巷道掘进效率低,导致采掘失衡成为现代化煤矿面临的主要难题^[4]。因此,巷道掘进机的自主精确定位成为煤矿巷道快速掘进的关键技术基础^[5]。

国内外学者针对煤矿环境下的定位技术进行了诸多探究,主要包括惯性导航系统定位技术(inertial navigation system, 简称 INS)、超宽带定位技术(ultra wide band, 简称 UWB)、视觉定位技术、激光雷达定位技术和可见光通信定位技术(visible light communication, 简称 VLC)等^[6-7]。其中:INS 主要是通过惯性器件敏感获得载体角速度和加速度信

息,并对其进行时序积分运算求解以获得载体位置和姿态,具有较好的自主性和环境适应性,但存在积分累积误差的缺陷^[8-9];UWB 利用两点之间往返的超短脉冲信号实现测距,并基于三角测量原理和最小二乘算法解算测距信息得到目标载体的位姿参数^[10-12];传统基于激光标靶的视觉定位技术采用对激光光斑和光束的点线特征进行识别转换以获得目标载体相对于激光标靶的位姿坐标,而基于视觉感知的定位技术则是使用视觉传感器获取巷道视觉特征,并通过视觉特征点的重投影模型解算出载体的位姿信息,但由于巷道环境昏暗,粉尘遮挡严重,视觉定位技术的稳定性和实用性还有较大发展空间^[13];激光雷达定位技术是通过激光雷达传感器扫描巷道环境获得空间点的三维点云,并对三维激光点云进行特征检测与配准实现巷道边界轮廓的重建,但易受粉尘干扰而出现较大噪声^[14];VLC 通常利用含内置身份编码的 LED 灯光实现高频信号的传输,接收端通过光敏元件接收光信号并解码解调,进而采用多边形定位算法实现定位解算,主要用于大巷人员定位^[15]。

* 江苏省杰出青年基金资助项目(BK20211531);江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究资助项目(22KJB440004);徐州市重点研发计划资助项目(KC22404);国家自然科学基金面上资助项目(51975573);江苏师范大学博士学位教师科研支持资助项目(22XFRS011)

收稿日期:2022-05-09;修回日期:2022-08-10

鉴于单一性能传感器在复杂的巷道环境中面临性能退化、噪声严重、多径效应、遮挡失效和累积误差等局限,不少学者开始探索不同组合方式在煤矿巷道中的定位效果^[16]。针对惯性导航系统存在累积误差和UWB定位易受非视距误差影响的问题,基于扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter,简称EKF)和无偏有限脉冲响应滤波(unbiased finite impulse response,简称UFIR)的INS/UWB组合定位方法可以综合2种方法的优势,有效限制惯性累积误差,提升定位性能^[17-18]。现有巷道掘进机主要采用全站仪和激光导向定位,通过卡尔曼滤波对全站仪定位结果与惯导解算位姿参数进行融合,在一定程度上提升了巷道掘进机的定位自主性和精度^[19]。室外非结构化环境存在光照多变、壁面起伏等难题,基于视觉和激光雷达融合定位可以结合激光雷达的深度信息和图像的颜色纹理信息,将定位问题转化为特征点对的加权重投影误差优化问题,提升了非结构化环境中的定位精度^[20-21]。

分析发现,目前针对巷道掘进机定位的研究普遍需要基于全站仪、UWB、激光标靶和LED灯等信号基站或中转站,属被动式定位,而掘进巷道不断开拓延伸,不利于信号基站和中转站的安装布置和精密校准。因此,笔者提出一种基于惯性、里程和视觉多传感融合的巷道掘进机自主定位方法,并进行样机试验验证。

1 掘进机里程计辅助惯性定位系统

惯性定位系统具有随时间积累的积分误差,这极大地影响了其定位精度和可用性。传统GPS和INS相结合的方法可以有效地限制惯导系统的定位漂移,但在没有GPS的煤矿井下巷道中不可行。鉴于掘进机采用履带结构独立行走,因此本研究采用里程计的观测信息对惯导系统定位结果进行约束和修正。

1.1 惯性定位系统解算

根据文献[22]所提捷联惯导系统位姿参数方程,构建了惯性定位系统解算模型,如图1所示。

系统姿态、速度和位置参量的时变微分方程为

$$\begin{cases} \dot{C}_b^n = C_b^n(\omega_{nb}^b \times) = C_b^n(\omega_{ib}^b \times) - ((\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times) C_b^n \\ \dot{v}^n = C_b^n f_{sf}^b - ((2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times) v^n + g^n \\ \dot{p} = [\dot{L} \quad \dot{\lambda} \quad \dot{h}] = M_{pv} v^n \end{cases} \quad (1)$$

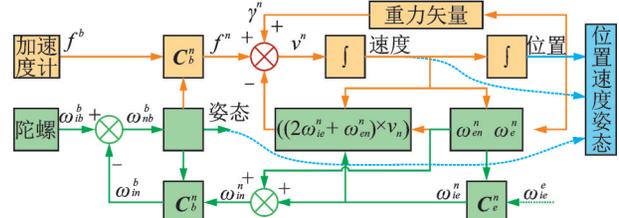


图1 惯性定位系统解算模型

Fig.1 Solving model of the inertial positioning system

其中: C_b^n 为载体系到导航系的姿态转换矩阵; $\omega_{ib}^b \times$ 为陀螺仪角速度测量输出; $\omega_{ib}^b \times$ 为 ω_{ib}^b 的反对称矩阵; \dot{v}^n 和 v^n 分别为载体在导航系中的加速度和速度矢量; f_{sf}^b 和 g^n 分别为载体系中的比力测量值和重力矢量在导航系中的投影; $p = (L \quad \lambda \quad h)^T$ 为载体位置参数; M_{pv} 为载体位置更新矩阵; ω_{ie} 为地球自转角速率; v_E, v_N, v_U 为载体速度在东北天坐标系下的投影; $R_{Nh} = R_N + h$; $R_{Mh} = R_M + h$; R_M 和 R_N 分别为子午圈和卯酉圈主曲率半径。

$$\begin{cases} \omega_{ie}^n = [0 \quad \omega_{ie} \cos L \quad \omega_{ie} \sin L]^T \\ \omega_{en}^n = [-v_N/R_{Mh} \quad v_E/R_{Nh} \quad v_E \tan L/R_{Nh}]^T \end{cases} \quad (2)$$

$$M_{pv} = \begin{bmatrix} 0 & 1/R_{Mh} & 0 \\ \sec L/R_{Nh} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

基于矩阵链乘法和梯形积分法求解式(1),忽略高阶积分误差,可以获得惯导系统的位姿信息

$$\begin{cases} C_{b(m)}^{n(m)} = M_{RV}(T(\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n)_{(m)}) C_{b(m-1)}^{n(m-1)} M_{RV}(\phi_{ib(m)}^b) \\ v_m^{n(m)} = v_{m-1}^{n(m-1)} + \int_{t_{m-1}}^{t_m} C_b^n(t) f_{sf}^b(t) dt + \\ \int_{t_{m-1}}^{t_m} ((- [2\omega_{ie}^n(t) + \omega_{en}^n(t)] \times) v^n(t) + g^n(t)) dt \\ p_m = p_{m-1} + M_{pv(m-1/2)}(v_{m-1}^{n(m-1)} + v_m^{n(m)}) T/2 \end{cases} \quad (4)$$

其中: $M_{RV}(\ast)$ 为向量 \ast 的 Rodrigues 函数; $T = t_m - t_{m-1}$ 为惯导系统的更新周期; $\phi_{ib(m)}^b$ 为载体系到惯性系的等效旋转矢量。

1.2 里程计辅助惯性系统速度观测模型

里程计速度观测结果为

$$\begin{aligned} \tilde{v}_D^n &= \hat{C}_b^n(C_b^d)^T \tilde{v}_D^d = \\ & (I - (\phi_D \times)) C_b^n (I - (\alpha \times)) (1 + \delta K_D^d) v_D^d \simeq v_D^n + \\ & (v_D^n \times) \phi_D + v_D \begin{bmatrix} -C_{13} & C_{12} & C_{11} \\ -C_{23} & C_{22} & C_{21} \\ -C_{33} & C_{32} & C_{31} \end{bmatrix} [\alpha_\theta \quad \delta K_D \quad \alpha_\phi]^T \end{aligned} \quad (5)$$

其中： $v_D^d = [0 \quad v_D \quad 0]^T$ 为里程计的理论速度矢量； \tilde{v}_D^n 和 \tilde{v}_D^d 分别为导航系和里程系里观测到的里程计实测速度； \hat{C}_b^n 为载体系到导航系的计算转换矩阵； C_b^d 为载体系到导航系的理论转换矩阵； ϕ_D 为失准角的等效转换矢量； C_{ij} 为 C_b^n 的第*i*行和第*j*列元素(*i, j* = 1, 2, 3)。

选取里程计辅助惯导定位系统的状态变量为载体姿态失准角 ϕ 、速度误差 δv^n 、位置误差 δp^n 、陀螺零偏 b^g 、加速度计零偏 b^a 和里程计安装误差 $\alpha = [\alpha_\theta \quad \delta K_D \quad \alpha_\psi]^T$ ，即

$$x_{os} = [\phi^T \quad (\delta v^n)^T \quad (\delta p^n)^T \quad (b^g)^T \quad (b^a)^T \quad \alpha^T]^T \quad (6)$$

系统的状态方程为

$$\dot{x}_{os}(t) = F_{os}(t)x_{os}(t) + W_{os}(t) \quad (7)$$

其中： F_{os} 为系统状态矩阵^[22]； $W_{os}(t)$ 为白噪声。

里程计辅助惯导定位系统的观测方程为

$$Z = HX + V = (v^n + \delta v^n) - \tilde{v}_D^n = \delta v^n - (v_D^n \times) \phi - v_D \begin{bmatrix} -C_{13} & C_{12} & C_{11} \\ -C_{23} & C_{22} & C_{21} \\ -C_{33} & C_{32} & C_{31} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_\theta \\ \delta K_D \\ \alpha_\psi \end{bmatrix} \quad (8)$$

将式(8)中的里程计与惯导之间速度误差作为卡尔曼滤波的观测输入，即可估计出巷道掘进机里程计辅助惯性定位系统的位姿信息。

2 掘进机惯性定位柔性零速校正

使用惯导系统通过积分获取载体的速度和位置，会出现长时漂移问题。采用惯性传感器采集掘进机运动惯性参数，掘进机采用软启动方式间歇行进，运动方式为直线运动，惯性传感器采集频率为50 Hz，采样时间持续约2 min(含启动时间)，采用图1和式(4)中的解算方法积分求解得到惯性传感器载体的速度和位置，巷道掘进机惯性定位漂移如图2所示。

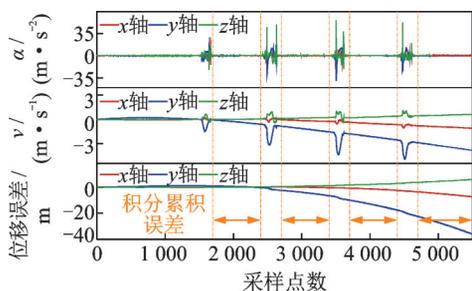


图2 巷道掘进机惯性定位漂移

Fig.2 Illustration of roadheader inertial positioning drift

由图2可见，随着掘进机不断行进，机体的速度和位置参量在相邻运动间隔之间的静止状态也因积分累积误差而导致明显的漂移现象。

根据煤矿巷道掘进机施工工艺，掘进机作业时需要根据截割头截深的不同每前进0.5~1.0 m进行停车截割作业；掘进过程中经常需要掘进机长时间停车进行巷道支护作业；此外，掘进机每前进数米还需要停车拖缆。可见，掘进机作业期间包含较多的停机时间区间，停车期间的载体真实速度为零，此时掘进机惯导系统输出速度即为速度误差，以该速度误差作为系统量测值可对系统的状态漂移进行约束和补偿^[23]。

在掘进机车辆运动学约束下的卡尔曼滤波状态变量同式(6)，而掘进机在停车期间的三轴理论速度均为零，因此综合里程编码器和惯导的三轴速度误差重新构建系统量测方程为

$$Z_{zvf} = H_{zvf} X + V_{zvf} = \tilde{v}_{os}^n - \tilde{v}_D^n \quad (9)$$

由于零速校正量测噪声矩阵 V_{zvf} 的设定关系到零速反馈的精确性，因此笔者按式(10)对掘进机速度进行方差检测以确定其运动和静止状态，进而调整掘进机在不同状态下的量测噪声矩阵。

$$\zeta = \sqrt{[\text{var}(a_x)]^2 + [\text{var}(a_y)]^2 + [\text{var}(a_z)]^2} \leq \zeta_0 \quad (10)$$

其中： ζ 为掘进机状态判据； ζ_0 为掘进机静止状态判据阈值； $\text{var}(\ast)$ 表示求参量 \ast 的方差。

2.1 惯性定位系统柔性零速校正方法

传统零速校正与柔性零速校正原理如图3所示

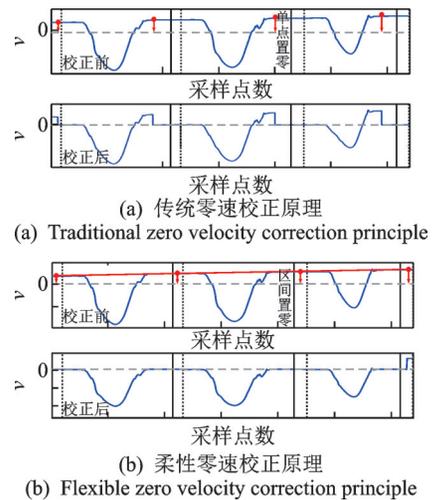


图3 传统零速校正与柔性零速校正原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of traditional zero velocity updating and flexible zero velocity updating principles

示。传统的零速更新校正硬性地静止时刻的载体速度直接置零,虽然有效抑制了静态阶段的速度和位移漂移,但忽略了载体运动阶段的速度积分累积误差,这对于掘进机载体定位误差的校正是不完整的。因此,笔者在传统硬置零方式零速校正方法的基础上,以线性插值柔性补偿的方式减少载体运动状态下的速度累积误差,即在对掘进机载体静止期间速度置零的同时,综合两相邻静止区间速度漂移的均值对其运动区间的速度漂移进行同步校正,可进一步提升掘进机惯性定位系统的精度。

2.2 掘进机纯惯性定位柔性零速校正仿真

采用传统硬性零速校正方法和本研究柔性零速校正方法对掘进机间歇行进的惯性数据进行位置解算,不同零速校正方法的定位结果对比如图4所示。由图可知,柔性零速更新校正可为传统零速更新中未校正的运动环节提供速度约束和修正,有效解决传统零速校正无法约束载体运动状态下的速度累积误差的问题。

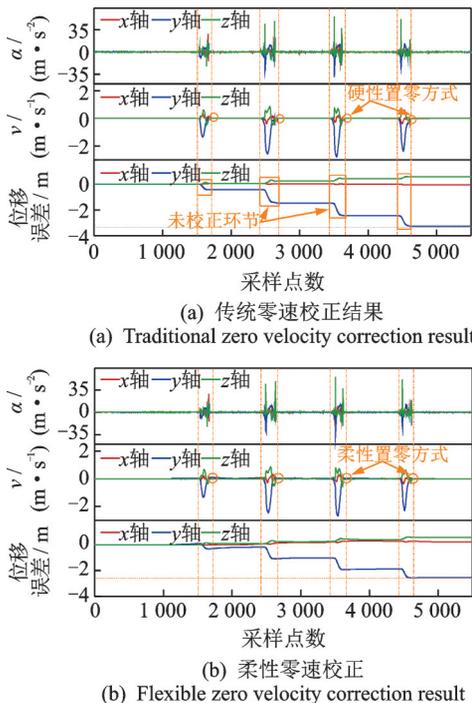


图4 不同零速校正方法的定位结果对比
Fig.4 Comparison of positioning results of different zero velocity updating methods

在相同实验室模拟掘进机载体运动条件下,采用柔性零速校正方法的掘进机最终位移误差为2.64 m,而采用传统零速校正方法的掘进机最终误差为3.37 m,定位精度提升了21.64%,有效减小了速度和位置积分运算产生的累积误差,进一步抑制

了惯导系统的长时定位漂移。

3 基于多状态约束卡尔曼滤波的多传感融

使用里程计虽然可以有效约束惯性定位系统垂直方向的误差漂移,但其定位精度依然无法满足要求,而巷道视觉位姿估计同样容易受到巷道光照和煤尘水雾的制约。因此,常规基于滤波的视惯性融合方法进行掘进机的定位和视觉更新过程中需要不断地跟踪和维护大量的特征点,将会造成卡尔曼滤波器的维度爆炸现象,而多状态约束卡尔曼滤波(multi-state constraint Kalman filter,简称MSCKF)框架^[24]仅对载体位姿信息进行估计,极大地减少了系统状态维数和计算资源消耗。构建基于MSCKF的巷道掘进机多传感融合自主定位系统结构模型,如图5所示。

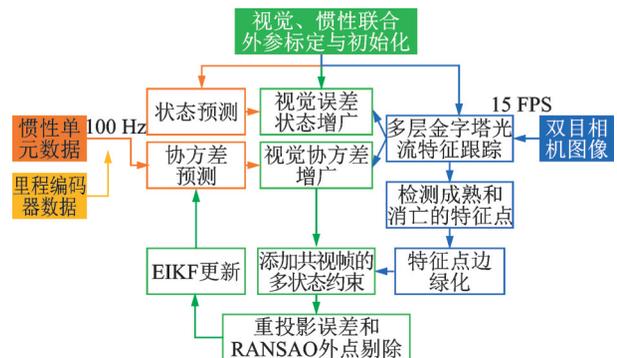


图5 掘进机多传感融合自主定位系统结构模型
Fig.5 Structural model of the multi-sensor fusion autonomous positioning system for roadheader

3.1 误差状态卡尔曼滤波模型

为了减少高阶积分项累积误差,使用误差状态卡尔曼滤波(error state Kalman filter,简称ESKF)将实际需要估计的视惯性状态分为名义状态和误差状态,其中名义状态由惯性单元数据按照运动模型直接积分获得,不考虑噪声项。利用卡尔曼滤波估计得到的误差状态量对名义状态积分结果进行修正,获得系统的真实状态量,然后重新将误差状态量置零并进行滤波器的循环预测和更新。惯性状态量在ESKF中的表示^[25]如表1所示。

惯性系统各名义状态量和误差状态量在连续时间下的微分方程分别为

表1 惯性状态量在ESKF中的表示

Tab.1 The representation of inertial state in ESKF

状态量	名义状态	误差状态	真实状态
位置	\hat{p}	δp	$p = \hat{p} + \delta p$
速度	\hat{v}	δv	$v = \hat{v} + \delta v$
旋转四元数	\hat{q}	δq	$q = \hat{q} \otimes \delta q$
旋转矩阵	\hat{C}	δC	$C = \hat{C} \delta C$
角度矢量	$\hat{\theta}$	$\delta \theta$	$\delta q = e^{\delta \theta/2}$ $\delta C = e^{[\delta \theta]_{\times}}$
里程编码器	\hat{d}^o	δd^o	$d^o = \hat{d}^o + \delta d^o$
加速度计零偏	\hat{b}^a	δb^a	$b^a = \hat{b}^a + \delta b^a$
陀螺仪零漂	\hat{b}^g	δb^g	$b^g = \hat{b}^g + \delta b^g$

$$\begin{cases} \dot{\hat{p}} = \hat{v} \\ \dot{\hat{v}} = \hat{C}^T (\hat{a}^m - \hat{b}^a - \hat{v}^a) - 2[\mathbf{w}_{ie} \times] \hat{v} - [\mathbf{w}_{ie} \times]^2 \hat{p} + \hat{g} \\ \dot{\hat{q}} = \hat{q} \otimes (\hat{\omega}^m - \hat{C} \mathbf{w}_{ie} - \hat{b}^g - \hat{v}^g) / 2 \\ \dot{\hat{b}}^a = 0 \\ \dot{\hat{b}}^g = 0 \\ \dot{\hat{d}}^o = 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \delta \dot{p} = \delta v \\ \delta \dot{v} = -C^T [\hat{a} \times] \delta \theta - C^T \delta b^a - 2[\mathbf{w}_{ie} \times] \delta v - [\mathbf{w}_{ie} \times]^2 \delta p - C^T v^a \\ \delta \dot{\theta} = -[\hat{\omega} \times] \delta \theta - \delta b^g - v^g \\ \delta \dot{b}^a = n^a \\ \delta \dot{b}^g = n^g \\ \delta \dot{d}^o = 0 \end{cases} \quad (12)$$

多传感融合定位系统将视觉状态考虑在内,其名义状态向量和误差状态向量可以表示为

$$\begin{cases} \hat{X}_k = [\hat{X}_{I(k)} \quad {}^G_C q \quad {}^G p_{C_1} \quad \cdots \quad {}^G_C q \quad {}^G p_{C_N}]^T \\ \tilde{X}_k = [\tilde{X}_{I(k)} \quad \delta \theta_{C_1} \quad \delta p_{C_1} \quad \cdots \quad \delta \theta_{C_N} \quad \delta p_{C_N}]^T \end{cases} \quad (13)$$

其中: ${}^G_C q$, ${}^G p_{C_N}$ 和 $\delta \theta_{C_N}$, δp_{C_N} 分别为第 N 帧视觉图像对应的相机名义位姿及其误差。

惯性名义状态向量 \hat{X}_I 、惯性误差状态向量 \tilde{X}_I 分别为

$$\begin{cases} \hat{X}_I = [\hat{p} \quad \hat{v} \quad \hat{q} \quad \hat{b}^a \quad \hat{b}^g \quad \hat{d}^o]^T \\ \tilde{X}_I = [\delta p \quad \delta v \quad \delta \theta \quad \delta b^a \quad \delta b^g \quad \delta d^o]^T \end{cases} \quad (14)$$

3.2 状态预测

根据Z变换理论对多传感融合系统惯性部分的

误差状态系统方程进行简化,可以获得惯性误差状态的一步预测结果

$$\tilde{X}_{I(k+1|k)} = \Phi_I \tilde{X}_{I(k|k)} + (G_{I(k|k)} \Delta t) \tau_I \quad (15)$$

其中: $\Phi_I = \exp\left(\int F_I(\tau) d\tau\right) \cong I + F_{I(k|k)} \Delta t + (F_{I(k|k)} \Delta t)^2 / 2$,为惯性系统状态转移矩阵; F_I , G_I 分别为系统非线性状态函数对误差状态和干扰噪声的雅克比矩阵。

$$F_I = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ -[\mathbf{w}_{ie} \times]^2 - 2[\mathbf{w}_{ie} \times] & -C^T [\hat{a} \times] - C^T & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & -[\hat{\omega} \times] & 0_{3 \times 3} & -I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$G_I = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ -C^T & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & -I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (17)$$

与此同时,视觉定位系统部分的位姿状态可以由惯性系统位姿和融合系统的外参矩阵进行预测。首先通过对名义状态增加误差项计算出带误差和噪声的相机位姿的真实状态为

$$\begin{cases} {}^{C_{N+1}} \bar{q} = e^{(\delta \theta_{C_{N+1} \leftarrow G})} {}^{C_{N+1}} \hat{q} = {}^G \bar{q} \otimes e^{(\delta \theta_{I_{N+1} \leftarrow G})} {}^{I_{N+1}} \hat{q} \\ {}^G p_{C_{N+1}} = {}^G \hat{p}_{C_{N+1}} + \delta {}^G p_{C_{N+1}} = ({}^G \hat{p}_{I_{N+1}} + \delta {}^G p_{I_{N+1}}) + [e^{(\delta \theta_{I_{N+1} \leftarrow G})} {}^{I_{N+1}} \hat{q}]^T {}^G p_C \end{cases} \quad (18)$$

其中: $\delta \theta_{C_{N+1} \leftarrow G}$ 和 $\delta {}^G p_{C_{N+1}}$ 为第 $N+1$ 帧的位姿误差。

因此,每次新增图像产生的增广误差状态向量即为第 $N+1$ 帧的位姿误差,即

$$\begin{cases} \delta \theta_{C_{N+1} \leftarrow G} = {}^G \bar{q} \delta \theta_{I_{N+1} \leftarrow G} \\ \delta {}^G p_{C_{N+1}} = \delta {}^G p_{I_{N+1}} + {}^{I_{N+1}} \hat{q}^T ({}^G p_C \times) \delta \theta_{I_{N+1} \leftarrow G} \end{cases} \quad (19)$$

3.3 双目视觉观测与更新

视觉观测中通常将特征点坐标通过相机内参矩阵转换到相机归一化平面的重投影误差作为约束。对于第 j 个成熟或消亡特征点,其在第 i 个相机中的重投影误差 e_i 为

$$e_i^{4 \times 1} = z_i^j - \hat{z}_i^j \quad (20)$$

其中: z_i^j 为实际观测的特征点在相机归一化坐标系中的齐次坐标; \hat{z}_i^j 为三角化估计得到的特征点在相

机归一化坐标系中的齐次坐标。

$$z_i = \begin{bmatrix} x_{ci,1}/z_{ci,1} \\ y_{ci,1}/z_{ci,1} \\ x_{ci,2}/z_{ci,2} \\ y_{ci,2}/z_{ci,2} \end{bmatrix} + n_c = \begin{bmatrix} (u - c_{xi,1})/f_{x,1} \\ (v - c_{yi,1})/f_{y,1} \\ (u - c_{xi,2})/f_{x,2} \\ (v - c_{yi,2})/f_{y,2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{c,1} \\ n_{c,1} \\ n_{c,2} \\ n_{c,2} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\hat{z}_i = T_h^{c_{\hat{p}'_j}} = \begin{bmatrix} T_{h,1}^{c_{\hat{p}'_j}} \\ T_{h,2}^{c_{\hat{p}'_j}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/\hat{z}_{ci,1} & 0 & 0 \\ 0 & 1/\hat{z}_{ci,1} & 0 \end{bmatrix} C \left(\begin{smallmatrix} C_{G,1} \\ \hat{q} \end{smallmatrix} \right) \left(\begin{smallmatrix} G \\ \hat{p}_j \end{smallmatrix} - \begin{smallmatrix} G \\ \hat{p}_{c_{i,1}} \end{smallmatrix} \right) \\ \begin{bmatrix} 1/\hat{z}_{ci,2} & 0 & 0 \\ 0 & 1/\hat{z}_{ci,2} & 0 \end{bmatrix} C \left(\begin{smallmatrix} C_{G,2} \\ \hat{q} \end{smallmatrix} \right) \left(\begin{smallmatrix} C_{i,1} \\ \hat{p}_j \end{smallmatrix} - \begin{smallmatrix} C_{i,1} \\ \hat{p}_{c_{i,2}} \end{smallmatrix} \right) \end{bmatrix} \quad (22)$$

其中： n_c 为归一化坐标系下的视觉测量误差噪声； $C \left(\begin{smallmatrix} C_{G,1} \\ \hat{q} \end{smallmatrix} \right)$ 、 $C \left(\begin{smallmatrix} C_{G,2} \\ \hat{q} \end{smallmatrix} \right)$ 为世界坐标系到第*i*个左、右目相机坐标系的旋转矩阵； ${}^{c,1} \hat{p}'_j$ 、 ${}^{c,2} \hat{p}'_j$ 为左、右目相机坐标系下特征点的位置坐标； ${}^G \hat{p}_j$ 为世界坐标系下特征点的位置坐标； ${}^G \hat{p}_{c_{i,1}}$ 、 ${}^G \hat{p}_{c_{i,2}}$ 为世界坐标系下第*i*个左、右目相机的位置坐标。

假设视觉特征的重投影误差服从高斯分布，根据高斯-牛顿优化求解方法，可以将视觉特征的重投影误差在零点处近似线性化展开。当第*j*个成熟或消亡特征点被*M*个相机观测到时，其提供了所有观测帧之间对于特征点的共视约束，体现了视觉观测能给出的全部有效信息，保证ESKF结果是最优估计。系统视觉重投影误差观测模型为

$$e^j \cong \begin{matrix} 4M \times 1 \\ H_X^j \end{matrix} \begin{matrix} \tilde{X} \\ 4M \times (18+6N) \times 1 \end{matrix} + \begin{matrix} H_f^j \\ 4M \times 3 \end{matrix} \begin{matrix} {}^G \hat{p}_j \\ 3 \times 1 \end{matrix} + \begin{matrix} n_c \\ 4M \times 1 \end{matrix} \quad (23)$$

其中： H_X^j 、 H_f^j 分别为视觉观测重投影误差关于全局误差状态向量 \tilde{X} 和特征点 ${}^G \hat{p}_j$ 的Jacobian矩阵； n_c^j 为视觉观测噪声。

4 样机试验

为验证所提巷道掘进机多传感融合自主定位系统在暗环境掘进机样机上的应用效果，搭建掘进机多传感融合定位系统，并开展掘进机自主定位样机试验。

4.1 传感器联合标定

在进行所提掘进机多传感定位系统模拟巷道

定位试验之前，还需要对惯性传感器和视觉相机的相对旋转和平移参数进行联合标定，以确定视觉坐标系和惯性导航坐标系的相互融合转化关系。视觉与惯性传感器联合标定如图6所示，标定过程以重力矢量为参考，将棋盘式标定板铅锤放置，与重力矢量同向，标定过程中棋盘标定板位置固定不变，调整视惯性传感器的位置和姿态，采集若干传感器位姿，根据相机内参和本征矩阵估计出标定板2条铅垂线特征在球面的交汇点，同时根据加速度各轴比力分量获得惯性传感器方位，以相机旋转和加速度计姿态变化对各个姿态进行最小二乘估计，得到惯性传感器相对于相机坐标系的外部变换参数(紫色箭头)。

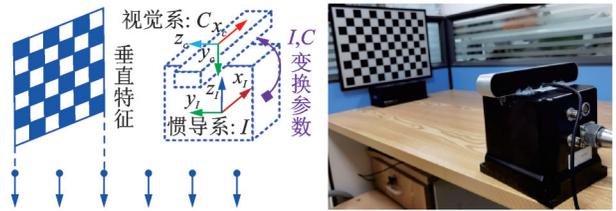


图6 视觉与惯性传感器联合标定

Fig.6 Co-calibration of visual and inertial sensors

4.2 试验布置

搭建掘进机多传感融合自主定位试验系统如图7所示，其中主要包括红外运动测量系统、掘进机、惯导系统、视觉相机、通讯与信号采集模块与计算机等。选用IMU300D六轴惯性传感器、CAS38R12E06R4B里程计和ZED双目相机，进行视惯性联合标定后布置于掘进机截割臂前端，掘进机行驶的真实位姿采用红外运动测量系统获得。为模拟煤矿巷道昏暗的环境特征，掘进机样机定位试验在夜间进行，光照亮度约为0.9 Lx。



1-红外运动测里系统；2-掘进机；3-里程计；4-双目相机；5-惯性传感器；6-照度计；7-通讯与信号采集模块；8-计算机

图7 掘进机多传感融合自主定位样机试验系统

Fig.7 Prototype experiment system of roadheader autonomous positioning based on multi-sensor fusion

设计掘进机沿直线和曲线路径行进,掘进机试验轨迹如图8所示。由于EBZ160掘进机行走速度范围通常为0~6 m/min,因而本试验中掘进机样机行走速度分别设置为3,4,5,和6 m/min,掘进机行走距离约为6.5 m,以进一步考察行走速度对于掘进机自主定位性能的影响。



图8 掘进机试验轨迹

Fig.8 Experimental trajectory of roadheader prototype

4.3 试验结果

控制掘进机沿预设轨迹行进,分别对里程计辅助惯导定位系统、视觉定位系统和融合定位系统的定位结果进行解算,同时使用红外运动测量系统采集掘进机运动的真实值。当掘进机样机行走速度为5 m/min时,不同方法的试验定位结果和定位误差分别如图9,10所示。

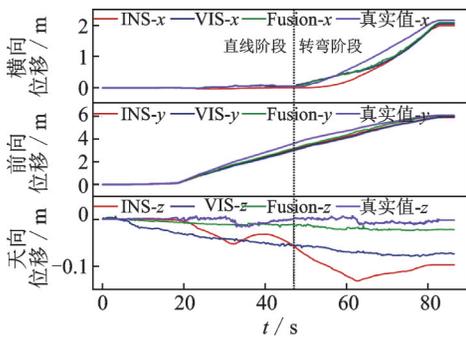


图9 不同方法的试验定位结果

Fig.9 Experimental positioning results of different methods

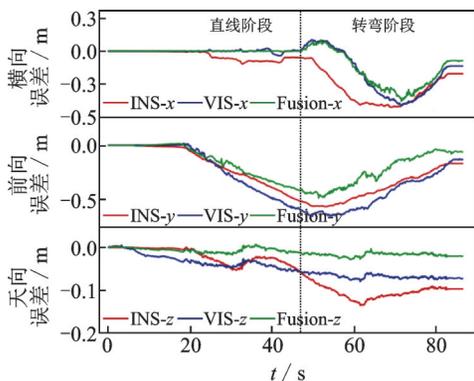


图10 不同方法的试验定位误差

Fig.10 Experimental positioning errors of different methods

由图9,10可知:掘进机在直线前进阶段,其前向位姿及误差呈逐渐增大的趋势,而由于掘进机自身电机和泵站的振动导致其横向位置出现一定的波动,进而对惯性定位结算结果产生约0.1 m的解算偏差;由于掘进机纵向尺度较大使得掘进机的天向位移产生了一定的摇摆,而安装在掘进机截割臂上的视觉定位系统所在的位置波动相比掘进机中心处更加明显;进入曲线转弯阶段后,掘进机前向位移趋势变缓,横向位移及误差逐渐明显,在转向45°后,调整并驱动掘进机姿态使其沿45°直线行进,此时掘进机横向误差达到最大,约为0.3 m,同时掘进机天向位置误差缓慢增大,而在掘进机整个运动过程完成之后并继续沿直线行进时,水平方向误差则有所减小。

不同方法定位误差统计结果如图11所示。由图可知,所提多传感融合系统自主定位最大误差分别为0.37,0.49和0.03 m,误差均方根值分别为0.12,0.16和0.01 m,三轴综合定位精度相较于惯性定位和视觉定位分别提升约49.62%和57.71%。

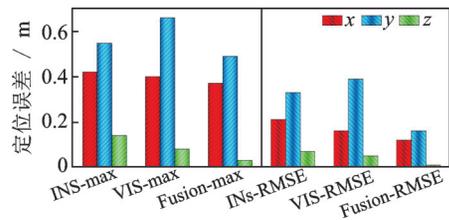


图11 不同方法定位误差统计结果

Fig.11 Positioning error statistics of different methods

调整掘进机样机驱动马达的比例阀,以不同速度驱动掘进机进行相同轨迹运动,进一步统计各行走速度下掘进机自主定位系统的定位误差结果,如表2所示。不同行走速度导致掘进机样机的振动特性差异明显,进而影响掘进机自主定位系统性能。由表2可知,在低行走速度下,掘进机运动较为平缓,其水平方向的最大误差相对较小,此时掘进机液压系统的低速冲击现象相对明显,这也导致了掘进机样机定位误差的均方根值比高速状态下更大。从整体上看,行走速度对掘进机定位精度的影响不大。以本试验为例,在硬质、凹凸不平的路面条件和手动驱动方式下,所构建的掘进机多传感融合定位试验的横向定位误差约为0.13 m,前向定位误差约为0.17 m,天向定位误差在0.02 m以内,基本满足掘进机定位精度要求。

表2 不同行走速度下掘进机样机定位误差统计结果

Tab.2 Statistics of roadheader prototype positioning errors under different walking speeds

行走速度/(m·min ⁻¹)	最大误差/m			平均误差/m			误差均方根值/m		
	x轴	y轴	z轴	x轴	y轴	z轴	x轴	y轴	z轴
3	0.214	0.437	0.031	-0.103	-0.165	-0.024	0.131	0.164	0.015
4	0.263	0.451	0.032	-0.086	-0.141	-0.019	0.114	0.143	0.017
5	0.373	0.489	0.028	-0.066	-0.186	-0.010	0.116	0.158	0.007
6	0.386	0.473	0.027	-0.072	-0.132	-0.010	0.102	0.136	0.012

5 结 论

1) 针对煤矿巷道掘进机在开拓型非结构化暗环境下的长时、短距、半封闭式的定位特点,基于里程计辅助惯性定位技术和视觉位姿估计技术提出了一种巷道掘进机多传感融合自主定位策略,摆脱了目前掘进机被动定位技术对信号基站和中转站的依赖。

2) 基于扩展卡尔曼滤波构建了煤矿巷道掘进机里程计辅助惯性定位系统,并提出柔性零速校正方法,有效减小了惯性定位系统的积分累计误差,掘进机惯性定位精度提升21.64%。

3) 基于误差状态卡尔曼滤波和多状态约束模型构建了一种高效巷道掘进机多传感融合自主定位系统状态和观测模型,搭建了暗环境下掘进机多传感融合定位样机试验系统并开展了相关试验。结果表明,本研究所提的融合定位系统精度相比独立定位系统分别提升约49.62%和57.71%,在不同行走速度下掘进机的三向定位误差均能控制在0.17 m左右,基本可以满足掘进机自主定位精度要求。

参 考 文 献

- [1] 王虹,王步康,张小峰,等. 煤矿智能快掘关键技术与工程实践[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7):2068-2083.
WANG Hong, WANG Bukang, ZHANG Xiaofeng, et al. Key technology and engineering practice of intelligent rapid heading in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7):2068-2083. (in Chinese)
- [2] 王国法,刘峰,孟祥军,等. 煤矿智能化(初级阶段)研究与实践[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(8):1-36.
WANG Guofa, LIU Feng, MENG Xiangjun, et al. Research and practice on intelligent coal mine construction (primary stage)[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(8):1-36. (in Chinese)
- [3] 谢和平,王金华,鞠杨,等. 煤炭革命的战略与方向[M]. 北京: 科学出版社, 2018:44-59.
- [4] 王国法,王虹,任怀伟,等. 智慧煤矿2025情景目标和发展路径[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2):295-305.
- [5] WANG Guofa, WANG Hong, REN Huaiwei, et al. 2025 scenarios and development path of intelligent coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 295-305. (in Chinese)
- [6] 葛世荣,郝尚清,张世洪,等. 我国智能化采煤技术现状及待突破关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7):28-46.
GE Shirong, HAO Shangqing, ZHANG Shihong, et al. Status of intelligent coal mining technology and potential key technologies in China [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7):28-46. (in Chinese)
- [7] CUI Y M, LIU S Y, LIU Q. Navigation and positioning technology in underground coal mines and tunnels: a review [J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2021, 121 (6) : 295-303.
- [8] 马源,符世琛,张子悦,等. 悬臂式掘进机位姿检测方法研究现状[J]. 工矿自动化, 2020, 46(8): 15-20.
MA Yuan, FU Shichen, ZHANG Ziyue, et al. Research status of pose detection methods of boom-type roadheader [J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(8):15-20. (in Chinese)
- [9] 沈阳,王鹏江,吉晓冬,等. 二维里程辅助的掘进机自主导航方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(11): 96-105.
SHEN Yang, WANG Pengjiang, JI Xiaodong, et al. Research on autonomous navigation method of roadheader aided by two-dimensional mileage [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(11):96-105. (in Chinese)
- [10] 董铭涛,程建华,赵琳,等. 惯性组合导航系统性能评估方法研究进展[J/OL].[2022-03-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2109.TP.20210615.1635.005.html>
- [11] FU S, LI Y, ZONG K, et al. Ultra-wideband pose detection method based on TDOA positioning model for boom-type roadheader[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2019, 99:70-80.
- [12] 刘海涛,陈永华,林艳明,等. 基于TDOA多声源定

- 位的虚假声源消除方法[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(2): 319-326.
- LIU Haitao, CHEN Yonghua, LIN Yanming, et al. Multi-source localization method of eliminating phantom sound sources based on TDOA [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41 (2) :319-326. (in Chinese)
- [12] 余成波, 张一萌, 李洪兵, 等. 无线传感器网络自校正定位算法[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(1):6-10.
- YU Chengbo, ZHANG Yimeng, LI Hongbing, et al. Self-calibration location algorithm based on wireless sensor networks [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(1):6-10. (in Chinese)
- [13] YANG W, ZHANG X, MA H, et al. Geometrically driven underground camera modeling and calibration with coplanarity constraints for a boom-type roadheader [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(9):8919-8929.
- [14] 陈先中, 刘荣杰, 张森, 等. 煤矿地下毫米波雷达点云成像与环境地图导航研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6):2182-2192.
- CHEN Xianzhong, LIU Rongjie, ZHANG Sen, et al. Development of millimeter wave radar imaging and SLAM in under-ground coal mine environment[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45 (6) : 2182-2192. (in Chinese)
- [15] ITURRALDE D, AZURDIA-MEZA C, KROMMENACKER N, et al. A new location system for an underground mining environment using visible light communications[C]//2014 9th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Sign (CSNDSP). Manchester, UK: IEEE, 2014:1165-1169.
- [16] 司垒, 王忠宾, 谭超, 等. 基于差分式惯性传感组件的采煤机位姿解算法[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(2):220-227.
- SI Lei, WANG Zhongbin, TAN Chao, et al. Position and attitude calculation algorithm of shearer based on differential inertial sensors[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(2):220-227. (in Chinese)
- [17] CUI Y M, LIU S Y, YAO J, et al. Integrated positioning system of unmanned automatic vehicle in coal mines [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70:1-13.
- [18] XU Y, CHOON K A, YURIY S S, et al. Indoor INS/UWB-based human localization with missing data utilizing predictive UFIR filtering[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2019, 6(4):952-960.
- [19] 马宏伟, 毛金根, 毛清华, 等. 基于惯导/全站仪组合的掘进机自主定位定向方法[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(8):189-195.
- MA Hongwei, MAO Jinggen, MAO Qinghua, et al. Automatic positioning and orientation method of roadheader based on combination of ins and digital total station[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(8) : 189-195. (in Chinese)
- [20] WANG F, CUI J Q, CHEN B M, et al. A comprehensive UAV indoor navigation system based on vision optical flow and laser FastSLAM [J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(11):1889-1899.
- [21] 俞毓锋, 赵卉菁. 基于相机与摇摆激光雷达融合的非结构化环境定位[J]. 自动化学报, 2019, 45(9):1791-1798.
- YU Yufeng, ZHAO Huijing. Off-road localization using monocular camera and nodding lidar [J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(9):1791-1798. (in Chinese)
- [22] 白亮, 严恭敏, 朱启举, 等. 里程计辅助的捷联惯导系统研究[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(6): 16-18.
- BAI Liang, YAN Gongmin, ZHU Qiju, et al. SINS / OD integrated navigation system[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2013, 33(6) : 16-18. (in Chinese)
- [23] 付强文, 秦永元, 李四海. 速度约束辅助车载捷联惯导系统零速校正算法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(8):1723-1728.
- FU Qiangwen, QIN Yongyuan, LI Sihai. ZUPT method for vehicular SINS aided by velocity constraint [J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35 (8) : 1723-1728. (in Chinese)
- [24] MOURIKIS A I, ROUMELIOTIS S I. A multi-state constraint kalman filter for vision-aided inertial navigation [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Rome, Italy: [s.n.], 2007:3565-3572.
- [25] SOLA J. Quaternion kinematics for the error-state Kalman filter [EB/OL]. [2022-03-22]. <https://arxiv.org/abs/1711.02508>



第一作者简介:刘送永,男,1981年11月生,教授。主要研究方向为煤矿采掘装备智能化、煤矿特种机器人。曾发表《Path planning for robotic manipulator in complex multi-obstacle environment based on improved-RRT》(《IEEE/ASME Transactions on Mechatronics》2022, Vol.27, No.6)等论文。
E-mail: lsyscumt@163.com