

谭玉新,杨维.一种基于UKF的井下机器人超声网络定位方法[J].煤炭学报,2016,41(9):2396-2404. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.0075

Tan Yuxin, Yang Wei. UKF-based ultrasonic network localization for a mine robot[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(9): 2396-2404. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.0075

一种基于UKF的井下机器人超声网络定位方法

谭玉新,杨维

(北京交通大学 电子信息工程学院,北京 100044)

摘要:机器人将在未来煤矿少人或无人化开采中发挥重要作用。根据井下工作光线较暗,空间封闭的特点,提出了一种基于无损卡尔曼滤波(unscented Kalman filter, UKF)的井下机器人超声网络定位方法。方法的核心是通过对光电码盘和电子罗盘定位以及超声网络定位输出的井下机器人位置坐标和航向角度进行UKF滤波,来对井下机器人进行位置更新和预测。由于对机器人进行位置更新和预测是复杂的非线性函数,采用UKF能有效提高滤波精度,降低定位误差。由于越接近当前时刻的转弯半径误差对转弯半径影响越大,故采用Sigmoid函数作为转弯半径误差系数来计算 M 个转弯半径误差和。以误差和为权重调节机器人左右驱动轮的转弯半径,可以减小转弯半径误差。仿真结果表明,采用所提出的基于UKF的井下机器人超声网络定位方法实现了井下机器人更稳定和更精确的定位。

关键词:机器人定位;煤矿井下;超声网络;无损卡尔曼滤波

中图分类号:TD679

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2016)09-2396-09

UKF-based ultrasonic network localization for a mine robot

TAN Yu-xin, YANG Wei

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Robot will play a significant role on unmanned coal mining in the future. According to the dark and confined characteristics in underground coal mine, an ultrasonic network localization technique based on unscented Kalman filter (UKF) is proposed. The core of the method is to update and predict the robot position through UKF which combines the robot position output of light code disc and electronic compass localization with the robot position output of ultrasonic networks localization. Since the location update and prediction for a robot is a complex nonlinear function, the filtering accuracy is improved and the error of positioning is reduced effectively by the UKF. Since the nearer error of turning radius affects the turning radius more, the Sigmoid function is applied as the error coefficient to calculate the error sum of M turning radius. The robot turning radius error is reduced by adjusting the robot turning radius according to the error sum. The simulation results show that the more accurate and reliable location of robot is achieved with the proposed ultrasonic network localization based on UKF.

Key words: robot localization; coal mine; ultrasonic network; unscented Kalman filter (UKF)

机器人将在未来煤矿少人或无人化开采中发挥重要作用,对井下机器人的定位是煤矿井下机器人技

术的重要内容^[1-2]。在煤矿少人或无人化开采中机器人主要在某些局部区域完成一些规定的工作,如在

收稿日期:2016-01-18 修回日期:2016-05-02 责任编辑:许书阁

基金项目:国家重点研发计划重点专项资助项目(2016YFC0801800);国家自然科学基金资助项目(51474015, 51274018)

作者简介:谭玉新(1992—),男,内蒙古赤峰人,硕士研究生。Tel:010-51682162, E-mail:14120123@bjtu.edu.cn。通讯作者:杨维(1964—),男,北京人,教授。Tel:010-51682162, E-mail:wyang@bjtu.edu.cn

一些区域完成工作部件的拾取与运送,监测煤矿井下危险气体的排放,对特定工作设备工作状态的监控与维护等。对井下机器人在该区域的准确定位不仅有利于井上监控中心对机器人的操控,也是井下机器人自主工作的基础。

通常对机器人进行定位可采用在机器人左右驱动轮安装光电码盘,在机器人身上安装电子罗盘的定位方式。光电码盘输出机器人各时间间隔内的路程数据,电子罗盘输出机器人各时间间隔内的航向角度变化数据。已知机器人初始坐标和航向后,累加各个时间间隔内路程和航向角度变化,即可得任意时刻机器人位置和航向信息。但由于光电码盘和电子罗盘的输出存在累积误差^[3],在井下受限空间内其定位精度无法满足井下机器人实际工作的需要。

超声网络成本低,便于安装,超声测距受煤矿井下高粉尘、大湿度等环境因素影响很小,能够实现精度相对较高的定位。因此,超声网络是一种适合在煤矿井下局部区域采用的机器人定位网络。为此,提出在煤矿井下局部区域建立超声网络,并结合在机器人行走中安装的光电码盘和电子罗盘的混合定位方式,以改善井下机器人的定位精度。

井下机器人定位超声网络既可采用机器人发射超声定位方式,也可采用机器人接收超声定位。机器人发射超声定位^[4]是指机器人身上安装超声发射节点,超声网络节点为超声接收节点。机器人发射超声定位一般需要超声接收节点的布置满足一定的几何规律才可简化计算,存在对超声接收节点的布置要求过于精细和对安装要求过于繁琐的缺点。机器人接收超声定位^[5-6]是指机器人身上安装超声接收节点,超声网络节点为超声发射节点。机器人接收超声定位方式能够较好地避免对超声传感器布置要求过于精细和复杂的缺点。因此,采用机器人接收超声定位的方式对井下机器人进行定位。采用超声网络对井下机器人定位时,超声发射传感器网络安装于巷道顶部,在井下机器人身上安装超声接收节点。利用超声网络超声发射节点位置坐标和超声收发模块之间的距离,计算出井下机器人的位置和航向。

超声网络定位虽然定位精度较高,但单独使用时定位精度仍表现出一定的波动性,而单独使用光电码盘和电子罗盘的输出存在累积误差,定位精度较差。因此,为了实现对井下机器人更准确的定位,可进一步采用滤波的方法对两种定位结果进行融合。例如文献^[5]中机器人定位滤波方法采用了扩展卡尔曼滤波方法(extended Kalman filter, EKF)。但机器人位置更新是复杂的非线性方程, EKF 线性近似忽略了

机器人位置和航向更新的高阶项,会造成高阶项误差^[7]。考虑到井下机器人位置和航向更新的非线性特性,采用了无损卡尔曼滤波(UKF)方法来对井下机器人超声网络定位结果与光电码盘和电子罗盘的定位结果进行融合以降低 EKF 线性近似带来的误差,提高井下机器人定位精度。

由于机器人转弯过程是一个连续的过程,不同时刻的转弯半径误差对当前时刻的转弯半径计算的影响并不相同。为此,提出采用 Sigmoid 函数作为基于左右驱动轮路程数据计算得到的转弯半径误差加权系数,通过误差的和调节基于左右驱动轮路程数据计算得到的转弯半径权重,以减小机器人转弯半径误差。

1 煤矿井下超声传感网络

1.1 搭建超声传感网络

图1为在煤矿井下某个区域巷道顶部安装超声发射传感器节点构成超声传感器网络示意。假设巷道宽6 m、高3 m,超声发射节点的总个数为 N 。由于井下机器人至少需要收到两个超声节点发出的超声波才能完成定位,因此各超声发射节点需要分组进行安装。每组超声发射节点构成一条垂直于巷道两侧墙面的直线,各组之间距离为 l_1 ,如图1所示。为保证机器人超声定位准确性,各组间距 l_1 一般不超过15 m。如图1右侧所示,超声发射节点发射超声波时发散角度一般为 15° ,而机器人需要同时接收两个超声信号,则各组内超声发射节点最大间距为 $l_2 = 3/\tan(90^\circ - 15^\circ/2) \approx 0.395$ m。为保证定位可靠性,6 m宽巷道每一排需安装18个超声发射节点构成超声网络,即 $l_2 = 0.353$ m < 0.395 m,可满足要求。

为计算机器人行走时的航向角度,机器人身上至少需要3个超声接收节点,为提高计算机器人位置和航向角度的精度,假设机器人身上安装了4个超声接收节点。为简化计算,4个超声接收节点安装时构成正方形。超声网络定位时,通过超声发射节点位置坐标和测得的发射节点到机器人身上超声接收节点距离,经计算得井下机器人身上各个超声接收节点位置坐标。机器人身上超声接收节点坐标经坐标转换后,得到机器人位置坐标和航向。

1.2 坐标系建立

如图1所示,以超声传感器网络覆盖区域的巷道一角为坐标原点 O_c ,建立井下机器人定位全局直角坐标系 $O_cX_cY_cZ_c$ 。井下机器人为轮式或履带式机器人,设以机器人中心位置 O_L 作为井下机器人的位置。则在全局坐标系统中,机器人位置坐标为 $X =$

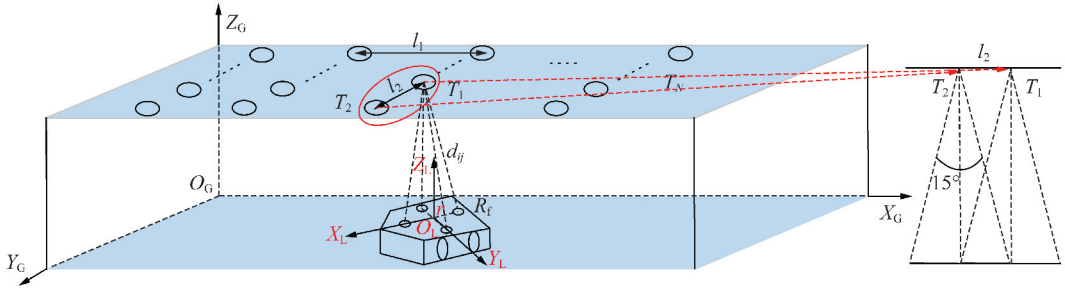


图1 超声网络定位模型

Fig. 1 Ultrasonic network localization model

$[x, y, \varphi]^T$, 其中, (x, y) 为机器人当前的位置坐标; φ 为机器人前进方向与全局坐标横轴正方向的夹角, 即机器人的航向角度。假设第 i 个超声发射节点的坐标为 $T_i^G = [x_{T_i}, y_{T_i}, z_{T_i}]^T (i=1, \dots, N)$ 。机器人身上超声接收节点的高度为 0, 则第 j 个超声接收节点坐标为 $R_j^G = [x_{R_j}^G, y_{R_j}^G, 0]^T (j=1, 2, 3, 4)$ 。这样, 发射节点 T_i^G 到接收节点 R_j^G 间的距离可以表示为

$$d_{ij}^2 = (x_{T_i} - x_{R_j}^G)^2 + (y_{T_i} - y_{R_j}^G)^2 + z_{T_i}^2 \quad (i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

为了方便机器人位置坐标与超声接收节点位置坐标转化, 以机器人中心位置 O_L 作为坐标原点, 机器人前进方向为横轴正方向, 建立机器人坐标系 $O_L X_L Y_L Z_L$, 如图 1 所示。在机器人坐标系中, 井下机器人身上的 4 个超声接收节点坐标为 $R_j^L = [x_{R_j}^L, y_{R_j}^L, 0]^T (j=1, 2, 3, 4)$, 其中, $(x_{R_j}^L, y_{R_j}^L)$ 为机器人坐标系下机器人身上各超声节点的位置坐标。按照超声接收节点位置坐标的几何关系, 在机器人坐标系中, 超声接收节点位置坐标也可表示为

$$R_j^L = r \cdot [\cos \theta_j, \sin \theta_j, 0]^T \quad (2)$$

式中, r 为机器人中心到各个超声接收节点的距离; θ_j 为第 j 个超声接收节点与机器人前进方向的夹角, $\theta_j = \pi(i-1)/2$ 。

在全局坐标下, 机器人身上各个超声接收节点坐标为 $R_j^G = [x_{R_j}^G, y_{R_j}^G, 0]^T$, 则超声接收节点位置坐标在全局坐标系下和机器人坐标系下的转换关系为

$$\begin{bmatrix} x_{R_j}^G \\ y_{R_j}^G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + x_{R_j}^L \cos \varphi - y_{R_j}^L \sin \varphi \\ y + x_{R_j}^L \sin \varphi + y_{R_j}^L \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (3)$$

2 煤矿井下机器人定位

煤矿井下机器人定位过程中, 光电码盘和电子罗盘定位稳定性较高, 但存在累积误差, 超声波网络定位较准确, 但具有波动性, 需要利用滤波方法对两种定位结果进行融合。

2.1 光电码盘和电子罗盘定位

井下机器人行驶过程中, 光电码盘和电子罗盘定位需要利用光电码盘输出的一定时间间隔内机器人的行驶路程数据, 电子罗盘输出的一定时间间隔内机器人航向角度变化数据。已知机器人的出发点位置坐标后, 经过累积计算可得任意时刻机器人的位置和航向。

井下机器人在一定时间间隔行驶的路程数据可通过安装在机器人左右驱动轮上的光电码盘输出的脉冲数据计算得出。设某驱动轮上的光电码盘每转输出脉冲数为 C , 计数时间为 T , 脉冲数目为 m 以及驱动轮半径为 r_w , 则此驱动轮行驶路程为

$$s = 2\pi m r_w / C \quad (4)$$

式中, s 为机器人在计数时间 T 内运动的路程。

机器人运动可分为直线运动和曲线运动, 可由一定时间内机器人航向角度变化 $\Delta\varphi=0$ 或 $\Delta\varphi \neq 0$ 进行区分。若时间足够短, 井下机器人曲线运动可看作为规则的圆周运动。

井下机器人从第 k 时刻运动到第 $k+1$ 时刻的航向角度变化 $\Delta\varphi_k^1$, 可由光电码盘测得的路程转化计算得到。同时, 也可由机器人身上的电子罗盘直接测得航向角度变化 $\Delta\varphi_k^2$ 。这样, 可得机器人的平均航向角度变化 $\Delta\varphi_k = (\Delta\varphi_k^1 + \Delta\varphi_k^2)/2$ 。如图 2 所示, 当机器人左转时, 即 $s_k^1 < s_k^r$ 时, 由光电码盘测得的路程计算得到的航向角度变化 $\Delta\varphi_k^1$ 和转弯半径 R 满足如下关系:

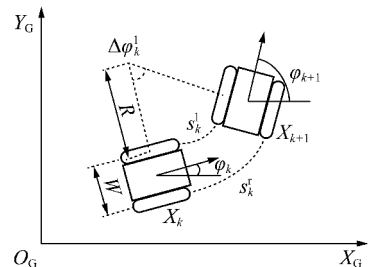


图2 机器人运动模型

Fig. 2 Robot motion model

$$\begin{cases} \Delta\varphi_k^l R = s_k^l \\ \Delta\varphi_k^l (R + W) = s_k^r \end{cases} \quad (5)$$

其中,机器人转弯半径 R 是转弯圆周中心到机器人转弯的内侧驱动轮的距离。这样,由式(4),(5)即可计算得到航向角度变化 $\Delta\varphi_k^l$,即

$$\Delta\varphi_k^l = \frac{2\pi(m_k^r - m_k^l)r_w}{CW} \quad (6)$$

其中, m_k^l 和 m_k^r 分别为左右驱动轮的码盘计数数目; W 为机器人宽度; s_k^l 和 s_k^r 为机器人左右光电码盘测得的前进路程。同理,机器人右转时,即 $s_k^l > s_k^r$ 时,也可得机器人航向角度变化 $\Delta\varphi_k^l$ 。

当井下机器人从第 k 时刻到第 $k+1$ 时刻作直线运动时,即机器人行驶路程 $s_k = s_k^l = s_k^r$ 时,机器人航向角度变化 $\Delta\varphi_k = 0$ 。在全局坐标系下,设井下机器人在第 k 时刻由光电码盘和电子罗盘定位测得的坐标为 $\mathbf{X}_k^v = [x_k^v, y_k^v, \varphi_k^v]^T$ 。此时,由几何关系知,井下机器人基于光电码盘和电子罗盘定位的在直线运动时的位置和航向更新方程为

$$\begin{bmatrix} x_{k+1}^v \\ y_{k+1}^v \\ \varphi_{k+1}^v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_k^v + s_k \cos \varphi_k \\ y_k^v + s_k \sin \varphi_k \\ \varphi_k^v \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.2 基于误差权重的圆周运动转弯半径计算

当井下机器人从第 k 时刻到第 $k+1$ 时刻作圆周运动时,需计算圆周运动的转弯半径,以得到机器人位置和航向更新方程。由式(5)可知,机器人左转时,即当 $s_k^l > s_k^r$ 时,从左右驱动轮路程数据分别可计算得到机器人的转弯半径为

$$\begin{bmatrix} R_k^l \\ R_k^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_k^l / \Delta\varphi_k \\ s_k^r / \Delta\varphi_k - W \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, R_k^l 和 R_k^r 分别为由左右驱动轮路程数据计算得到的转弯半径。同理,机器人右转时也可得到相应的井下机器人圆周运动的转弯半径 R_k^l 和 R_k^r 。由于左右驱动轮存在转弯半径差,通过左右驱动轮路程数据计算得到的转弯半径 R_k^l 和 R_k^r 一般不相同,且都存在一定的误差。由于转弯过程是一个连续的过程,不同时刻的转弯半径误差对转弯半径计算的影响并不相同。为体现机器人转弯的这一特点,对 R_k^l 和 R_k^r 采用了加权处理来获得机器人圆周运动的转弯半径 R_k

$$R_k = \alpha_k^l R_k^l + \alpha_k^r R_k^r \quad (9)$$

式中, α_k^l 和 α_k^r 分别为由左右驱动轮路程数据计算得到的转弯半径 R_k^l 和 R_k^r 的加权系数。

为减小转弯半径计算的误差,采用基于当前时刻 k 之前的 M 个机器人圆周运动的转弯半径误差之

和对 α_k^l 和 α_k^r 进行调节。由于越接近时刻 k 的转弯半径误差对 R_k 的影响越大,为体现这一现象,在确定 α_k^l 和 α_k^r 时采用了图3的 Sigmoid 函数对不同时刻的误差进行加权。由图3可以看出,越接近时刻 k , Sigmoid 函数的取值越大,而且相邻时刻的取值具有平滑过渡的性质,这样就可较好地体现出不同时刻的误差对 R_k 的不同影响。

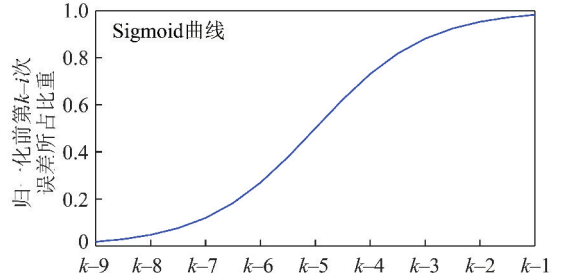


图3 基于 Sigmoid 函数的非归一化误差所占比重

Fig.3 Sigmoid-based not normalized error proportion

基于当前时刻 k 之前的 M 个转弯半径误差之和计算权重 α_k^l 和 α_k^r 的公式为

$$\begin{bmatrix} \alpha_k^l \\ \alpha_k^r \end{bmatrix} = \frac{1}{\eta_k^l + \eta_k^r} \cdot \begin{bmatrix} \eta_k^l \\ \eta_k^r \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\eta_k^l} \\ \frac{1}{\eta_k^r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{m=1}^M \frac{1}{1 + e^{-(k-m)}} \cdot \delta_{k-m}^l \\ \sum_{m=1}^M \frac{1}{1 + e^{-(k-m)}} \cdot \delta_{k-m}^r \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中, δ_{k-m}^l 和 δ_{k-m}^r 分别为左右驱动轮第 $k-m$ 次转弯半径的误差, $\delta_{k-m}^l = |R_{k-m}^l - R_k|$, $\delta_{k-m}^r = |R_{k-m}^r - R_k|$; $1/[1 + e^{-(k-m)}]$ 为 Sigmoid 函数,作为误差 δ_{k-m}^l 和 δ_{k-m}^r 的权值。越接近时刻 k ,误差权值 $1/[1 + e^{-(k-m)}]$ 越大。由式(10),(11)可以看出,左右某驱动轮时刻 k 之前的 M 个机器人圆周运动的转弯半径误差之和越大,该驱动轮路程数据计算得到圆周半径系数越小。

由几何关系知,井下机器人基于光电码盘和电子罗盘定位的圆周运动位置更新方程为

$$\mathbf{X}_{k+1}^v = \begin{bmatrix} x_{k+1}^v \\ y_{k+1}^v \\ \varphi_{k+1}^v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_k^v + R_k [\sin(\varphi_k + \Delta\varphi_k/2) - \sin \varphi_k] \\ y_k^v + R_k [\cos \varphi_k - \cos(\varphi_k + \Delta\varphi_k/2)] \\ \varphi_k^v + \Delta\varphi_k \end{bmatrix} \quad (12)$$

由式(7)和式(12)可得出第 $k+1$ 时刻机器人位置坐标和航向角度。当扩展到任意时刻时就可以得到井下机器人由光电码盘和电子罗盘定位的轨迹。

2.3 超声传感网络定位

井下机器人超声网络定位是由发射节点的位置坐标和超声收发节点之间的距离计算得到。为计算

超声收发节点之间的距离,设超声波声速为 v_u ,从发射模块 T_i^G 到接收模块 R_j^G 传播时延为 Δt ,则超声收发节点之间的距离为 $d_{ij}=v_u \times \Delta t$ 。超声波声速 v_u 可采用修正后的声速 $v_u=v_0 \sqrt{1+t/T_0}$ 进行计算,其中, v_0 为干燥空气中的声速, $v_0=331.4 \text{ m/s}$; $T_0=273.15 \text{ K}$; t 为摄氏温度^[8]。

为了计算井下机器人位置和航向,需要机器人身上的 4 个超声接收节点的全局坐标。由式(2),(3)可知,井下机器人最前方超声接收节点 R_1 的全局坐标为

$$\begin{bmatrix} x_{R_1}^G \\ y_{R_1}^G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x^u + r \cos \varphi \\ y^u + r \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中, (x^u, y^u) 为超声网络测得的井下机器人全局坐标。同理,可得各个超声接收节点 $R_j(j=1, \dots, 4)$ 的全局坐标。

井下机器人向前行驶过程中,会接收到某分组中相邻的两个超声发射节点如 $T_1: (x_{T_1}^G, y_{T_1}^G, z_{T_1}^G)$ 和

$$\cos \varphi_1 = \frac{1}{4rl_{12}^2} [y_{T_2} - y_{T_1} \quad x_{T_2} - x_{T_1}]$$

其中, T_1 和 T_2 两个超声发射节点之间的距离为 $l_{12}^2 = (x_{T_2} - x_{T_1})^2 + (y_{T_2} - y_{T_1})^2$ 。因此,可得第 k 时刻井下机器人的位置和航向信息 $\mathbf{X}_k^u = (x_k^u, y_k^u, \varphi_k^u)^T$ 。

同理,通过超声发射节点 T_1 和 T_2 与其他 3 个接收节点 $R_l(l=1, 2, 4)$, $R_l(l=1, 3, 4)$, $R_l(l=2, 3, 4)$ 间的距离可分别计算出当前井下机器人位置和航向 $\mathbf{X}_k^{u_i} = (x_k^{u_i}, y_k^{u_i}, \varphi_k^{u_i})^T (i=2, 3, 4)$ 。对 $\mathbf{X}_k^{u_i} (i=1, \dots, 4)$ 取平均值后就可得到第 k 时刻基于超声网络定位的井下机器人位置坐标和航向

$$\mathbf{X}_k^u = (x_k^u, y_k^u, \varphi_k^u)^T \quad (16)$$

当扩展到任意时刻时就可以得到井下机器人的超声网络定位轨迹。

2.4 无损卡尔曼滤波(UKF)传感器融合定位

式(7),(12)是井下机器人基于光电码盘和电子罗盘的定位结果,定位方法较稳定,但存在较大的累积误差。式(16)是基于井下机器人超声网络的定位结果,定位方法较准确,但具有一定的波动性。为提高定位的稳定性和精度,采用了滤波的方法对两种定位方法进行了融合。由于对这两种定位方法进行滤波是复杂的非线性变换,因此采用非线性的无损 UKF 滤波方式,可比线性 EKF 滤波方式获得更好的滤波效果。其中,机器人光电码盘和电子罗盘定位是从零时刻累加得到,作为 UKF 的状态方程。机器人超声网络定位是各个时刻分别计算得到,作为 UKF 的观测方程。

$T_2: (x_{T_2}^G, y_{T_2}^G, z_{T_2}^G)$ 发射的超声波。选取井下机器人身上 3 个超声接收节点 R_1, R_2, R_3 , 测量超声发射到接收的时间间隔后,可得到收发节点间的距离 $d_{ij} (i=1, 2; j=1, 2, 3)$ 。根据式(1),(3),由 T_1, T_2 和 $R_l (l=1, 2, 3)$ 的全局坐标,经过复杂计算后,得到井下机器人全局位置坐标^[6]

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}_1 \mathbf{A}_1 \mathbf{B}_1 \quad (14)$$

式中,

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_1 &= \frac{1}{4r[(y_{T_2} - y_{T_1}) \sin \varphi + (x_{T_2} - x_{T_1}) \cos \varphi]}, \\ \mathbf{A}_1 &= \begin{bmatrix} 2r \cos \varphi & y_{T_2} - y_{T_1} \\ 2r \sin \varphi & x_{T_2} - x_{T_1} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B}_1 &= \begin{bmatrix} d_{11}^2 - d_{12}^2 + x_{T_2}^2 - x_{T_1}^2 + y_{T_2}^2 - y_{T_1}^2 \\ d_{13}^2 - d_{22}^2 + 4rx_{T_1} \sin \varphi - 4ry_{T_1} \cos \varphi \end{bmatrix}^\circ \end{aligned}$$

其中,井下机器人航向角度为

$$\begin{bmatrix} d_{22}^2 - d_{23}^2 - d_{13}^2 + d_{21}^2 \\ 2d_{11}^2 - 2d_{12}^2 - d_{13}^2 - d_{22}^2 + d_{21}^2 + d_{23}^2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

UKF 的状态方程分为井下机器人行驶路线为直线和圆周运动两种方式。若从第 k 时刻到第 $k+1$ 时刻机器人航向变化 $\Delta \varphi_k = 0$, 即井下机器人作直线运动,由式(7)可得第 $k+1$ 时刻机器人直线行驶位置状态方程为

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{k+1}^v &= f(\mathbf{X}_k^v, \mathbf{U}_k^v) + \mathbf{W}_k = \\ &\begin{bmatrix} x_k + s_k \cdot \cos \varphi_k \\ y_k + s_k \cdot \sin \varphi_k \\ \varphi_k \end{bmatrix} + \mathbf{W}_k \end{aligned} \quad (17)$$

若从第 k 时刻到第 $k+1$ 时刻机器人航向变化 $\Delta \varphi_k \neq 0$, 即井下机器人作圆周运动,由式(12)可得第 k 时刻机器人圆周运动位置状态方程为

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{k+1}^v &= f(\mathbf{X}_k^v, \mathbf{U}_k^v) + \mathbf{W}_k = \\ &\begin{bmatrix} x_k + R_k [\sin(\varphi_k + \Delta \varphi_k/2) - \sin \varphi_k] \\ y_k + R_k [\cos \varphi_k - \cos(\varphi_k + \Delta \varphi_k/2)] \\ \varphi_k + \Delta \varphi_k \end{bmatrix} + \mathbf{W}_{k+1} \end{aligned} \quad (18)$$

其中, $\mathbf{X}_{k+1}^v = f(\mathbf{X}_k^v, \mathbf{U}_k^v) + \mathbf{W}_k$ 为 UKF 过程中的状态方程, \mathbf{X}_k^v 和 \mathbf{U}_k^v 分别为 UKF 时的输入变量和控制变量。 $\mathbf{X}_k^v = [x_k^v, y_k^v, \varphi_k^v]^T$ 为井下机器人第 k 时刻由光电码盘和电子罗盘定位得到的位置和航向,控制变量 $\mathbf{U}_k = [s_k^l, s_k^r]$ 为在第 k 时刻到第 $k+1$ 时刻左右两轮运动的路程。机器人在做圆周运动时,根据式(8),(9),由 $\mathbf{U}_k = [s_k^l, s_k^r]$ 得到转弯半径 R_k 。 \mathbf{W}_{k+1} 为状态方程在机

器人行走过程中光电码盘测量存在的误差向量, $\mathbf{W}_{k+1} = [w_x, w_y, w_\varphi]^T$, 其中, w_x 和 w_y 为光电码盘测量误差; w_φ 为电子罗盘的测量误差, 通常假设各误差符合高斯分布。

通过超声定位方法式(16)可得第 $k+1$ 时刻机器人位置得观测方程为

$$\mathbf{Z}_{k+1} = h(\mathbf{X}_{k+1}^u) + \mathbf{V}_{k+1} = (x_{k+1}^u, y_{k+1}^u, \varphi_{k+1}^u)^T + \mathbf{V}_{k+1} \quad (19)$$

式中, \mathbf{Z}_{k+1} 为 UKF 过程中的观测方程, $\mathbf{Z}_{k+1} = h(\mathbf{X}_{k+1}^u) + \mathbf{V}_{k+1}$; \mathbf{X}_{k+1}^u 为井下机器人第 $k+1$ 时刻由超声传感网络定位得到的位置和航向, $\mathbf{X}_{k+1}^u =$

$$\bar{\mathbf{P}}_0 = \text{diag} \left[\frac{(x_0 - \bar{x}_0)^2 + (x_0^u - \bar{x}_0)^2}{2}, \frac{(y_0 - \bar{y}_0)^2 + (y_0^u - \bar{y}_0)^2}{2}, \frac{(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0)^2 + (\varphi_0^u - \bar{\varphi}_0)^2}{2} \right]_{3 \times 3} \quad (21)$$

在全局坐标中, 假设井下机器人的初始坐标为 $(0,0)$, 且机器人航向角度 $\varphi = 0^\circ$ 。因此, 机器人初始位置坐标和航向角度为 $\bar{\mathbf{X}}_0 = [0, 0, 0]^T$ 。通过光电码盘和电子罗盘定位测得的井下机器人初始位置和航向为 \mathbf{X}_0^u , 通过超声网络测得的井下机器人初始位置和航向为 \mathbf{X}_0^u , 由式(21)得到井下机器人定位初始误差方差矩阵 $\bar{\mathbf{P}}_0$ 。

(2) UT 变换。机器人第 k 时刻光电码盘和电子罗盘定位与超声网络定位的结果都存在一定的误差。为对两种定位结果进行 UKF 滤波, 需要对两种定位结果的机器人位置和航向均值 $\bar{\mathbf{X}}_k$ 进行 UT 变换, 以

$$\bar{\mathbf{P}}_k = \text{diag} \left[\frac{(x_k - \bar{x}_k)^2 + (x_k^u - \bar{x}_k)^2}{2}, \frac{(y_k - \bar{y}_k)^2 + (y_k^u - \bar{y}_k)^2}{2}, \frac{(\varphi_k - \bar{\varphi}_k)^2 + (\varphi_k^u - \bar{\varphi}_k)^2}{2} \right]_{3 \times 3}$$

机器人位置和航向向量 \mathbf{X} 是 3 维向量即 $L=3$ 。 κ 为控制形成 Sigma 点散布程度的参数, $\kappa = (\alpha^2 - 1)L$, α 为权值缩放因子, 取值范围为 $(1 \times 10^{-4} \leq \alpha \leq 1)$, 通常取一个较小的值。

(3) 时间更新。用 Sigma 点集矩阵 χ 代替式(17), (18)状态方程中的 \mathbf{X}_k^u , 得到包括 2 种定位结果的综合状态方程

$$\chi_{i,k+1|k}^* = f(\chi_{i,k}, \mathbf{U}_k) \quad (23)$$

其中, $\chi_{i,k+1|k}^*$ 为井下机器人位置和航向的状态预测值。对 $(2L+1)$ 个状态预测值进行加权求和可得到井下机器人位置和航向的预测状态值为

$$\mathbf{X}_{k+1|k} = \sum_{i=0}^{2L} \omega_i^{(m)} \chi_{i,k+1|k}^* \quad (24)$$

同时, 可计算得到机器人位置和航向状态方差为

$$\mathbf{P}_{k+1|k} = \sum_{i=0}^{2L} \omega_i^{(c)} [\chi_{i,k+1|k}^* - \mathbf{X}_{k+1|k}] [\chi_{i,k+1|k}^* - \mathbf{X}_{k+1|k}]^T + \mathbf{Q}_{k+1} \quad (25)$$

$(x_{k+1}^u, y_{k+1}^u, \varphi_{k+1}^u)^T$; \mathbf{V}_{k+1} 为通过超声网络定位的观测误差向量, $\mathbf{V}_{k+1} = [v_x, v_y, v_\varphi]^T$, 其中 v_x, v_y 和 v_φ 为超声网络的定位和航向误差, 通常也假设各误差符合高斯分布。

在分别获得两种定位方法的状态方程(17)和(18)及观测方程(19)后, 通过 UKF 滤波对井下机器人进行位置和航向更新的步骤如下:

(1) 初始化。井下机器人位置与航向的状态初值及误差方差矩阵初值为

$$\bar{\mathbf{X}}_0 = \frac{\mathbf{X}_0^v + \mathbf{X}_0^u}{2} \quad (20)$$

获得包括这两种定位结果均值和方差的新 Sigma 点集。通过 UT 变换得到的 $L \times (2L+1)$ 维 Sigma 点集矩阵 χ 为

$$\begin{aligned} \chi_0 &= \bar{\mathbf{X}}_k \\ \chi_i &= \bar{\mathbf{X}}_k + \sqrt{(L + \kappa)} (\sqrt{\bar{\mathbf{P}}_k})_i \quad (i = 1, \dots, L) \\ \chi_i &= \bar{\mathbf{X}}_k - \sqrt{(L + \kappa)} (\sqrt{\bar{\mathbf{P}}_k})_{i-L} \\ &\quad (i = L + 1, \dots, 2L) \end{aligned} \quad (22)$$

其中, 第 k 时刻井下机器人位置和航向方差矩阵为

其中, \mathbf{Q}_{k+1} 为 $k+1$ 时刻机器人位置和航向状态方程的噪声方差矩阵; $\mathbf{P}_{k+1|k}$ 为状态估计方差矩阵。

用式(23)得到的机器人位置和航向的状态预测值 $\chi_{i,k+1|k}^*$ 代替式(19)观测方程中的 \mathbf{X}_{k+1}^u , 得到包括 2 种定位结果的综合观测方程

$$\zeta_{i,k+1|k}^* = h(\chi_{i,k+1|k}^*, \mathbf{V}_{k+1}) \quad (26)$$

其中, $\zeta_{i,k+1|k}^*$ 为井下机器人位置和航向的观测预测值。同样, 对 $(2L+1)$ 个观测预测值进行加权求和可得到井下机器人位置和航向的预测观测值为

$$\mathbf{Z}_{k+1|k} = \sum_{i=0}^{2L} \omega_i^{(m)} \zeta_{i,k+1|k}^* \quad (27)$$

同时, 可计算得到机器人位置和航向观测方差为

$$\mathbf{P}_{z,k+1} = \sum_{i=0}^{2L} \omega_i^{(c)} [\zeta_{i,k+1|k}^* - \mathbf{Z}_{k+1|k}] [\zeta_{i,k+1|k}^* - \mathbf{Z}_{k+1|k}]^T + \mathbf{R}_{k+1} \quad (28)$$

其中, \mathbf{R}_{k+1} 为 $k+1$ 时刻机器人位置和航向观测方程的噪声方差矩阵。

$\omega_i^{(m)}, \omega_i^{(c)}$ 和 $\omega_i^{(c)}$ 是式 (24) ~ (25), (27) ~ (28) 中的权值^[16]

$$\begin{aligned}\omega_0^{(m)} &= \kappa / (L + \kappa) \\ \omega_0^{(c)} &= \kappa / (L + \kappa) + (I - \alpha^2 + \beta) \\ \omega_i^{(m)} &= \omega_i^{(c)} = 1 / [2(L + \kappa)], i = 1, \cdots, 2L\end{aligned}\tag{29}$$

其中, $\omega_i^{(m)}$ 为机器人定位过程中一阶统计特性权系数; $\omega_i^{(c)}$ 为机器人定位过程中二阶统计特性权系数; $\beta(\beta \geq 0)$ 是非负的加权项, 对各列权值进行调节。由于机器人定位误差符合高斯分布, β 取最优值 $\beta = 2$ 。

(4) 测量更新。利用式 (23) 得到的机器人位置和航向状态值 $\chi_{i,k+1|k}^*$ 和式 (26) 得到的机器人位置和航向观测值 $\zeta_{i,k+1|k}^*$, 计算机器人位置和航向的状态值与观测值的协方差为

$$P_{\chi_{k+1|Z_{k+1}}} = \sum_{i=0}^{2L} \omega_i^{(c)} [\chi_{i,k+1|k}^* - X_{k+1|k}] [\zeta_{i,k|k-1}^* - Z_{k+1|k}]^T$$

(30)

为计算第 $k+1$ 时刻井下机器人位置和航向误差方差矩阵, 需计算第 $k+1$ 时刻增益矩阵

$$K_{k+1} = P_{\chi_{k+1|Z_{k+1}}} P_{Z_{k+1}}^{-1}$$

(31)

式中, $P_{Z_{k+1}}^{-1}$ 为 $P_{Z_{k+1}}$ 的逆矩阵。

(5) 结果输出。

$$\bar{X}_{k+1} = X_{k+1|k} + K_{k+1} [Z_{k+1} - Z_{k+1|k}]$$

(32)

$$\bar{P}_{k+1} = P_{k+1|k} - K_{k+1} P_{Z_{k+1}} K_{k+1}^T$$

(33)

因此, 可得第 $k+1$ 时刻井下机器人位置和航向 $\bar{X}_{k+1} = [x_{k+1}^{UKF}, y_{k+1}^{UKF}, \varphi_{k+1}^{UKF}]$ 和第 $k+1$ 时刻井下机器人位置和航向误差方差矩阵 \bar{P}_{k+1} 。扩展到任意时刻, 即得井下机器人 UKF 传感器融合定位的轨迹。

3 模拟仿真分析

为评估所提出的基于 UKF 的井下机器人超声网络定位方法, 对机器人超声网络定位的轨迹进行了仿真, 仿真流程如图 4 所示。仿真中, 假设系统噪声较大, 井下机器人位置和航向噪声初值为 $Q_0 = R_0 = \text{diag}[(0.5 \cdot 10^{-2} \text{m})^2 (0.5 \cdot 10^{-2} \text{m})^2 (1.5^\circ)^2]$, 其他

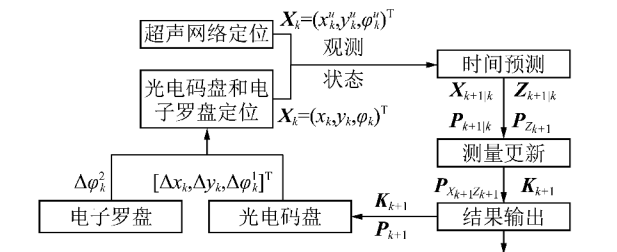


图 4 机器人定位仿真流程
Fig. 4 Simulation process of robot localization

仿真参数见表 1。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	值
煤矿巷道高度/m	3
煤矿巷道长度/m	100
煤矿巷道宽度/m	6
机器人宽度 W/cm	24
超声模安装半径 r/cm	10
机器人前进速度/(m · s ⁻¹)	0.25
单步仿真前进距离误差方差/cm ²	0.5
超声发射节点各组间距 l ₁ /m	10
超声发射节点单组节点间距 l ₂ /cm	30
步航向角度测量误差方差/(° ²)	1.5
Sigma 点权值 $\omega_i^{(m)}$	0.2
Sigma 点权值缩放因子 α	0.1

假设井下机器人从 (0,0) 点出发, 按图 5 中的绿色轨迹行走。图 5 中红色、黑色和蓝色轨迹分别为采用所提出的基于 UKF 的超声网络定位、单纯超声网络定位和单独通过光电码盘和电子罗盘定位所得到的井下机器人行走轨迹。由图 5 可以看出, 单纯采用光电码盘和电子罗盘定位由于存在累积误差, 随着时间的推移, 光电码盘和电子罗盘的累积误差导致定位轨迹与机器人真实行走轨迹逐渐发生偏移, 定位误差越来越大。超声网络定位方法能够较准确定位井下机器人位置, 定位结果不存在累积误差。但由于超声传感器网络超声传感器是分组安装的, 井下机器人在行走过程中由于与超声传感器的位置关系不断发生变化, 使定位结果存在一定的波动性。基于 UKF 的超声网络定位由于预测下一时刻井下机器人的位置坐标时以误差和的方差最小为目标, 可充分利用两种定位方法的优势, 在提高井下机器人位置定位的稳定性同时, 使定位结果更加准确。

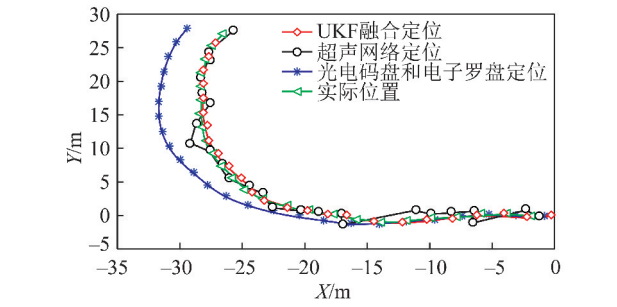


图 5 井下机器人位置仿真
Fig. 5 Simulated mine robot position

图 6 为采用不同定位方法时, 井下机器人坐标的定位误差。坐标误差 $\Delta = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2$, 其中, Δx 和

Δy 为全局坐标下机器人在 X 方向上和 Y 方向上的误差。由图 6 可以看到,由于存在累积误差,单独使用光电码盘和电子罗盘定位误差随着时间推移定位误差总体越来越大。单独使用超声网络定位误差虽然总体较小但不时存在较大的误差点。根据机器人行走的轨迹、速度和时间可以推算,当井下机器人行驶到超声网络超声节点下方时定位误差相对较小,当井下机器人逐渐远离超声网络节点时,定位误差变大,但接近新的定位节点组时定位误差又开始变小。基于 UKF 的超声网络定位可根据超声网络定位的结果修正光电码盘和电子罗盘定位的累积误差。因此,基于 UKF 的超声网络定位兼具超声网络定位较准确的优点和光电码盘和电子罗盘定位较精细的优点,弥补了超声网络定位波动性大,光电码盘和电子罗盘定位存在累积误差的不足,使定位更稳定,精度更高。

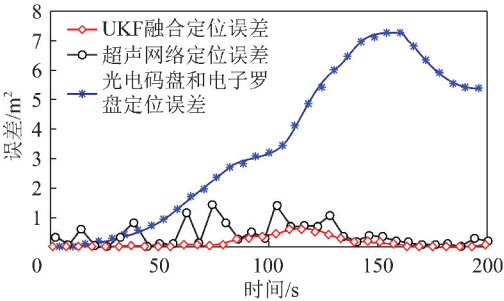


图 6 机器人坐标定位误差
Fig. 6 Error of robot coordinate position

图 7 为采用不同定位方法时,井下机器人的航向误差。由图 7 可以看出,由于超声网络定位获得的航向角度是由测得的超声收发传感器之间的距离通过式(15)计算得到的,航向角度误差相对较大。光电码盘和电子罗盘定位航向信息可由电子罗盘直接测量得到,航向角度误差相对较小。基于 UKF 的超声网络定位同样可以通过滤波处理获得比光电码盘和电子罗盘定位航向更小的角度误差。

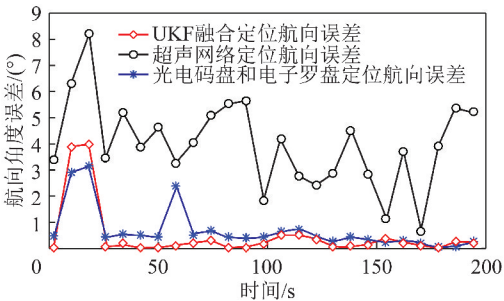


图 7 机器人航向误差
Fig. 7 Error of robot movement direction

表 2 为上述 3 种不同定位方法井下机器人 X 方向、 Y 方向和航向角度误差和误差方差值。由表 2 可

以看出,基于 UKF 的超声网络定位方法相较于其他 2 种定位方法, X 方向、 Y 方向和航向角度误差和误差方差值明显较小,可以更好地满足井下机器人对定位的实际要求。

表 2 3 种定位方法误差及误差方差对比
Table 2 Error and variance comparison of three localization methods

参数	光电码盘和电子罗盘定位	超声网络定位	基于 UKF 融合定位
X 方向/m	0.725 3	1.056 9	0.386 8
Y 方向/m	1.504 4	0.874 8	0.314 1
航向角度误差/(°)	1.472 3	4.890 8	1.259 8
X 方向误差方差/ m^2	0.215 9	0.458 5	0.115 3
Y 方向误差方差/ m^2	0.639 6	0.305 2	0.168 7
航向误差方差/(° 2)	1.325 2	2.066 7	1.175 3

4 结 论

(1) 基于 UKF 的井下机器人超声网络定位方法可克服单独采用光电码盘和电子罗盘定位的累积误差和超声传感器网络定位的波动性,位置坐标定位结果更加稳定,精度更高。

(2) 基于 UKF 的井下机器人超声网络定位方法通过滤波处理可获得比光电码盘和电子罗盘定位更小的航向角度误差。

参考文献:

[1] 杨海,李威,罗成名,等. 基于捷联惯导的采煤机定位姿态技术实验研究[J]. 煤炭学报,2014,39(12):2550-2556.
Yang Hai, Li Wei, Luo Chengming, et al. Experimental study on position and attitude technique for shearer using SINS measurement [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(12): 2550-2556.

[2] Wang Jinhua. Development and prospect on fully mechanized mining in Chinese coal mines [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2014, 1(3): 253-260.

[3] 郝尚清,李昂,王世博,等. 采煤机惯性导航安装偏差对定位误差的影响[J]. 煤炭学报,2015,40(8):1963-1968.
Hao Shangqing, Li Ang, Wang Shibao, et al. Effects of shearer inertial navigation installation noncoincidence on shearer positioning error [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1963-1968.

[4] 周伦. 室内移动机器人超声波网络定位方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学,2013:10-14.
Zhou Lun. Research on ultrasonic network positioning method for indoor mobile robot [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 10-14.

[5] Seong Jin Kim, Byung Kook Kim. Dynamic ultrasonic hybrid localization system for indoor mobile robots [J]. IEEE Trans. Ind. Electron., 2013, 60(10): 4562-4573.

[6] Hung Hsing Lin, Ching Chic Tsai, Jui Cheng Hsu. Ultrasonic local-

- zation and pose tracking of an autonomous mobile robot via fuzzy adaptive extended information filtering [J]. IEEE Trans. Instrum. Meas., 2008, 57(9): 2024–2034.
- [7] 张文, 孙瑞胜. EKF与UKF的性能比较及应用[J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2015, 39(5): 614–618.
- Zhang Wen, Sun Ruisheng. Research on performance comparison of EKF and UKF and their application[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2015, 39(5): 614–618.
- [8] 付华, 杜晓坤, 陈峰. 基于Elman网络的超声测距补偿在煤矿机器人中的应用[J]. 煤炭学报, 2005, 30(6): 783–787.
- Fu Hua, Du Xiaokun, Chen Feng. Application of ultrasonic ranging compensate in the pit robot based on Elman network[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(6): 783–787.
- [9] Ka Hyung Choi, Won-Sang Ra. Robust least squares approach to passive target localization using ultrasonic receiver array[J]. IEEE Trans. Ind. Electron, 2014, 61(4): 1993–2002.
- [10] Oscar De Silva, George K I Mann, Raymond G Gosine. An ultrasonic and vision-based relative positioning sensor for multirobot localization[J]. IEEE Sens. J., 2015, 15(3): 1716–1726.
- [11] 田劫, 王苏戎, 穆晶, 等. 悬臂式掘进机空间位姿的运动学模型与仿真[J]. 煤炭学报, 2015, 40(11): 2617–2622.
- Tian Jie, Wang Suyu, Mu Jing, et al. Spatial pose kinematics model and simulation of boom-type road header[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(11): 2617–2622.
- [12] Zhang Rui, Fabian Hoflinger, Leonhard Reindl. TDOA-based localization using interacting multiple model estimator and ultrasonic transmitter/receiver[J]. IEEE Trans. Instrum. Meas., 2013, 62(8): 2205–2214.
- [13] Shu Ting Goh, Seyed Zekavat, Kaveh Pahlavan. DOA-based endoscopy capsule localization and orientation estimation via unscented Kalman filter[J]. IEEE Sens. J., 2014, 14(11): 3819–3829.
- [14] Siamak Yousef, Chang Xiaowen, Benoit Champagne. Mobile localization in non-line-of-sight using constrained square-root unscented Kalman filter[J]. IEEE Trans. Vehi. Tech., 2015, 64(5): 2071–2083.
- [15] Shen Haijun, Christopher D Karlgaard. Sensitivity reduction of unscented Kalman filter about parameter uncertainties[J]. IEEE Inst. Eng. Tech., 2014, 9(4): 374–383.
- [16] Meenakshi Gupta, Laxmidhar Behera, Venkatesh K Subramanian, et al. A robust visual human detection approach with UKF-based motion tracking for a mobile robot[J]. IEEE Syst. J., 2015, 9(4): 1363–1375.
- [17] 管军, 易文俊, 常思江, 等. 基于UKF的北斗/SINS组合导航系统研究[J]. 弹道学报, 2015, 27(1): 1–6.
- Guan Jun, Yi Wenjun, Chang Sijiang, et al. Research on Beidou/SINS integrated navigation system based on UKF[J]. Journal of Ballistics, 2015, 27(1): 1–6.
- [18] Chang Guobin. Marginal unscented Kalman filter for cross correlated process and observation noise at the same epoch[J]. IEEE Inst. Eng. Tech., 2014, 8(1): 54–64.
- [19] Wang Jinhua, Yu Bin, Kang Hongpu, et al. Key technologies and equipment for a fully mechanized top-coal caving operation with a large mining height at ultra-thick coal seams[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2015, 2(2): 97–161.
- [20] Luc Chassagne, Olivier Bruneau, Adrien Bialek, et al. Ultrasonic sensor triangulation for accurate 3D relative positioning of humanoid robot feet[J]. IEEE Sens. J., 2015, 15(5): 2856–2865.