

面向具身智能的消毒机器人运动学标定与精度补偿方法

成军¹, 范伟龙², 邵金燕¹, 周雪媚³

- (1. 北京大学工学院先进制造与机器人系, 北京 100871;
2. 中机科(北京)车辆检测工程研究院有限公司, 北京 102100;
3. 民政部一零一研究所, 北京 100070)

摘要: 提高消毒机器人的定位精度和增强其实时性是实现具身智能的重要前提, 对于达成致病性微生物的高灭杀率至关重要, 可以为医院、殡仪馆等场所的卫生安全提供有力保障。基于此, 提出了一种消毒机器人运动学标定与精度补偿方法。首先, 基于旋量理论提出一种运动学模型和误差模型的建模方法; 其次, 对运动区域进行划分并对特征点数据进行采样; 再次, 基于最小二乘法提出一种误差辨识算法, 并通过采样数据实现辨识; 最后, 将定位误差补偿至机器人的末端位置, 实现了精度补偿, 并通过仿真实验验证了该方法的正确性。所提方法可以在保证实时性的同时大幅提高消毒机器人的定位精度, 提升机器人的具身智能水平, 为提高病菌的灭杀率和实现特殊场所的可靠防控提供了有力保障。

关键词: 运动学标定; 精度补偿; 消毒机器人; 旋量理论; 误差模型

中图分类号: TP242

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202507

Kinematic calibration and accuracy compensation method for embodied intelligent disinfection robot

CHENG Jun¹, FAN Weilong², SHAO Jinyan¹, ZHOU Xuemei³

1. Department of Advanced Manufacturing and Robotics, College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China
2. Vehicle Testing Engineering Research Institute of China, Beijing 102100, China
3. 101 Institute of Ministry of Civil Affairs, Beijing 100070, China

Abstract: Improving the positioning accuracy and real-time performance of disinfection robots are important prerequisites for achieving embodied intelligence, which is crucial to achieve a high sterilization rate of pathogenic microorganism, and can provide a strong guarantee for the health and safety of hospitals, funeral homes and other places. Therefore, a method for kinematics calibration and accuracy compensation of disinfection robot is proposed. First, a modeling method of kinematic model and error model based on screw theory is proposed. Second, the moving region is divided and the feature point data is sampled. Third, an error identification algorithm based on least square method is proposed, and the identification is realized by sampling data. Finally, the positioning error is compensated to the end position of the robot, and the accuracy compensation is realized. The correctness of the proposed method is verified by simulation experiments. The kinematic calibration and accuracy compensation method proposed can greatly improve the positioning accuracy of disinfection robot while ensuring real-time performance, enhance the level of robot's embodied intelligence, and provide a strong guarantee for improving the killing rate of germs and realizing reliable prevention of special places.

Key words: kinematic calibration, accuracy compensation, disinfection robot, screw theory, error model

收稿日期: 2024-08-26; 修回日期: 2024-10-25

通信作者: 周雪媚, zxmcaur@126.com

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2022YFC3800400)

Foundation Item: National Key Research and Development Project of China (No.2022YFC3800400)

0 引言

随着我国物质文明与精神文明的不断发展,民众对生命健康和安全的要求也不断提高。医院、殡仪馆等特殊场所由于行业性质和工作需要,不可避免地存在致病性微生物,消毒工作势在必行^[1-2]。为降低人工消毒带来的用人成本、消除作业过程中的不确定性和提高消毒效率^[3-4],用机器人执行消毒作业成为发展趋势。

目前,消毒机器人的研究多集中在同步定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)和导航领域^[5-7],但随着脉冲强光等指向性精准消毒装置的广泛应用,机器人的精度需要进一步提高,仅依赖SLAM和导航难以满足。具身智能作为人工智能的重要发展方向,以机器人为载体,并要求机器人具备与物理世界交互的能力,其具体工作环境(如地面交通^[8]、水域海洋^[9]、医疗场所等)通常具有复杂性和时变性的特点,这对机器人的精度和实时性提出了更高的要求。机器人的精度由两部分构成,一是机器人的运动精度,即机器人在地图中的位置精度,由导航和SLAM算法以及所涉及的传感器等硬件决定;二是定位精度,为末端执行器相对机器人基坐标系的位置精度,即机器人的自身精度,由装配工艺和传动零部件的精度决定。机器人较低的定位精度使得消毒的实际位置与标称位置存在较大误差,极大地影响了消毒效果。为大幅提高消毒机器人的病菌灭杀率,需要对机器人进行运动学标定和精度补偿,从而提高定位精度。标定与补偿技术在机床、机械臂等精密加工设备已有应用,但在消毒机器人领域的应用研究较少。

机器人的运动学标定是在建立机器人运动学模型和误差模型的基础上,通过测量末端位姿的真实值并和其标称值作对比分析,最终辨识出运动学参数误差的方法^[10]。机器人运动学标定分为3个步骤。首先,建立机器人的运动学模型和误差模型,运动学模型是误差模型的数学基础,通过对运动学模型中的运动学参数进行偏微分运算可以推导得到误差模型,误差模型构建了机器人运动学参数误差与末端定位误差的数学解析关系,由误差模型可以推导得到误差辨识模型,通过对末端定位误差进行数据采样即可辨识得到运动学参数误差。其次,设计实验和数据采样,对机器人进行运动规划和区域

划分,并对末端位置的标称值和实际值进行采样,以此得到末端定位误差的数据。最后,进行误差辨识,由误差模型推导得到误差辨识模型,基于末端定位误差数据,采用辨识算法对误差辨识模型进行求解,得到运动学参数误差。在运动学标定的基础上,对机器人进行精度补偿,补偿后的末端位置与其标称值的误差大幅减小,定位精度得到提高^[11-13]。精度补偿分为离线补偿和在线补偿。离线补偿可以不考虑实时性,因此在离线补偿时,可以通过将运动范围划分为更多区域以及在各区域增加采样点的方法进一步提高补偿精度。在线补偿则必须考虑实时性,同时保证补偿精度。由于消毒机器人的运动学标度与精度补偿方法鲜有研究,具身智能水平亟待提升,本文开展了相关工作。在一些重点消毒场所,机器人需要与周围物理环境进行实时交互,以保证病菌的高灭杀率,此时需采用在线补偿方法。考虑到机器人广泛的应用场景,本文兼顾了补偿方法的精度和实时性。

本文基于旋量理论和四元数建立了机器人的运动学模型,相比传统的DH建模方法,旋量方法采用更少的运动学参数,表达式更加简练,便于推导和计算^[14-15],相比于欧拉角,四元数避免了角度参数的三角函数运算,进一步提高了计算效率和计算精度^[16-17]。其一,三角函数运算后取有效数字将导致计算精度的损失,标定与补偿过程涉及大量计算,累加的损失将降低标定结果的精度,因此采用四元数坐标有利于提高计算精度。其二,三角函数运算导致的计算时间消耗与计算量正相关,较大的计算量将影响标定与补偿算法的实时性,因此采用四元数可提高计算效率和算法的实时性。计算的精度和实时性对于本文标定与补偿方法至关重要,因此选取四元数为角度坐标。在运动学模型的基础上,本文提出了一种考虑转角误差和结构长度误差的运动学误差模型,并基于最小二乘法提出了一种误差辨识模型,通过设计实验和对末端位置进行采样,得到了运动学误差参数。将运动学误差参数引起的定位误差补偿至末端位置的实际值,实现了消毒机器人的精度补偿。

本文提出的消毒机器人运动学标定和精度补偿方法,可以大幅提高机器人的定位精度,从而提高致病性微生物的灭杀率,保障医院、殡仪馆等场所的卫生防控和群众的健康安全。

1 运动学建模

本文开发了一款新型消毒机器人，用于完成医院、殡仪馆等场所的自动化消毒任务。机器人由3个模块组成，分别是移动底盘、导航模块和消毒模块。如图1所示，移动底盘具有2个驱动轮和4个从动轮，从动轮为脚轮，分布于底盘的4个角，驱动轮由电机驱动，分别位于两侧从动轮的中点且沿前进方向左右排布，驱动轮的圆心与底盘地面共面。导航模块包含环境感知组件，即二维激光雷达，可实现机器人的环境建图、定位与导航。消毒模块包含3种消毒组件，即纳米喷雾消毒组件、脉冲强光消毒组件和循环风消毒组件，可实现重要场所的全方位消毒，其中纳米喷雾消毒组件和循环风消毒组件为范围性消毒装置，对机器人的定位精度要求不高；脉冲强光消毒组件为指向性消毒装置，可以对光路上的病菌进行精准消杀，对机器人的定位精度有很高的要求。消毒模块与导航模块由穿过两者中心的转动轴连接，可实现相对转动，以扩展机器人的消毒范围，增加灵活性。此外，机器人顶部配有操作面板，可实现机器人的便捷操作以及环境和定位信息的可视化。

为实现机器人的运动学建模，首先建立机器人的坐标系。本文消毒机器人的结构尺寸如图2(a)所示。分别设置基坐标系 $\{B\}$ 、转动坐标系 $\{R\}$ 和脉冲组件坐标系 $\{P\}$ ，原点分别为 O_B 、 O_R 和 O_P ，如图2(b)所示， O_B 位于两主动轮圆心连线的中点，即底盘的底面形心位置， O_R 位于导航模块与消毒

模块相交面的形心位置， O_P 位于脉冲组件的中点位置。各坐标系初始姿态如图2(b)所示， x 轴指向机器人前进方向， z 轴方向是垂直向上， y 轴方向由右手法则确定， $\{R\}$ 、 $\{P\}$ 均与消毒模块固连，一同转动。 l_1 为 z_R 轴与 O_P 的距离， l_2 为消毒模块底面与 O_P 的距离， l_3 为移动底盘底面与消毒模块底面的距离。

$\{R\}$ 相对于 $\{B\}$ 的坐标变换矩阵为 ${}^B_R T(A)$ ，其计算式为：

$${}^B_R T(A) = e^{[V]A} {}^B_R T(0) \quad (1)$$

其中， A 为绕 z_R 轴的四元数角度坐标， V 为绕 z_R 轴的单位运动旋量坐标，其计算式为：

$$V = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \quad (2a)$$

$$A = (\lambda_0 \ \lambda_1 \ \lambda_2 \ \lambda_3)^T \quad (2b)$$

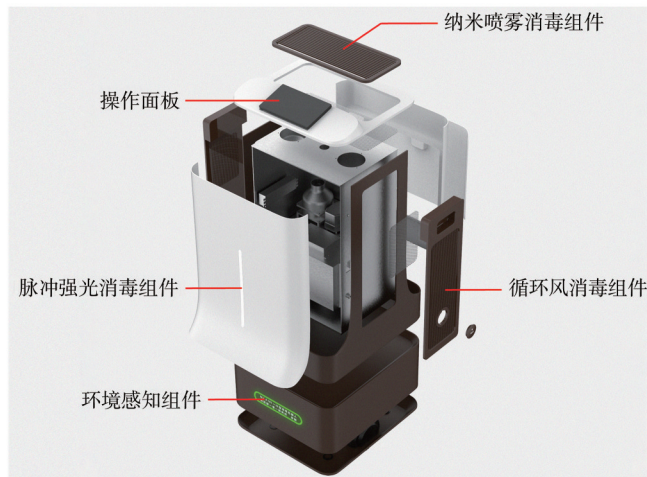
$$\lambda_0 = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right), \lambda_k = p_k \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), k=1,2,3 \quad (2c)$$

其中， $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为四元数坐标的4个元素，各元素与关节转角 θ 的关系如式(2c)所示。式(2c)中 k 可分别取值1、2、3，对应的 p_1, p_2, p_3 分别为单位长度转轴 p 在基坐标系 $\{B\}$ 各轴 x_B, y_B, z_B 的投影，由式(2c)可知，四元数的约束为三角函数取值的上下限约束，即 $[-1,1]$ 。在本文，转轴为 z_R ，在 $\{B\}$ 中的坐标为 $[0 \ 0 \ 1]^T$ ，因此 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$ 。 $e^{[V]A}$ 为旋量 V 的矩阵指数，其计算式为：

$$e^{[V]A} = \begin{bmatrix} 2\lambda_0^2 - 1 & -2\lambda_0\lambda_3 & 0 & 0 \\ 2\lambda_0\lambda_3 & 2\lambda_0^2 - 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$



(a) 机器人的重要模块



(b) 导航与消毒模块的重要组件

图1 消毒机器人结构及坐标系建立

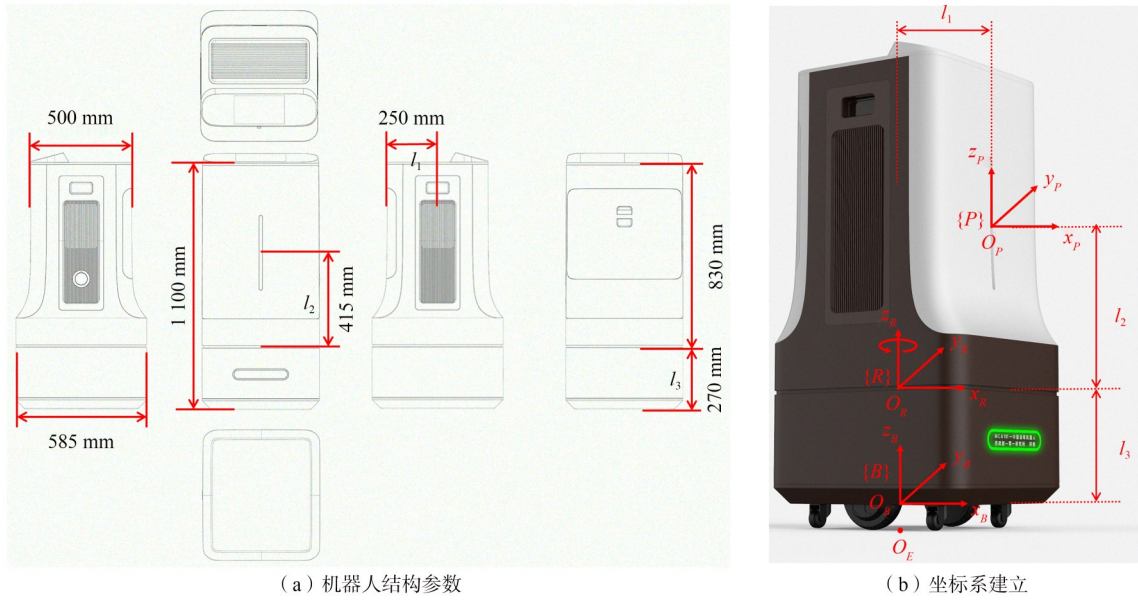


图2 消毒机器人结构参数及坐标系建立

${}^B_R\mathbf{T}(0)$ 为初始姿态时从 $\{R\}$ 到 $\{B\}$ 的坐标变换矩阵, 其计算式为:

$${}^B_R\mathbf{T}(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$\{P\}$ 相对于 $\{R\}$ 的坐标变换矩阵为 ${}^R_P\mathbf{T}$, 其计算式为:

$${}^R_P\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

由此可得, $\{P\}$ 相对于 $\{B\}$ 的坐标变换矩阵为 ${}^B_P\mathbf{T}(\mathbf{A})$, 其计算式为:

$${}^B_P\mathbf{T}(\mathbf{A}) = {}^B_R\mathbf{T}(\mathbf{A}) {}^R_P\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 2\lambda_0^2 - 1 & -2\lambda_0\lambda_3 & 0 & (2\lambda_0^2 - 1)l_1 \\ 2\lambda_0\lambda_3 & 2\lambda_0^2 - 1 & 0 & 2\lambda_0\lambda_3l_1 \\ 0 & 0 & 1 & l_2 + l_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式 (6) 即消毒机器人的运动学模型, 运动学模型构建了末端脉冲组件坐标系 $\{P\}$ 与基坐标系 $\{B\}$ 的数学关系, 运动学模型是建立误差模型的基础。

2 误差建模

在运动学分析的基础上, 建立消毒机器人的误差模型。通过数据采样和最小二乘法可以实现误差的辨识, 误差建模和辨识是精度补偿的前提

条件。

由式 (6) 可知, 引起定位误差的参数有 $\lambda_0, \lambda_3, l_1, l_2 + l_3$, 由于机器人没有可实现高度方向升降的自由度, 因此高度方向的参数 $l_2 + l_3$ 无法补偿, 此外, 四元数元素 λ_0, λ_3 与绕 y_R 的转角 θ 的关系如式 (7) 所示。

$$\lambda_0 = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right), \lambda_3 = \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (7)$$

由式 (7) 可知, λ_0 与 λ_3 存在耦合关系, 二者的数值都由 θ 决定。因此, 本文以 θ 和 l_1 为引起定位误差的参数, 即运动学参数, θ 为角度参数, l_1 为结构长度参数, 对其进行误差建模和辨识。

需要说明的是, 本文的定位误差是指末端脉冲组件坐标系 $\{P\}$ 相对于基坐标系 $\{B\}$ 的位置误差, 定位误差由机器人的运动学参数误差决定, 是机器人自身的误差, 而非由 SLAM、导航导致的运动误差。运动学参数误差有两个来源: 其一, 机器人零部件的加工和整机装配误差, 这导致机器人投入使用前即存在角度和结构长度误差; 其二, 机器人使用过程中由磕碰、磨损、变形导致的误差, 比如传动齿轮等的磨损将引起角度误差, 外形轮廓磕碰、变形等将引起结构长度误差, 角度和长度误差都将降低末端脉冲组件的定位精度, 进而影响消毒效果。

以 θ 和 l_1 为变量, ${}^B_P\mathbf{T}(\mathbf{A})$ 的微分变化量 (即误差矩阵) $d {}^B_P\mathbf{T}(\mathbf{A})$ 的计算式为:

$$\begin{aligned}
d_P^B T(A) &= \frac{\partial d_P^B T(A)}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial d_P^B T(A)}{\partial l_1} \Delta l_1 \\
&= \begin{bmatrix} -2\lambda_0 \lambda_3 & -(2\lambda_0^2 - 1) & 0 & -2\lambda_0 \lambda_3 l_1 \\ 2\lambda_0^2 - 1 & -2\lambda_0 \lambda_3 & 0 & (2\lambda_0^2 - 1) l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \Delta \theta + \\
&\quad \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 2\lambda_0^2 - 1 \\ 0 & 0 & 0 & 2\lambda_0 \lambda_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \Delta l_1
\end{aligned} \quad (8)$$

其中, $\Delta \theta$ 和 Δl_1 分别为 θ 和 l_1 的微小误差, 即本文的运动学参数误差。

$$\frac{\partial d_P^B T(A)}{\partial \theta} = {}^B_P T(A) G_\theta \quad (9a)$$

$$\frac{\partial d_P^B T(A)}{\partial l_1} = {}^B_P T(A) G_{l_1} \quad (9b)$$

其中, 系数矩阵 G_θ, G_{l_1} 的计算式如式 (10a) 和式 (10b) 所示。

$$G_\theta = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10a)$$

$$G_{l_1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10b)$$

则

$$\begin{aligned}
d_P^B T(A) &= {}^B_P T(A) (G_\theta \Delta \theta + G_{l_1} \Delta l_1) \\
&= {}^B_P T(A) \delta_P^B T(A)
\end{aligned} \quad (11)$$

其中, 微分算子 $\delta_P^B T(A)$ 为:

$$\begin{aligned}
\delta_P^B T(A) &= G_\theta \Delta \theta + G_{l_1} \Delta l_1 \\
&= \begin{bmatrix} 0 & -\Delta \theta & 0 & \Delta l_1 \\ \Delta \theta & 0 & 0 & l_1 \Delta \theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
\end{aligned} \quad (12)$$

式 (12) 反映了运动学参数误差 $\Delta \theta$ 和 Δl_1 引起的机器人末端位姿误差, 其中左上 3×3 反对称矩阵反映了姿态误差, 即 z_R 方向的角度误差 $\Delta \theta$, 第四列反映了位置误差, 亦称定位误差。

$$\Delta P = \begin{bmatrix} \Delta P_x \\ \Delta P_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta l_1 \\ l_1 \Delta \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ l_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta l_1 \end{bmatrix} = M \Delta p \quad (13)$$

式 (13) 即机器人的误差模型, 其中, ΔP 即 O_P 的定位误差向量, ΔP_x 和 ΔP_y 分别为 ΔP 在 x_B 轴

和 y_B 轴上的分量, $\Delta p = [\Delta \theta \quad \Delta l_1]^T$ 为运动学参数误差, 即需要辨识的误差参数, $M = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ l_1 & 0 \end{bmatrix}$ 为系数矩阵。由式 (13) 可推导出 Δp 的误差辨识模型。

3 误差辨识与精度补偿

由误差模型式 (13) 可推导出机器人的误差辨识模型。误差辨识模型以运动学参数误差 Δp 为未知量, 即待辨识参数; 以定位误差 ΔP 为已知量, 通过采样得到其数值。推导参数误差模型就是通过设计算法求得误差模型中的 Δp , 由于误差模型式 (13) 为线性模型, 即 ΔP 的表达式只含有 Δp 的一次项, 因此辨识算法采用最小二乘法。

划分机器人的运动区域并采样。分别对每个区域进行误差辨识与精度补偿, 保证机器人在全部运动区域的补偿效果。

由于定位误差对喷雾与循环风等范围性消毒装置的消毒效果影响不大, 而脉冲强光为指向性消毒装置, 需要确保消毒位置位于光路上, 对定位精度要求很高, 因此本文以脉冲组件坐标系 $\{P\}$ 为精度补偿对象, 即本文机器人的末端位置。

为保证运动方向的物体均在消毒范围内, $\{P\}$ 可由初始位置向左、向右各转动 90° , 以 30° 为一个区域, 将运动范围划分为 6 个, 如图 3 所示。

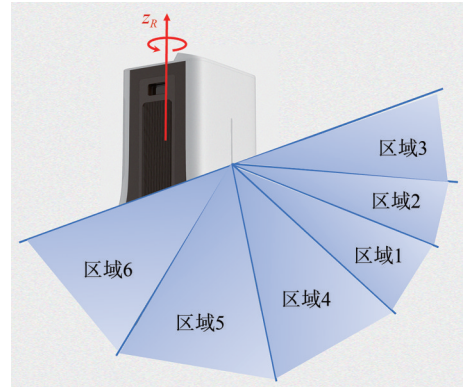


图3 消毒机器人误差辨识区域划分

对每个区域进行等角度间距采样, 每个区域采样点的数量为 5, 角度间距为 6° , 随着 z_R 轴的转动, 末端扫过各个区域, 将末端刚转动进入某个区域的角度作为机器人在该区域的起始姿态。由每个区域的起始姿态开始, 每间隔一个角度间距进行一次采样。以区域 1 为例, 采样点分别为 6° 、 12° 、 18° 、 24° 和 30° , 其他区域采样规则相同。均匀分

布采样点可以较好地补偿区域内所有位置的精度，如只在区域内的某一范围集中采样，则只对该集中采样的范围具有较好的补偿效果，范围外则难以保证。此外，对运动区域的划分越密集，每个区域的补偿效果越好，因此全局补偿效果也越好，但是密集的划分导致辨识和补偿的计算量和耗时增大，实时性变差。因此，辨识与补偿需要对补偿效果和实时性进行综合考虑。

对区域 i ($i=1,2,\dots,6$) 的 5 个采样点进行采样，每个采样点 j ($j=1,2,\dots,5$) 的误差模型为：

$$\Delta P_i^{(j)} = \begin{bmatrix} \Delta P_{ix}^{(j)} \\ \Delta P_{iy}^{(j)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta l_{1i} \\ l_1 \Delta \theta_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ l_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta l_{1i} \end{bmatrix} = M \Delta p_i \quad (14)$$

联立 5 个采样点的误差模型，区域 i 的误差模型如式 (15a) 所示，该式可简写为式 (15b)。

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i^{(1)} \\ \Delta P_i^{(2)} \\ \vdots \\ \Delta P_i^{(5)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M \\ M \\ \vdots \\ M \end{bmatrix} \Delta p_i \quad (15a)$$

$$\Delta Q_i = N \Delta p_i \quad (15b)$$

其中， ΔQ_i 为 5 个采样点的误差数据， N 为 M 组成的系数矩阵， Δp_i 为待辨识的运动学参数误差，采用最小二乘法对 Δp_i 进行辨识。

$$\Delta p_i = (N^T N)^{-1} N^T \Delta Q_i \quad (16)$$

式 (16) 即基于最小二乘法的误差辨识模型，可求解得到运动学误差参数 Δp_i ，从而实现消毒机器人的运动学参数标定。

实现运动学标定后，即可对消毒机器人的末端位置进行精度补偿，以提高定位精度。由式 (13) 可知，运动学误差参数 Δp_i 会引起末端定位误差 $\Delta P_i^{(j)}$ ，将 $\Delta P_i^{(j)}$ 补偿到 O_P 的原位置 q_i (即 O_P 的真实值，补偿前的位置)，可得到补偿后的位置 q_{ci} ，控制机器人运动到 q_{ci} ，即可实现区域 i 的精度补偿。精度补偿模型如式 (17a) 所示，展开式如式 (17b) 所示。

$$q_{ci} = q_i + M \Delta p_i \quad (17a)$$

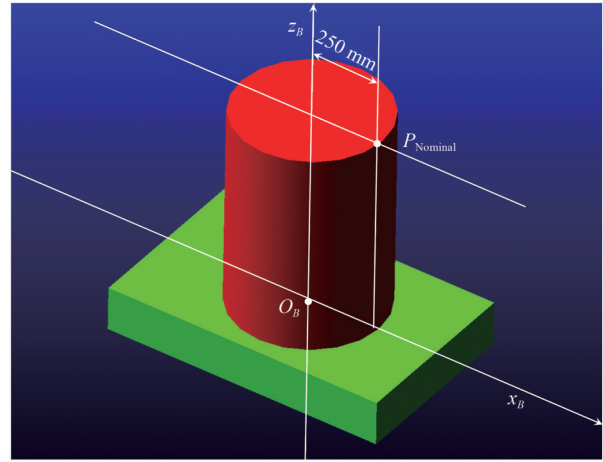
$$\begin{bmatrix} q_{cix} \\ q_{ciy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{ix} \\ q_{iy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta l_{1i} \\ l_1 \Delta \theta_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{ix} + \Delta l_{1i} \\ q_{iy} + l_1 \Delta \theta_i \end{bmatrix} \quad (17b)$$

其中， q_{cix} 、 q_{ciy} 分别为 q_{ci} 在 x_B, y_B 方向的坐标， q_{ix} 、 q_{iy} 分别为 q_i 在 x_B, y_B 方向的坐标， Δl_{1i} 与 $l_1 \Delta \theta_i$ 分别为 q_{ix} 与 q_{iy} 的补偿量。通过对消毒机器人进行精度补偿，可以大幅提高定位精度，从而提高脉冲消毒效果。

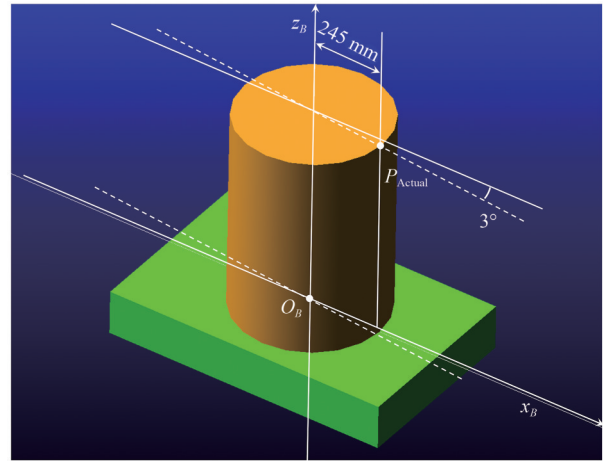
4 数值仿真

为验证本文运动学标定与精度补偿方法的正确性，设计运动学实验，利用 Adams 软件进行仿真。

由式 (13) 可知，消毒机器人的定位误差 ΔP 由长度误差 Δl_1 与角度误差 $\Delta \theta$ 引起，误差即参数的标称值与实际值之差，换言之， Δl_1 和 $\Delta \theta$ 的标称值与实际值的误差引起了 ΔP 的标称值与实际值的误差。机器人处于初始位置时，Adams 仿真实验分别设置 l_1 与 θ 的标称值为 250 mm 与 0° ，实际值为 245 mm 与 -3° (转动以图 3 z_R 轴方向为正，即垂直向上)，如图 4 所示。



(a) 标称值 P_{Nominal} 的设置



(b) 实际值 P_{Actual} 的设置

图4 Adams 仿真实验测量点标称值 P_{Nominal} 与实际值 P_{Actual} 的设置

运动学参数 l_1, θ 的标称值与实际值对应了测量点 P 的标称值 P_{Nominal} 与实际值 P_{Actual} 。 P_{Nominal} 与 z_B 轴的距离为 250 mm， P_{Nominal} 与 z_B 轴的垂线平行于 x_B 轴。 P_{Actual} 与 z_B 轴的距离为 245 mm， P_{Actual} 指向

z_B 轴的垂线与 x_B 轴的夹角为 3° 。

实验的目的是采集末端脉冲组件位置坐标 O_P 的定位误差 ΔP ，即 O_P 的标称值 P_{Nominal} 与实际值 P_{Actual} 之差，因此需要设计实验得到 P_{Nominal} 和 P_{Actual} 。仿真实验设计如下：机器人分别顺时针和逆时针转动 90° ，设置两次转动的转动速率均为 $1^\circ/\text{s}$ ，步数均为180，即每间隔0.5 s对末端位置 O_P 进行一次数据采集。由此可以得到 O_P 的标称值 P_{Nominal} 与实际值 P_{Actual} ， P_{Nominal} 与 P_{Actual} 分别采用 l_1, θ 的标称值与实际值，通过仿真实验采样得到， P_{Actual} 即补偿前的位置 q_i 。定位误差 ΔP 为：

$$\Delta P = P_{\text{Nominal}} - P_{\text{Actual}} = P_{\text{Nominal}} - q_i \quad (18)$$

需要说明的是，在实物实验中，实际值通过测量方法得到，一般可采用激光跟踪仪进行测量，确保数据精准可靠。首先，将跟踪仪的靶球分别放置于底盘底面的4个顶点，测量得到其位置参数，通过基坐标位置 O_B 与各顶点的结构关系可计算得到 O_B 的数值。其次，将靶球置于 O_P 点测量得到其位

置数据。最后，通过坐标变换计算得到 O_P 相对于 O_B 的位置，即 O_P 的实际值。

由仿真实验采样得到 P_{Nominal} 与 P_{Actual} 的数据，见表1~表3。

其中， $P_{x \text{ Nominal}}, P_{y \text{ Nominal}}$ 与 $P_{x \text{ Actual}}, P_{y \text{ Actual}}$ 分别为 P_{Nominal} 与 P_{Actual} 在 x_B 与 y_B 方向的坐标值。基于仿真实验数据对机器人进行运动学标定和精度补偿。

首先，由式(15b)计算得到各区域的定位误差 ΔQ_i ；然后，由式(16)辨识得到运动学误差参数 Δp_i ，辨识结果见表4；最后，由式(17a)对机器人脉冲组件的位置进行补偿，得到补偿后的位置 q_{ci} ，在 x_B 与 y_B 方向的坐标分别为 q_{cix} 与 q_{ciy} ，见表1~表3。

为量化评价补偿效果，对补偿前的定位误差 ΔP 与补偿后的定位误差 ΔP_c 进行比较， ΔP_c 的计算式为：

$$\Delta P_c = P_{\text{Nominal}} - q_{ci} \quad (19)$$

ΔP_c 在 x_B 与 y_B 方向的坐标分别为 ΔP_{cx} 与 ΔP_{cy} 。补偿前后的定位误差 ΔP 与 ΔP_c 见表1~表3。补偿前后的定位误差分布见图5。

表1 区域1与区域2采样所得位置、补偿后位置与补偿前后定位误差

角度	标称值 $P_{\text{Nominal}}/\text{mm}$		实际值 $P_{\text{Actual}}/\text{mm}$		补偿后的位置 q_{ci}/mm		补偿前的定位误差 $\Delta P/\text{mm}$		补偿后的定位误差 $\Delta P_c/\text{mm}$		
	$P_{x \text{ Nominal}}$	$P_{y \text{ Nominal}}$	$P_{x \text{ Actual}}$	$P_{y \text{ Actual}}$	q_{cix}	q_{ciy}	ΔP_x	ΔP_y	ΔP_{cx}	ΔP_{cy}	
区域1	6°	248.631	26.132	244.664	12.822	245.764	25.948	3.966	13.310	2.866	0.184
	12°	244.537	51.978	241.984	38.326	243.084	51.452	2.553	13.651	1.453	0.526
	18°	237.764	77.254	236.652	63.411	237.752	76.536	1.112	13.844	0.012	0.718
	24°	228.386	101.684	228.727	87.800	229.827	100.926	-0.341	13.884	-1.441	0.759
	30°	216.506	125.000	218.297	111.228	219.397	124.353	-1.790	13.772	-2.890	0.647
区域2	36°	202.254	146.946	205.474	133.437	199.581	145.844	-3.220	13.510	2.673	1.102
	42°	185.786	167.283	190.401	154.184	184.507	166.591	-4.615	13.099	1.279	0.691
	48°	167.283	185.786	173.241	173.241	167.348	185.649	-5.959	12.545	-0.065	0.137
	54°	146.946	202.254	154.184	190.401	148.290	202.809	-7.237	11.853	-1.344	-0.554
	60°	125.000	216.506	133.437	205.474	127.543	217.882	-8.437	11.032	-2.543	-1.376

表2 区域3与区域4采样所得位置、补偿后位置与补偿前后定位误差

角度	标称值 $P_{\text{Nominal}}/\text{mm}$		实际值 $P_{\text{Actual}}/\text{mm}$		补偿后的位置 q_{ci}/mm		补偿前的定位误差 $\Delta P/\text{mm}$		补偿后的定位误差 $\Delta P_{\epsilon}/\text{mm}$		
	$P_{x\text{Nominal}}$	$P_{y\text{Nominal}}$	$P_{x\text{Actual}}$	$P_{y\text{Actual}}$	q_{cix}	q_{ciy}	ΔP_x	ΔP_y	ΔP_{cx}	ΔP_{cy}	
区域3	66°	101.684	228.386	111.228	218.297	99.920	226.096	-9.544	10.090	1.764	2.291
	72°	77.254	237.764	87.800	228.727	76.492	236.526	-10.546	9.037	0.762	1.238
	78°	51.978	244.537	63.411	236.652	52.103	244.451	-11.433	7.885	-0.125	0.086
	84°	26.132	248.631	38.326	241.984	27.019	249.783	-12.194	6.647	-0.887	-1.152
	90°	0.000	250.000	12.822	244.664	1.515	252.463	-12.822	5.336	-1.515	-2.463
区域4	-6°	248.631	-26.132	241.984	-38.326	250.922	-27.896	6.647	12.194	-2.291	1.764
	-12°	244.537	-51.978	236.652	-63.411	245.590	-52.980	7.885	11.433	-1.053	1.002
	-18°	237.764	-77.254	228.727	-87.800	237.665	-77.370	9.037	10.546	0.099	0.115
	-24°	228.386	-101.684	218.297	-111.228	227.235	-100.797	10.090	9.544	1.152	-0.887
	-30°	216.506	-125.000	205.474	-133.437	214.412	-123.006	11.032	8.437	2.094	-1.994

表3 区域5与区域6采样所得位置、补偿后位置与补偿前后定位误差

角度	标称值 $P_{\text{Nominal}}/\text{mm}$		实际值 $P_{\text{Actual}}/\text{mm}$		补偿后的位置 q_{ci}/mm		补偿前的定位误差 $\Delta P/\text{mm}$		补偿后的定位误差 $\Delta P_c/\text{mm}$		
	$P_{x \text{ Nominal}}$	$P_{y \text{ Nominal}}$	$P_{x \text{ Actual}}$	$P_{y \text{ Actual}}$	q_{cix}	q_{ciy}	ΔP_x	ΔP_y	ΔP_{cx}	ΔP_{cy}	
区域5	-36°	202.254	-146.946	190.401	-154.184	203.357	-149.619	11.853	7.237	-1.103	2.673
	-42°	185.786	-167.283	173.241	-173.241	186.197	-168.677	12.545	5.959	-0.411	1.394
	-48°	167.283	-185.786	154.184	-190.401	167.139	-185.837	13.099	4.615	0.143	0.050
	-54°	146.946	-202.254	133.437	-205.474	146.393	-200.910	13.510	3.220	0.554	-1.344
	-60°	125.000	-216.506	111.228	-218.297	124.184	-213.732	13.772	1.790	0.816	-2.774
区域6	-66°	101.684	-228.386	87.800	-228.727	101.302	-231.253	13.884	0.341	0.382	2.866
	-72°	77.254	-237.764	63.411	-236.652	76.913	-239.177	13.844	-1.112	0.341	1.413
	-78°	51.978	-244.537	38.326	-241.984	51.829	-244.509	13.651	-2.553	0.149	-0.028
	-84°	26.132	-248.631	12.822	-244.664	26.325	-247.190	13.310	-3.966	-0.192	-1.441
	-90°	0.000	-250.000	-12.822	-244.664	0.680	-247.190	12.822	-5.336	-0.680	-2.810

表4 辨识所得运动学误差参数

运动学误差参数	区域1	区域2	区域3	区域4	区域5	区域6
$\Delta\theta/\text{rad}$	0.055	0.050	0.031	0.042	0.018	-0.010
$\Delta l_1/\text{mm}$	1.100	-5.893	-11.308	8.938	12.956	13.502

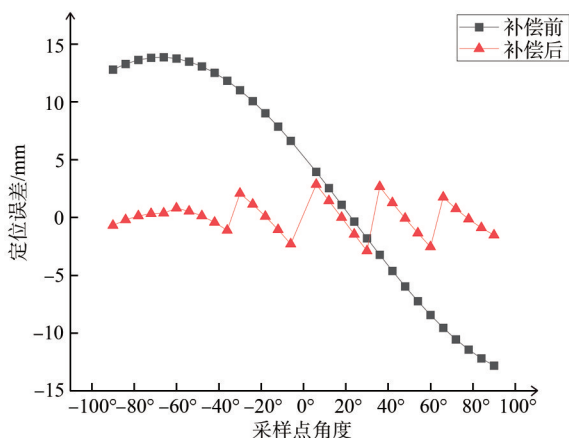
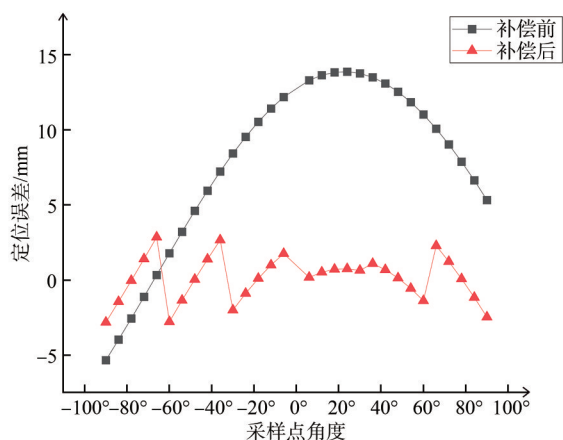
(a) 补偿前后 x_B 方向的误差分布(b) 补偿前后 y_B 方向的误差分布

图5 补偿前后定位误差分布

机器人经过标定和补偿后, x_B 方向的定位误差由-12.822~13.884 mm 提升至-2.890~2.866 mm, y_B

方向的定位误差由-5.336~13.884 mm 提升至-2.810~2.866 mm。本文的运动学标定与精度补偿方法可以大幅提升消毒机器人的定位精度, 进而提高细菌的杀灭率, 保障医院、殡仪馆等致病性微生物聚集场所内人员的健康和安全。

5 结论

本文提出了一种面向具身智能的消毒机器人运动学标定与精度补偿方法。首先, 基于旋量理论提出了一种运动学建模和误差建模方法, 模型以角度参数 θ 和长度参数 l_1 为运动学参数。较少的运动学参数简化了模型表达式, 便于其推导计算。四元数坐标避免了三角函数运算, 进一步降低了计算成本。其次, 对机器人的运动区域和末端采样点进行了规划, 将运动区域等分为6个, 每个区间包含5个等间距的采样点, 保证了精度补偿效果和实时性。再次, 基于最小二乘法提出了误差辨识模型, 通过采样数据辨识得到了各区域的运动学参数误差。最后, 将运动学参数误差引起的定位误差补偿至末端位置的实际值, 实现了精度补偿, 补偿后 x_B 方向的定位误差由-12.822~13.884 mm 提升至-2.890~2.866 mm, y_B 方向的定位误差由-5.336~13.884 mm 提升至-2.810~2.866 mm。本文的运动学标定与精度补偿方法可以在保证实时性的同时大幅提高机器人末端的定位精度, 有助于提升具身智能水平, 为提高病菌灭杀率奠定了理论基础, 也为消毒场所和群众的卫生和健康提供了有力保障。

在本文的研究基础上, 未来的工作分为两个方向。其一, 改进消毒机器人的机械结构, 将靶球等测量装置嵌入式安装至末端执行器, 在此硬件基础上实现实时在线补偿。其二, 将本文的标定补偿方

法扩展应用于其他机器人，如机械臂、爬行、人形、水下机器人等，以及加工或测量装置，如数控机床、激光跟踪仪等。

参考文献：

- [1] 周雪媚, 付慧群, 姜思朋, 等. 某大型殡仪馆消毒卫生现状及干预措施效果评价[J]. 中国消毒学杂志, 2016, 33(9): 827-829.
ZHOU X M, FU H Q, JIANG S P, et al. Survey on status of disinfection and the effect of intervention in a large funeral home[J]. Chinese Journal of Disinfection, 2016, 33(9): 827-829.
- [2] 张雪花, 许雅玲, 潘俊蓉, 等. 129所医院消毒供应中心实施信息化质量追溯现状[J]. 护理研究, 2024, 38(15): 2787-2791.
ZHANG X H, XU Y L, PAN J R, et al. Traceability of information quality in central sterile supply centers of 129 hospitals[J]. Chinese Nursing Research, 2024, 38(15): 2787-2791.
- [3] 严健. 一种可用于消毒的移动机器人设计[J]. 现代信息科技, 2022, 6(7): 156-158, 162.
YAN J. Design of a mobile robot that can be used for disinfection[J]. Modern Information Technology, 2022, 6(7): 156-158, 162.
- [4] VARAKANTHAM P, AN B, LOW B, et al. Artificial intelligence research in Singapore: assisting the development of a smart nation[J]. AI Magazine, 2017, 38(3): 102-105.
- [5] 王栋, 张军, 邹看看. 基于ROS的自主导航消毒服务机器人研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2024, 40(4): 397-403.
WANG D, ZHANG J, ZOU K K. Research on autonomous navigation disinfection service robot based on ROS[J]. Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition), 2024, 40(4): 397-403.
- [6] RUAN K C, WU Z H, XU Q S. Smart cleaner: a new autonomous indoor disinfection robot for combating the COVID-19 pandemic[J]. Robotics, 2021, 10(3): 87.
- [7] 殷翔宇. 面向室内的智能防疫消杀机器人研制[D]. 南京: 南京农业大学, 2022.
YIN X Y. Development of indoor intelligent epidemic prevention disinfection and sterilization robot[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2022.
- [8] 沈甜雨, 李志伟, 范丽丽, 等. 具身智能驾驶: 概念、方法、现状与展望[J]. 智能科学与技术学报, 2024, 6(1): 17-32.
SHEN T Y, LI Z W, FAN L L, et al. Embodied intelligent driving: concept, methods, the state of the art and beyond[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2024, 6(1): 17-32.
- [9] 苏震, 刘殿勇, 孙达智, 等. 基于路径参数一致的水下机器人编队与避障控制[J]. 智能科学与技术学报, 2022, 4(4): 533-541.
SU Z, LIU D Y, SUN D Z, et al. Path parameter consensus-based formation and obstacle avoidance control of autonomous underwater vehicles[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2022, 4(4): 533-541.
- [10] 杜广龙, 张平. 机器人运动学在线标定技术[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2016.
DU G L, ZHANG P. Online calibration technology for robot kinematics[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2016.
- [11] 温秀兰, 康传帅, 宋爱国, 等. 基于全位姿测量优化的机器人精度研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(7): 81-89.
WEN X L, KANG C S, SONG A G, et al. Study on robot accuracy based on full pose measurement and optimization[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(7): 81-89.
- [12] 班朝, 任国营, 王斌锐, 等. 融合加权SVD算法的工业机器人运动学标定[J]. 计量学报, 2021, 42(9): 1128-1135.
BAN Z, REN G Y, WANG B R, et al. Kinematics calibration of industrial robot fusing weighted SVD algorithm[J]. Acta Metrologica Sinica, 2021, 42(9): 1128-1135.
- [13] CHEN G, LI T, CHU M, et al. Review on kinematics calibration technology of serial robots[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014, 15(8): 1759-1774.
- [14] LEORO J, HSIAO T, BETANCOURT C. A new geometric subproblem to extend solvability of inverse kinematics based on screw theory for 6R robot manipulators[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2021, 19(1): 562-573.
- [15] SARIYILDIZ E, TEMELTAS H. Solution of inverse kinematic problem for serial robot using dual quaternions and Plücker coordinates[C]//Proceedings of the 2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Piscataway: IEEE Press, 2009: 338-343.
- [16] ÖZGÜR E, MEZOUAR Y. Kinematic modeling and control of a robot arm using unit dual quaternions[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2016, 77: 66-73.
- [17] YANG X L, WU H T, LI Y, et al. Computationally efficient inverse dynamics of a class of six-DOF parallel robots: dual quaternion approach[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2019, 94(1): 101-113.

[作者简介]



成军 (1989-), 男, 博士, 北京大学工学院博士后, 主要研究方向为机器人运动学与动力学分析、控制理论研究、标定与参数辨识方法等。



范伟龙 (1990-), 男, 中机科(北京)车辆检测工程研究院有限公司工程师, 主要研究方向为车辆结构设计、运动规划与控制等。



邵金燕 (1979-), 女, 博士, 北京大学工学院副研究员, 主要研究为移动机器人自主导航算法、避障算法、目标检测算法等。



周雪媚 (1975-), 女, 博士, 民政部一零一研究所研究员, 主要研究方向为殡葬行业消毒卫生防护、消毒机器人与殡葬设备研究等。