

DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2021.14.008

本文引用格式: 范海廷, 杜云刚. 基于激光 SLAM 的移动机器人导航算法研究[J]. 机床与液压, 2021, 49(14): 41-46.

FAN Haiting, DU Yungang. Research on navigation algorithm of mobile robot based on laser SLAM[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(14): 41-46.

## 基于激光 SLAM 的移动机器人导航算法研究

范海廷, 杜云刚

(内蒙古工业大学理学院, 内蒙古呼和浩特 010051)

**摘要:** 定位技术是机器人技术中导航控制和路径规划的关键问题, 传统定位方式采用全球定位系统 (GPS), 难以完成精准的定位导航功能, 不依赖于 GPS 的定位导航方法是目前机器人领域的研究热点。提出一种基于激光雷达采集的点云信息帧间匹配方法, 根据改进式激光点云数据的位姿估计算法, 结合非线性优化进行了校正和优化, 完成移动机器人对未知环境的精确定位。通过 ROS 机器人操作系统搭建实验平台, 对改进算法进行验证, 证明改进后帧间匹配算法的建图和定位效果对应的鲁棒性与定位精度效果更佳, 可满足工程要求。

**关键词:** 移动机器人; 机器人操作系统; 激光 SLAM; 自主导航

**中图分类号:** TP242

### Research on Navigation Algorithm of Mobile Robot Based on Laser SLAM

FAN Haiting, DU Yungang

(College of Science, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot Inner Mongolia 010051, China)

**Abstract:** Positioning technology is a key issue for navigation control and path planning in robotics. The traditional positioning method is based on the global positioning system (GPS), which is difficult to complete accurate positioning and navigation functions. Positioning and navigation method that do not rely on GPS is currently research hotpot in the field of robotics. A point cloud information frame matching method based on radar acquisition was proposed. According to the improved position and attitude estimation algorithm of laser point cloud data, it was corrected and optimized in combination with nonlinear optimization to complete the precise positioning of the mobile robot in the unknown environment. Through the ROS robot operating system, an experimental platform was established, the improved algorithm was verified. It is proved that the robustness and positioning accuracy of the improved inter-frame matching algorithm corresponding to the mapping and positioning effect are better, which can meet the engineering requirements.

**Keywords:** Mobile robot; Robot operating system; Laser SLAM; Autonomous navigation

#### 0 前言

基于同步定位与地图构建技术的移动机器人是指机器人在一个未知的环境从某一点开始移动, 在移动过程中根据位姿的估计和地图进行定位, 在定位的基础上构建增量式地图并进行路径规划, 从而实现移动机器人自主导航与定位。

机器人定位技术的发展开始于 20 世纪六十年代, 斯坦福大学研究所研制的自主移动机器人可以实现复杂环境下进行路径规划和控制<sup>[1]</sup>。1988 年清华大学研制的智能移动机器人——THMR-V 完成了传感器信息融合、路径规划仿真、基于地图信息的全局路径规划和基于感知信息的局部路径规划等多项重点技术。沈阳自动化研究所研发的自主水下机器人——北

极 ARV, 验证了我国研发的机器人在极端环境下的自导航能力; 同时该研究所采用激光导航方式研究的 AGV 自主小车实现了小车精确定位和安全避障等功能<sup>[2]</sup>。常用的定位建图方法如 LSD-SLAM, 它建立了一个大尺度直接单目 SLAM 的框架, 提出了一种用于直接估计关键帧之间相似变换和尺度感知的图像匹配算法, 在 CPU 上实现了半稠密场景的重建<sup>[3]</sup>。DTAM 是单目 VSLAM 系统, 是一种直接稠密的方法, 通过最小化全局空间规范能量函数来计算关键帧构建稠密深度图, 而相机的位姿则使用深度地图通过直接图像匹配来计算得到<sup>[4]</sup>。SVO (Semi-direct Visual Odoemtry) 是一种半直接法的视觉里程计, 它是特征点和直接法的混合使用, 根据关键点周围信息估计相机运动及位

收稿日期: (2021-03-18) China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划项目 (202010128001)

作者简介: 范海廷 (1998—), 男, 大学本科, 研究方向为机器人设计与制造、电子信息。E-mail: 1664782185@qq.com。

通信作者: 杜云刚 (1978—), 男, 副教授。E-mail: 449053321@qq.com。

置<sup>[5]</sup>。CNN-SLAM 在 LSD-SLAM 基础上将深度估计以及图像匹配改为基于卷积神经网络的方法，并且可以融合语义信息，得到了较鲁棒的效果<sup>[6]</sup>。该技术在机器人领域的应用有 2015 年美国的 iRobot 公司研制出的清洁机器人 Roomba980，可以实现精确的自身定位和导航，高效完成清洁任务<sup>[7]</sup>。

随着移动机器人的发展，SLAM 成为移动机器人的研究热点，也成为研究移动机器人的基础技术<sup>[8]</sup>。机器人是在未知的环境中移动，自身无法获取环境信息，需通过携带的激光雷达和视觉摄像机等传感器构建 SLAM 算法，完成地图构建从而实现自主定位。

本文作者通过对激光雷达成像原理和帧间匹配方法的分析，在 Linux 环境中 ROS 机器人操作系统上搭建的仿真环境展开了对激光 SLAM 移动机器人导航算法的研究，并使机器人在静态和动态仿真环境下实现路径规划。

### 1 激光雷达采集原理

三角测距激光雷达原理如图 1 所示。发射器发射激光，经过物体 (Object) 反射后被传感器 (Imager) 捕捉，捕捉点为  $X_2$ ，过焦点  $o$  作虚线平行于入射光线，交 Imager 于  $X_1$ ，由于  $\beta$  已知，可以得到  $X_1$  的位置，记  $X_1$ 、 $X_2$  之间的距离为  $x$ ，得出两个三角形相似：

$$\frac{q}{x_1} = \frac{s}{x} \tag{1}$$

$$\sin\beta = \frac{q}{d} \tag{2}$$

由公式 (1)、(2) 得到物体到激光发射器的距离  $d$  为

$$d = \frac{sx_1}{x\sin\beta} \tag{3}$$

此仿真实验采用 2D 激光雷达，通过旋转可以精确采集到周围障碍物的距离<sup>[9-10]</sup>。

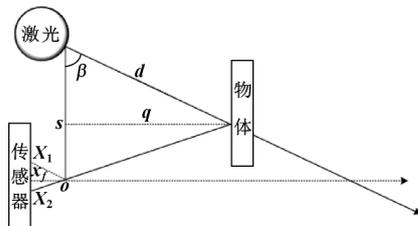


图 1 激光雷达三角测距原理

因为激光点云数据不是瞬时获得，当机器人的运动频率很高时，就会产生运动畸变。运动畸变的去除有纯估计法和里程计辅助法<sup>[11]</sup>，ICP 方法是纯估计法的变种，可以用数学描述为给定两个集合，如式 (4) 和 (5)，求解式中的  $R$  和  $t$ ，使得误差方程式

(6) 结果达到最小。

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_{N_x}\} \tag{4}$$

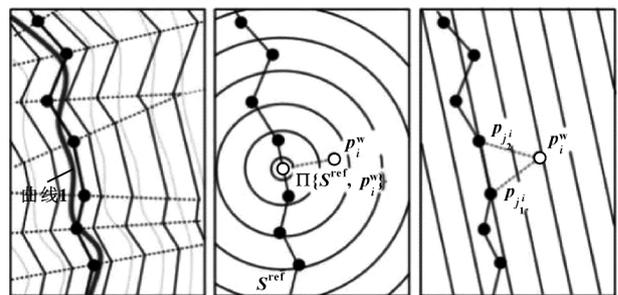
$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_{N_p}\} \tag{5}$$

$$E(R, t) = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \|x_i - Rp_i - t\|^2 \tag{6}$$

传感器辅助可以较准确地反映运动的情况，对局部的位姿估计精度也较高，其中包括惯性测量单元 (IMU) 和轮式里程计，但 IMU 线加速度的精度较差，文中的仿真实验中采用了带有轮速计的差速移动机器人矫正运动畸变。

### 2 激光帧间匹配方法

采用改进的帧间匹配方法 PL-ICP (是指点对线的 ICP 方法)，提出了采用分段线性的方法对实际曲面进行近似，用激光点到最近两点连线的距离来模拟激光点到曲面的距离，提升了算法的迭代速度和精度，降低了帧间匹配算法的误差<sup>[12]</sup>，如图 2 所示。



●代表t-1时刻的激光点 曲线1代表真实物体 ○代表t时刻的点

图 2 PL-ICP 示意

首先进行坐标系转换，将当前点云数据帧投影到参考帧坐标系，对当前帧的点  $i$  用最近邻法则在参考帧中找到最近的两个点 ( $j_1, j_2$ )，之后在计算误差的过程中去除误差过大的点，根据最小化误差函数求解旋转矩阵  $R$  和平移矩阵  $T$ <sup>[13-14]</sup>。

PL-ICP 的目标函数表达式为

$$\min_{q_{k+1}} \sum_i \{n_i^T [p_i \oplus q_{k+1} - \prod \{S^{ref}, p_i \oplus q_k\}]^2 \tag{7}$$

其中:  $n_i$  为法向量;  $\prod \{S^{ref}, p_i \oplus q_k\}$  为  $t$  时刻的参考帧;  $p_i \oplus q_{k+1}$  是  $k+1$  时刻经过  $R$  和  $T$  变化到  $t$  时刻的当前帧。

在估计器初始化后，采用基于滑动窗口的紧耦合激光雷达与 IMU 融合高精度鲁棒状态估计。滑动窗口中完整状态向量定义为

$$X = [x_0, x_1, \dots, x_n, x_c^b, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m] \tag{8}$$

$$x_k = [p_k^w, v_k^w, q_k^w, b_a, b_g], k \in [0, n]$$

$$x_c^b = [p_c^b, q_c^b]$$

其中:  $x_k$  表示捕获第  $k$  帧激光雷达的 IMU 状态，包含了 IMU 在世界坐标系中的位置、速度和方向，以

及在惯导 IMU 坐标系中的加速度计和陀螺仪的偏置;  $n$  表示关键帧的总数;  $m$  表示滑动窗口中的特征总数;  $\lambda_m$  表示第一次观测到的第  $m$  个特征的逆深度;  $x_c^b$  表示激光雷达到机器人本体坐标系下的空间坐标变换位姿关系。使用激光雷达惯导 BA 优化构建所有测量残差的先验和范数之和, 获得最大的后验估计为

$$\min_{\chi} \{ \|r_p - H_p \chi\|^2 + \sum_{k \in N^*} \|r_B(\hat{z}_{b_{k+1}}^b, \chi)\|_{p_{b_{k+1}}}^2 + \sum_{(l,j) \in C} \rho(\|r_C(\hat{z}_l^c, \chi)\|_{p_l}^2) \} \quad (9)$$

其中:  $r_B(\hat{z}_{b_{k+1}}^b, \chi)$  和  $r_C(\hat{z}_l^c, \chi)$  分别表示惯导 IMU 和激光雷达数据的测量残差;  $B$  表示 IMU 测量集合;  $C$  表示当前滑动窗口中至少观测到两次的一组特征。  $\{r_p - H_p \chi\}$  表示来自边缘化的先验信息。通过非线性优化结合 G2O 优化库求解上述最小二乘误差目标函数模型可以得到机器人的运动位姿变换矩阵关系。

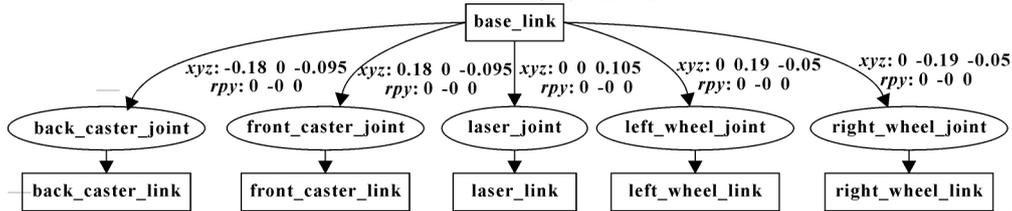


图 3 link-joint 连接

利用 Gazebo 机器人物理仿真平台搭建实验, 需要在机器人统一描述平台中加入机器人的 Gazebo 参数标签, 包括机器人的材料和物理惯性属性参数设定以及控制器模型插件的加载。机器人在 Gazebo 中的物理仿真平台如图 4 所示。机器人控制器采用了传统 PID 的控制器模型, 采用键盘控制程序节点发布 cmd\_vel 话题, 对应的控制器接收 cmd\_vel 指令, 并根据轮式计检测的当前机器人的速度和位姿信息进行误差闭环检测与控制, 完成精准的机器人运动控制。

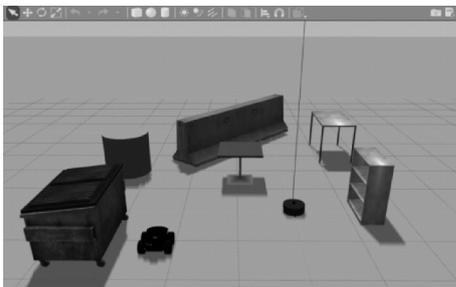


图 4 机器人 Gazebo 仿真环境

为仿真出真实的激光雷达点云数据, 实验采用型号为 rplidar 的 2D 激光雷达, 并设定传感器参数配置为: 360°检测范围、单圈 360 个检测点云数据、5.5 Hz 的采样频率和最远 10 m 的检测范围等。机器人的激光雷达点云数据采集并在 rviz 可视化平台进行显示

的实验如图 5 所示。

### 3 实验与分析

#### 3.1 实验环境搭建

文中的实验平台搭建和算法设计都是基于 Linux 环境下的 ROS 机器人操作系统所完成的, 同时在 ROS 机器人操作系统中集成了 Gazebo 物理仿真平台和 rviz 数据可视化平台。首先根据硬件机器人平台的组成, 搭建机器人统一描述平台 URDF 模型。为了方便控制, 作者设计了两轮差速式机器人移动平台。其中机器人的 URDF 统一描述平台中 link 之间是通过 joint 连接和组成的, 连接图位置姿态和连接关系如图 3 所示。link 标签描述了机器人某个刚体部分的外观和物理属性, 其中包括形状、颜色、尺寸、碰撞参数和惯性矩阵等数据。joint 标签则用于描述机器人关节的运动学和动力学属性, 包括了关节运动的速度和极限位置等参数。

机器人的整体工作环境进行仿真。图 6 是搭建的模拟驾驶道路仿真环境, 在道路上有行人、障碍物、路灯、消防栓、邮箱和垃圾桶等仿真物体, 并在道路周围添了树木, 更大化地模拟出机器人的工作环境。

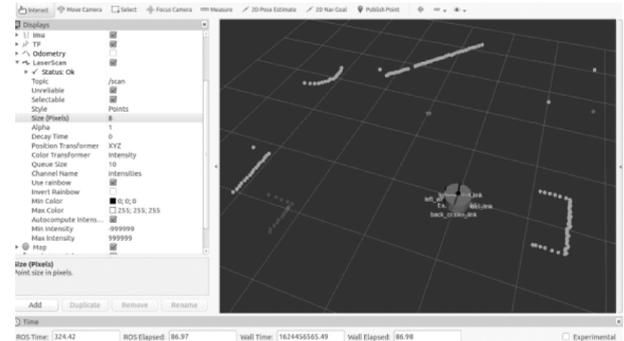


图 5 激光雷达点云数据采集

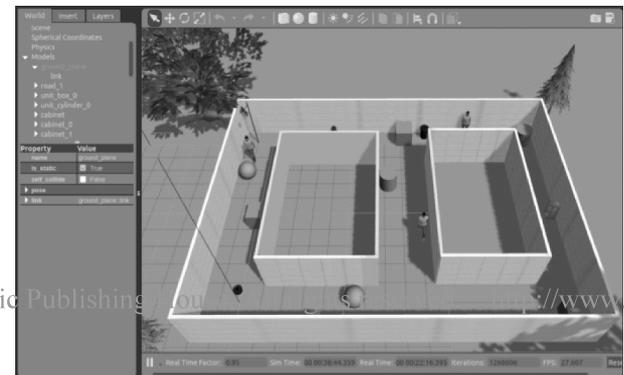
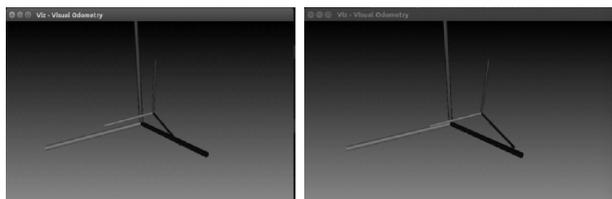


图 6 虚拟仿真环境

### 3.2 帧间匹配算法对比实验

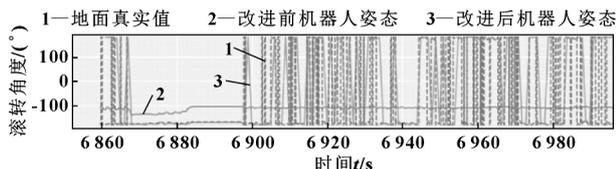
根据以上的实验理论分析，分别对改进前传统的帧间匹配 ICP 算法和改进后融合惯导数据的 PL-ICP 算法进行了实验对比和数据分析，并完成了激光雷达机器人帧间里程计的空间变换实验，并用变换坐标系表示如图 7 所示。



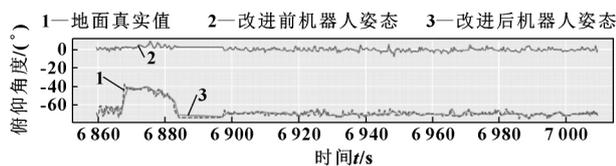
(a) 激光里程计起始坐标系 (b) 激光里程计运动后坐标系

图 7 激光里程计空间坐标显示

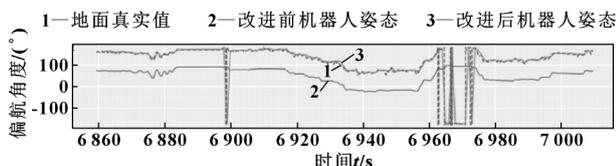
采用 TUM 的标准数据集进行对比，如图 8 所示，其中曲线 1 为地面真实值，曲线 2 表示改进之前传统的 ICP 算法求解的机器人位置姿态，曲线 3 表示改进后的帧间匹配算法求解的机器人姿态，可见改进后其姿态的稳定性和跟踪精度都接近于地面真实值并得到有效的精度提升。



(a) 滚转角姿态曲线



(b) 俯仰角姿态曲线



(c) 偏航角姿态曲线

图 8 改进前后与地面真实值的姿态曲线对比

同时分析了改进前后与地面真实的轨迹位姿误差：图 9 所示为传统帧间匹配算法轨迹误差，可以看出与地面真实轨迹间存在较大的误差；图 10 所示为改进后帧间匹配算法轨迹误差，图中虚线为参考轨迹，实线为真实轨迹，很明显轨迹精度更接近于地面真实值。

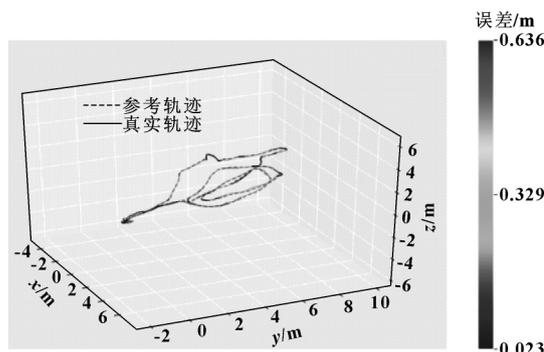


图 9 传统帧间匹配算法轨迹误差

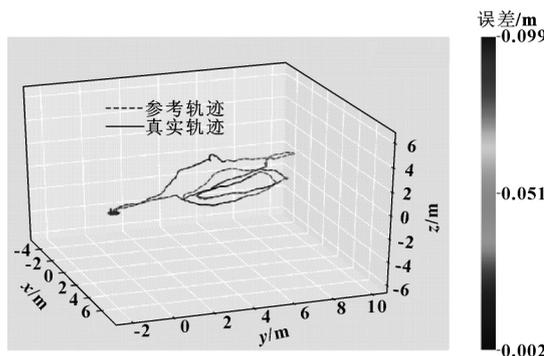


图 10 改进后帧间匹配算法轨迹误差

### 3.3 仿真环境的 SLAM 地图构建算法实现

实验采用了 cartographer 的 SLAM 算法，对激光雷达采集的数据根据改进的 ICP 迭代最近点算法进行帧间点云匹配求解位姿，然后通过后端图优化的方法进行局部和全局位姿优化，减少了位姿误差，并解决了定位不准确而导致 SLAM 构建的栅格地图发生畸变的问题。经过优化后，采用了词袋模型对构建的地图回环检测，最后对应用于导航和路径规划的栅格地图进行保存。最终构建的栅格地图和保存方法如图 11 所示。

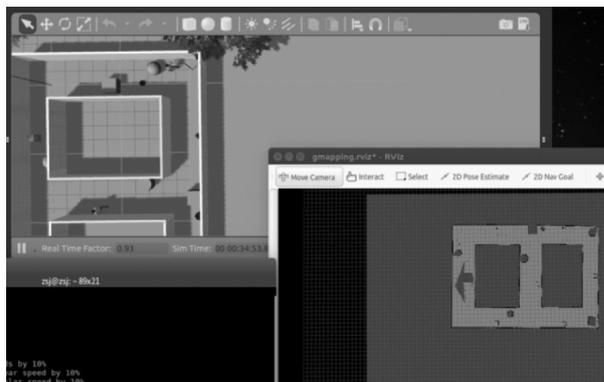


图 11 激光 SLAM 保存地图

### 3.4 静态环境障碍物的导航实现

ROS 操作系统中的代码工程架构, 可以分为操作系统层、中间层和应用层三部分。作者设计了应用层的部分程序, 按照功能包节点通信的方式进行数据通信和消息发布。

在静态路径规划实验中, 设计了全局路径规划算法, 根据设定的目标优化函数, 对周围的环境设定约束条件, 同时考虑了决策效率和决策质量问题, 根据计算分值选择最优的决策方法, 主要是根据给定的目标位置和全局地图进行总体的路径规划。在导航中,

使用了 Dijkstra 和 A\* 的基础模型进行全局路径的规划, 计算出机器人到达目标位置的最优路径, 作为机器人的全局路径。目前机器人的位置在地图的左上角, 在 rviz 中设定机器人的目标点为左下角, 中间的障碍物有行人、球体障碍物和箱体障碍物。根据创建的全局规划路径算法, 设定好目标点后, 机器人会根据自身位置和激光雷达检测的环境地图进行实时定位与运动控制, 直至到达目标点位置。图 12 所示为机器人在 rviz 可视化平台中从当前位置到目标点的路径规划与避障实验效果图。

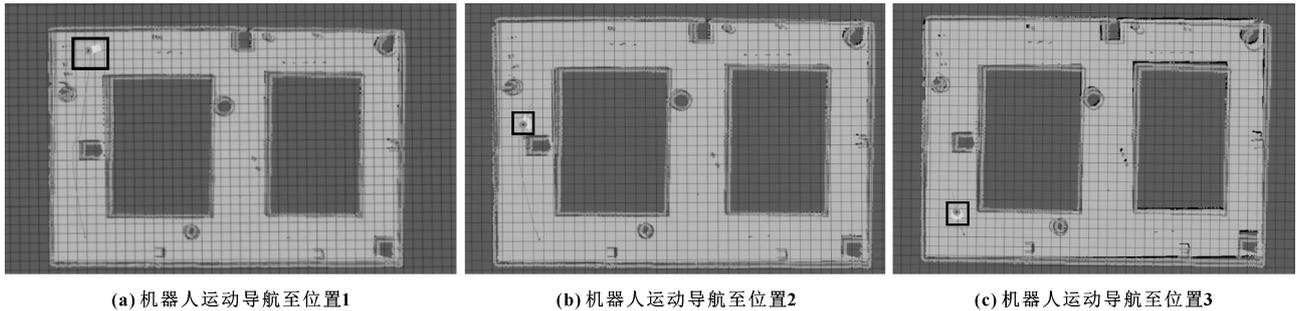


图 12 rviz 设定目标点与路径规划实验图

除了全局路径规划外, 作者还对局部地图的实时路径规划进行了算法验证。在实际情况下, 机器人通常需要针对当前的地图信息和机器人附近随时有可能出现的障碍物规划机器人每个周期内应该行驶的局部路径, 并且综合各个评价标准选取最优的路径。当机器人已经在全局路径规划的运行过程中时, 在 Gazebo 仿真环境中手动添加了障碍物, 添加障碍物后会重新规划局部路径, 并更新全局规划路径至目标点。当前机器人在仿真环境中的右下角, 设定目标定为中间道路的中部。全局路径规划完成后, 如图 13 所示, 在中间道路的下端加入正方体障碍物。如图 14 所示, 机器人的激光雷达实时检测到障碍物信息后更新栅格导航地图数据, 并重新规划局部路径策略, 成功控制机器人运动到设定的目标点。

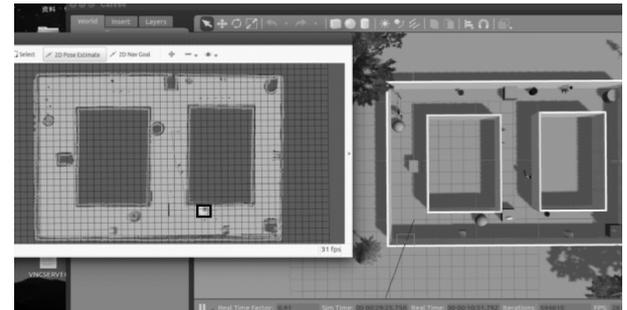


图 14 实时更新地图和局部决策路径实验图

根据改进后的算法构建了栅格地图, 与传统的帧间匹配算法构建的栅格地图对比分析可知, 对图 12 (a) (b) (c) 所示的 3 条路径分别用传统的定位导航方法和改进后的定位导航方法结合构建的地图进行重新定位, 并与地图真实位置进行误差分析。如表 1、表 2 和表 3 所示, 改进后的定位精度有大幅度的提升, 均方根误差在环境好的条件下最大提升了 93.09%, 平均误差最大处提升了 90.07%, 整个环境中的定位误差整体提高了大约 77%。在导航实验中定位精度的提升十分有利, 对机器人的环境探索、任务规划和自主避障都起到了至关重要的作用。

表 1 图 12 (a) 路径优化前后误差对比

项目	优化前/m	优化后/m	精度提升/%
均方根误差	7.743 2	0.826 6	89.32
平均误差	5.876 5	0.583 6	90.07
误差平方和	4.534 0	0.419 2	90.75
标准差	4.989 5	0.582 6	88.32

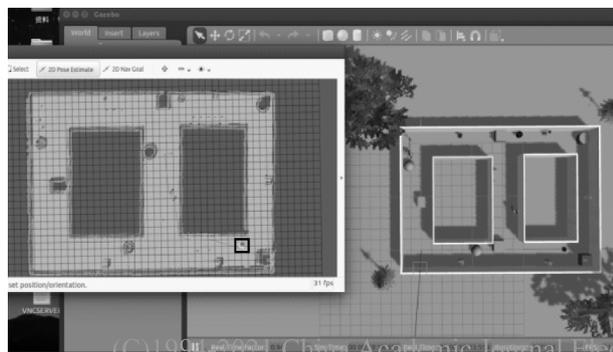


图 13 路径规划过程中加入障碍物实验图

表 2 图 12 (b) 路径优化前后误差对比

项目	优化前/m	优化后/m	精度提升/%
均方根误差	3.895 8	0.269 0	93.09
平均误差	1.684 5	0.241 6	85.66
误差平方和	0.357 1	0.225 9	36.75
标准差	3.509 5	0.118 2	96.63

表 3 图 12 (c) 路径优化前后误差对比

项目	优化前/m	优化后/m	精度提升/%
均方根误差	8.080 2	3.004 2	62.82
平均误差	5.455 8	1.918 7	64.83
误差平方和	2.782 8	0.990 2	64.42
标准差	5.949 9	2.306 5	61.23

#### 4 结论

本文作者利用 ROS 系统的 Gazebo 仿真出差速移动机器人,通过搭载的 2D 激光雷达传感器检测周围的仿真环境并采集障碍物信息。对激光雷达的帧间匹配算法进行改进得到 PL-ICP 算法,结合 IMU 传感器设计了紧耦合融合的最小二乘误差目标函数,并根据后端的非线性优化函数程序对前端改进后的帧间匹配算法进行优化。实验设计的仿真移动机器人完成了自主定位与建图,实验结果表明用改进后的帧间匹配算法求解的机器人姿态的稳定性和跟踪精度都接近于地面真实值,且在特殊动态环境下已经可以构建较好的栅格地图并应用于导航,构建的地图精度也有所提升,且稳定性更佳,定位误差整体提高大约 77%。未来发展希望将传感器模型标准化,前端匹配和后端优化模块化,并适用于多种传感器,减少算法计算量,测试距离和范围更广,可应用于室外环境的精确鲁棒的定位导航机器人系统。

#### 参考文献:

[1] 徐国保,尹怡欣,周美娟.智能移动机器人技术现状及展望[J].机器人技术与应用,2007(2):29-34.  
 [2] 李硕,曾俊宝,王越超.自治/遥控水下机器人北极冰下导航[J].机器人,2011,33(4):509-512.  
 LI S,ZENG J B,WANG Y C.Navigation under the arctic ice by autonomous & remotely operated underwater vehicle [J].Robot,2011,33(4):509-512.  
 [3] 周彦,旷鸿章,牟金震,等.面向半稠密三维重建的改进单目 ORB-SLAM[J].计算机工程与应用,2021,57(8):180-184.  
 ZHOU Y,KUANG H Z,MU J Z,et al.Improved monocular ORB-SLAM for semi-dense 3D reconstruction [J].Computer Engineering and Applications,2021,57(8):180-184.  
 [4] 徐晓苏,安仲帅.基于深度学习的室内动态场景下的 VS-SLAM 方法[J].中国惯性技术学报,2020,28(4):480-486.

XU X S,AN Z S.Vision SLAM method in indoor dynamic scene based on deep learning [J].Journal of Chinese Inertial Technology,2020,28(4):480-486.  
 [5] HE M,ZHU C Z,HUANG Q,et al.A review of monocular visual odometry [J].The Visual Computer,2020,36(5):1053-1065.  
 [6] TIAN G Z,LIU L,RI J,et al.Object fusion:an object detection and segmentation framework with RGB-D SLAM and convolutional neural networks [J].Neurocomputing,2019,345:3-14.  
 [7] 李洋.基于激光雷达的移动机器人导航系统研究与实现 [D].武汉:武汉理工大学,2018.  
 LI Y.Research and implementation of laser radar based mobile robot navigation system [D].Wuhan:Wuhan University of Technology,2018.  
 [8] CADENA C,CARLONE L,CARRILLO H,et al.Past,present and future of simultaneous localization and mapping: toward the robust-perception age [J].IEEE Transactions on Robotics,2016,32(6):1309-1332.  
 [9] LIAO M S,WANG D,YANG H.Deploy indoor 2D laser SLAM on a raspberry pi-based mobile robot [C]//Proceedings of 2019 11th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics.Hangzhou:IEEE,2019.  
 [10] 翁潇文,李迪,柳俊城.基于图优化的二维激光 SLAM 研究[J].自动化与仪表,2019,34(4):31-35.  
 WENG X W,LI D,LIU J C.Research on 2D laser-SLAM based on graph-based optimization [J].Automation & Instrumentation,2019,34(4):31-35.  
 [11] HOUBEN S,QUENZEL J,KROMBACH N,et al.Efficient multi-camera visual-inertial SLAM for micro aerial vehicles [C]//Proceedings of 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.Daejeon,Korea(South):IEEE,2016:1616-1622.  
 [12] KAWASAKI A,SAITO H,HARA K.Motion estimation for non-overlapping cameras by improvement of feature points matching based on urban 3D structure [C]//Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Image Processing.Quebec City,Canada:IEEE,2015:1230-1234.  
 [13] KAWASAKI A,HARA K,SAITO H.Line-based SLAM using non-overlapping cameras in an urban environment [J].IEICE Transactions on Information and Systems,2018,E101.D(5):1232-1242.  
 [14] 李慧慧,刘超,陶远.一种改进的 ICP 激光点云精确配准方法[J].激光杂志,2021,42(1):84-87.  
 LI H H,LIU C,TAO Y.A laser point cloud precise registration method with improved ICP [J].Laser Journal,2021,42(1):84-87.

(责任编辑:张艳君)

# 机床与液压

MACHINE TOOL & HYDRAULICS

ISSN1001-3881  
CN44-1259/TH

2021.14

半月刊 第49卷  
总第536期  
www.jcyyy.com.cn



中文核心期刊 中国科技期刊精品数据库收录期刊 中国科技论文统计源期刊 CODE JYEEV 1973年创刊  
主办：中国机械工程学会 广州机械科学研究院有限公司 协办：国家机器人检测与评定中心（广州）



机器人及关键零部件  
智能装备 智能工厂

密封 润滑 密封胶  
液压 光机电一体化

机器人检测  
汽车零部件检测  
油液与设备状态检测



## 让智能科技更好地为人类服务



机床与液压

2021 No.14 半月刊

第49卷 总第536期

二〇二一年七月下半月

# 机床与液压 JICHUANG YU YEYA

1973 年创刊

第 49 卷第 14 期 (总第 536 期) 2021 年 7 月  
半月刊 (每月 15 日、28 日出版)

www.jcyy.com.cn

主 管: 中国科学技术协会  
主 办: 中国机械工程学会  
广州机械科学研究院有限公司  
协 办: 国家机器人检测与评定中心(广州)  
编辑出版: 《机床与液压》编辑部  
地址: 广州市黄埔区茅岗路 828 号 (510700)  
编委会成员

主 任: 宋天虎  
副 主 任: 黄 兴 孔祥东 焦宗夏 姜继海  
孙立宁

委 员: (按姓氏笔划排序)  
丁问司 王军政 王太勇 卢文辉  
刘昕晖 刘晓初 刘延俊 刘奕华  
权 龙 阮 健 陈超志 陈章位  
李宝仁 李小宁 李运华 闵新和  
张宪民 张 涛 赵升吨 郝玉成  
施光林 高殿荣 袁锐波 韩俊伟  
冀 宏

主 编: 闵新和  
执行副主编: 张艳君  
编 辑: 张楠  
版面设计: 斯淑珍  
美术编辑: 陈雁琼  
电 话: 020 - 32385312

电子邮箱: jcy@gmeri.com  
广告发行部  
广告发行: 徐瑾瑾  
广告热线: 020 - 32385311  
发行热线: 020 - 32389676  
电子邮箱: adv@gmeri.com

发行范围: 国内外发行  
国内发行: 广东省报刊发行局  
订 购 处: 全国各地邮局  
国外发行: 中国国际图书贸易集团有限公司  
广告发布登记通知书: 440100190022  
印 刷: 广州一龙印刷有限公司

ISSN1001 - 3881 国内邮发代号: 46 - 40  
CN44 - 1259/TH 国外发行代号: BM 550  
定价: 20 元/期, 480 元/年

## 目 次

### ◀ 试验与研究 ▶

基于抗蛇行减振器动态模型的高速列车曲线通过性能研究  
..... 池长欣 梁树林 池茂儒 高红星 周业明 (1)

基于 AMESim - Simulink 联合仿真的直驱式容积控制系统  
模糊 PID 控制研究  
..... 王德文 衣超 李翠芬 姜继海 (7)

基于免疫萤火虫算法的轧制负荷分配研究  
..... 张瑞成 张冲 梁卫征 周亚罗 (13)

高速圆柱滚子轴承保持架动态性能影响因素分析  
..... 崔立 苏银 任德余 徐卫责 (17)

基于 SPH 方法的罐式贮箱动力响应及稳定性研究  
..... 曾宪君 黄志涛 邵家儒 刘牛 张月月 (24)

细长梁数控侧铣加工变形的预测、补偿与验证  
..... 张征 许小雷 孙鹏程  
苏军 汪志斌 张云龙 李军琪 (31)

切削参数对子午线轮胎模具侧板切削比能及表面粗糙  
度的影响研究  
..... 张杰翔 张伟 李志永  
闫方清 刘伊后 赵玉刚 (36)

基于激光 SLAM 的工业机器人导航算法研究  
..... 范海廷 杜云刚 (41)

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - TiCN 涂层硬质合金刀具干切削 N 型 HT250 灰铸  
铁表面粗糙度研究  
..... 林勇传 朱能熠 王凯 何春华 (47)

平稳工况下液压马达瞬时转速波动与液压系统效率关  
联性实验研究  
..... 刘永 谷立臣 邹春龙 (51)

本刊已入编“万方数据——数字化期刊群”,“中国核心期刊(遴选)数据库”,“中国期刊全文数据库(CJFD)”,“中文科技期刊数据库”及 CNKI 系列数据库,作者如不同意将文章入编,投稿时敬请说明。

氧化铝陶瓷的精密抛光性能研究  
..... 王卫芳 陆宝山 关集俱 (55)

盾构主减速机齿轮热疲劳分析  
..... 闫利鹏 (60)

液压凿岩机冲击性能的仿真与试验研究  
..... 刘智 李要芳 胡慧 刘俊 (66)

摆动油缸低温试验研究  
..... 张超 黄振东 严正红 (71)

基于 TRIZ 理论的涡轮增压器降噪方法  
..... 凌旭 刘敏 肖芝 黄守辉 (75)

岩溶发育区复合地层盾构刀具选型研究与应用  
..... 肖京 (80)

### ◀ 设计与开发 ▶

高频液力扭转冲击钻井提速工具设计与分析  
..... 赵建军 崔晓杰 曹海涛 赵晨熙 (84)

高黏度齿轮泵结构优化设计与仿真  
..... 吴少华 祝海林 唐鑫 (89)

小型混凝土泵车双泵分配液压系统参数匹配性  
分析 ..... 朱奇 周志红 李强 (95)

基于优化的金属打包箱体可靠性分析  
..... 何杰 郝志刚 艾文 林金才 (101)

基于元启发式算法的凸轮从动机构优化设计  
研究 ..... 李浩 刘志芳 严胜利 (105)

卧式加工中心接触式在机断刀检测功能开发与  
实现 ..... 彭梁锋 张晓毅  
字立敏 封光磊 余庆明 浦姣 (110)

飞机机轮轴承重负荷冲击加载系统的设计  
..... 邓伟林 陈国慧  
陆峰 牛祖军 张博强 (114)

二维泵试验台测控系统的研制  
..... 刘勇 路超  
朱登魁 陈浩 王红利 (119)

西门子数控机床自动化加工过程测头应用保护  
改进设计  
..... 罗兴华 朱志坤 朱绍维 (124)

锂离子铝壳模组智能纠偏焊接系统研究  
..... 张绚艳 盛青山 刘立新 (129)

MasterCAM 软件在铰接轴曲面加工中的应用  
..... 赵毅学 马学文 (133)

### ◀ 建模与仿真 ▶

波纹管机械密封多体多场热流固耦合性能分析  
..... 李宁 穆塔里夫·阿赫迈德 (137)

基于 Modelica 的潜液泵系统建模与仿真分析  
..... 徐永坤 陈立平 刘伟 朱江森 (142)

液相黏度对油气混输泵内气液两相分布规律的  
影响  
..... 王勇 史广泰 刘宗库 (148)

基于改进 PID 控制的柔性执行机构跟踪误差  
仿真  
..... 刘凯 韩训梅 林杭 (152)

导阀结构对先导式比例溢流阀稳定性的影响  
..... 肖前龙 (157)

风力发电机传动链连接螺栓强度分析  
..... 钟杰 李秀珍 吕杏梅 (161)

斜盘控制策略下液压系统位置控制及性能分析  
..... 王登峰 胡浩 (165)

高速永磁电机转子 - 轴承系统动力学特性分析  
..... 葛伟伟 孙维丽 马玉华 周淑芳 (169)

某型风力发电机组叶片的双向流 - 固耦合探究  
..... 王旭龙 辛志锋 王玉任 (173)

### ◀ 综述与分析 ▶

高效磨削用超硬磨料砂轮钎焊技术研究现状  
与发展  
..... 王增会 李奇林 丁凯 雷卫宁 (179)

### ◀ 故障诊断与可靠性 ▶

基于 DMD 和 t-SNE 的液压泵故障诊断  
..... 金林彩 叶杰凯  
张珍 汤小明 邵锡余 虞帅 (187)

基于振动时域特征的船用滚动轴承故障诊断方法  
..... 陈阳 李一  
姬正一 张胜光 雷博 (193)

信息 ..... (12)、(79)

---



---

# MACHINE TOOL & HYDRAULICS

Half – Monthly

Vol. 49 No. 14 Jul. 2021

---



---

**Authorities in Charge:** China Association for Science and Technology

**Sponsor:** Chinese Mechanical Engineering Society  
Guangzhou Mechanical Engineering  
Research Institute Co., Ltd.

**Co-organizer:** National Robot Test and Assessment  
Center (Guangzhou)

**Editor & Publisher:** Editorial Office of MACHINE  
TOOL & HYDRAULICS

**Add:** No. 828 Maogang Road, Huangpu District,  
Guangzhou, China

## Editorial Committee

**Chairman:** Song Tianhu

**Vice Chairmen:**

Huang Xing Kong Xiangdong Jiao Zongxia  
Jiang Jihai Sun Lining

**Members of Editorial Committee:**

Ding Wensi	Wang Junzheng	Wang Taiyong
Lu Wenhui	Liu Xinhui	Liu Xiaochu
Liu Yanjun	Liu Yihua	Quan Long
Ruan Jian	Chen Chaozhi	Chen Zhangwei
Li Baoren	Li Xiaoning	Li Yunhua
Min Xinhe	Zhang Xianmin	Zhang Tao
Zhao Shengdun	Hao Yucheng	Shi Guanglin
Gao Dianrong	Yuan Ruibo	Han Junwei
Ji Hong		

**Chief Editor:** Min Xinhe

**Vice Chief Editor:** Zhang Yanjun

**Editor:** Zhang Nan

**Layout Design:** Si Shuzhen

**Tel:** (8620) 32385312

**Web:** www.jcyyy.com.cn

**E-mail:** jcy@gmeri.com

**Distributed Range:** Distribution at home and abroad

**Domestic Distributor:** Newspapers and Publications  
Board of Guangdong

**Overseas Distributor:** China International Book Trading  
Corporation

**Post Distribution Code:** 46 – 40

**International Code:** BM 550

---



---

## CONTENTS

### TEST & RESEARCH

- Research on Curve Passing Performance of High – speed Train  
Based on Dynamic Model of Yaw Damper  
..... CHI Changxin LIANG Shulin  
CHI Maoru GAO Hongxing ZHOU Yeming ( 1)
- Research on Fuzzy PID Control of Direct Drive Volume Control  
System Based on AMESim – Simulink Co – simulation  
..... WANG Dewen YI Chao LI Cuifen JIANG Jihai ( 7)
- Research on Rolling Load Distribution Based on Immune Glowworm  
Swarm Optimization Algorithm  
..... ZHANG Ruicheng ZHANG Chong  
LIANG Weizheng ZHOU Yaluo ( 13)
- Analysis of Influencing Factors on Dynamic Performance of  
High Speed Cylindrical Roller Bearing Cage  
..... CUI Li SU Yin REN Deyu XU Weize ( 17)
- Dynamic Response and Stability Analysis of Storage Tank Based  
on SPH Method  
..... ZENG Xianjun HUANG Zhitao  
SHAO Jiaru LIU Niu ZHANG Yueyue ( 24)
- Research on Prediction , Compensation and Experiment for NC  
Peripheral Milling Deflections of Slender Beam  
..... ZHANG Zheng XU Xiaolei SUN Pengcheng  
SU Jun WANG Zhibin ZHANG Yunlong LI Junqi ( 31)
- Study on the Influence of Cutting Parameters on Specific Cutting  
Energy and Surface Roughness of Radial Tire Mould Side  
Plate  
..... ZHANG Jiexiang ZHANG Wei LI Zhiyong  
YAN Fangqing LIU Yanhou ZHAO Yugang ( 36)
- Research on Navigation Algorithm of Mobile Robot Based on  
Laser SLAM  
..... FAN Haiting DU Yungang ( 41)
- Study on Surface Roughness in Dry Cutting N – type HT250 Gray  
Cast Iron Using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – TiCN Carbide Alloy Coated Tool  
..... LIN Yongchuan ZHU Nengyi  
WANG Kai HE Chunhua ( 47)
- Relevant Experimental Study Between Hydraulic Motor Instantaneous  
Speed Fluctuation and Hydraulic System Efficiency  
..... LIU Yong GU Lichen ZOU Chunlong ( 51)
- Study on Precision Polishing Properties of Alumina Ceramics  
..... WANG Weifang LU Baoshan GUAN Jiju ( 55)
- Thermal Fatigue Analysis for Shield Main Reducer Gears  
..... YAN Lipeng ( 60)

Simulation and Experimental Study on Impact Performance of Hydraulic Rock Drill  
..... LIU Zhi LI Yaofang HU Hui LIU Jun (66)

Research on Low Temperature Test of Swing Cylinder  
..... ZHANG Chao  
HUANG Zhendong YAN Zhenghong (71)

Noise Reduction Method for Turbocharger Based on TRIZ Theory  
... LING Xu LIU Min XIAO Zhi HUANG Shouhui (75)

Research and Application of Shield Cutter Selection in Composite Stratum under Karst Development Area  
..... XIAO Jing (80)

### DESIGN & DEVELOPMENT

Design and Analysis of High Frequency Hydraulic Torsional Impact Drilling Acceleration Toll  
..... ZHAO Jianjun CUI Xiaojie  
CAO Haitao ZHAO Chenxi (84)

Structure Optimization Design and Simulation of High Viscosity Gear Pump  
..... WU Shaohua ZHU Hailin TANG Xin (89)

Matching Analysis of Small Concrete Pump Truck Double Pump Distribution Hydraulic System  
..... ZHU Qi ZHOU Zhihong LI Qiang (95)

Reliability Analysis of Metal Packing Case Based on Optimization  
..... HE Jie XI Zhigang AI Wen LIN Jincan (101)

Optimization Design of Cam Follower Mechanism Based on Meta-heuristic Algorithm  
..... LI Hao LIU Zhifang YAN Shengli (105)

Development and Realization of Contact On-machine Tool Broken Detection Function for Horizontal Machining Center  
..... PENG Liangfeng ZHANG Xiaoyi ZI Limin  
FENG Guanglei YU Qingming PU Jiao (110)

Design of Impact Loading System for Heavy Load of Aircraft Wheel Bearing  
..... DENG Weilin CHEN Guohui  
LU Feng NIU Zujun ZHANG Boqiang (114)

Design of Measurement and Control System for 2D Pump Test Bench  
..... LIU Yong LU Chao  
ZHU Dengkui CHEN Hao WANG Hongli (119)

Improved Design of Probe Application Protection for Siemens CNC Machine Tool Automatic Process  
..... LUO Xinghua ZHU Zhikun ZHU Shaowei (124)

Research on Intelligent Correction Welding System for Lithium Ion Aluminum Shell Module  
... ZHANG Xuanyan SHENG Qingshan LIU Lixin (129)

Application of MasterCAM Software in Surface Machining of Articulated Shaft  
..... ZHAO Yixue MA Xuewen (133)

### MODELING & SIMULATION

Analysis of Thermo-fluid-solid Coupling Performance on Multi-body and Multi-field of Bellows Mechanical Seal  
..... LI Ning Mutellip Ahmat (137)

Modeling and Simulation Analysis of Submersible Pump System Based on Modelica  
..... XU Yongkun CHEN Liping  
LIU Wei ZHU Jiansen (142)

Effect of Liquid Viscosity on Gas-liquid Two-phase Distribution in a Multiphase Pump  
..... WANG Yong SHI Guangtai LIU Zongku (148)

Tracking Error Simulation of Flexible Actuator Based on Improved PID Control  
..... LIU Kai HAN Xunmei LIN Hang (152)

Effects of Pilot Valve Structural Parameters on the Stability of Pilot Proportional Relief Valve  
..... XIAO Qianlong (157)

Strength Analysis of Connecting Bolt on Wind Turbine Drive Chain  
..... ZHONG Jie LI Xiuzhen LV Xingmei (161)

Position Control and Performance Analysis of Hydraulic Systems Under Swashplate Control Strategy  
..... WANG Dengfeng HU Hao (165)

Dynamic Analysis of Rotor-bearing System of High Speed Permanent Magnet Motor  
..... GE Weiwei  
SUN Weili MA Yuhua ZHOU Shufang (169)

Research on Bidirectional Fluid-structure Coupling of Wind Turbine Generator System Blades  
..... WANG Xulong XIN Zhifeng WANG Yuren (173)

### REVIEW & ANALYSIS

Research Atatus and Development of Brazing Technology of Superhard Abrasive Wheel for High Efficiency Grinding  
..... WANG Zenghui LI Qilin  
DING Kai LEI Weining (179)

### FAULT DIAGNOSIS & RELIABILITY

Fault Diagnosis of Hydraulic Pump Based on DMD and t-SNE  
..... JIN Lincan YE Jiekai ZHANG Zhen  
TANG Xiaoming SHAO Xiyu TUO Shuai (187)

Fault Diagnosis Method for Marine Rolling Bearings Based on Vibration Time Domain Characteristics  
..... CHEN Yang LI Yi  
JI Zhengyi ZHANG Shengguang LEI Bo (193)



46-40 | 46-57  
征订热线: 020-32389676

机床与液压

[www.jcyyy.com.cn](http://www.jcyyy.com.cn)

润滑与密封

[www.rhymf.com.cn](http://www.rhymf.com.cn)

ISSN1001-3881  
CN44-1259/TH

广告发布登记通知书: 440100190022 邮发代号: 46-40

定价: 20.00元

ISSN 1001-3881



9 771001 388213

14