

doi: 10.7690/bgzdh.2024.11.021

基于机器视觉的无人布雷车纯路径轨迹跟踪控制系统

岳光^{1,2}, 潘玉田², 任琳¹, 郭保全², 王雯¹

(1. 太原工业学院自动化系, 太原 030008; 2. 中北大学智能武器研究院, 太原 030051)

摘要: 针对有人驾驶布雷车操作误差大、效率低以及危险度高的问题, 提出基于机器视觉的无人布雷车纯路径轨迹跟踪控制系统。构建无人布雷车的控制系统构架; 提出机器视觉导航设计, 对布雷车的作业环境图像进行处理; 建立纯路径追踪数学模型及算法, 实现对无人布雷车布雷轨迹的控制跟踪轨迹。结果表明: 该控制系统可快速准确跟踪无人布雷车的轨迹, 提高无人布雷车的军事效果, 具有较重要工程价值, 为实现武器装备的智能化水平提供基础研究。

关键词: 无人布雷车; 机器视觉; 纯路径跟踪; 控制系统; 边缘检测

中图分类号: TP273; TH701 **文献标志码:** A

Pure Path Trajectory Tracking Control System of Unmanned Mine-laying Vehicle Based on Machine Vision

Yue Guang^{1,2}, Pan Yutian², Ren Lin¹, Guo Baoquan², Wang Wen¹

(1. Department of Automation, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008, China;

2. Institute of Intelligent Weapons, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the problems of big operation error, low efficiency and high risk of manned mine laying vehicle, a pure path tracking control system of unmanned mine laying vehicle based on machine vision is proposed. The control system architecture of the unmanned mine-laying vehicle is constructed; the design of machine vision navigation is proposed to process the operating environment images of the mine-laying vehicle; the mathematical model and algorithm of pure path tracking are established to realize the control and tracking of the mine-laying trajectory of the unmanned mine-laying vehicle. The results show that the control system can quickly and accurately track the trajectory of unmanned mine-laying vehicle, and improve the military effect of unmanned mine-laying vehicle, which has important engineering value and provides basic research for realizing the intelligent level of weapon equipment.

Keywords: unmanned mine-laying vehicle; machine vision; pure path tracking; control system; edge detection

0 引言

伴随我国经济、教育发展, 士兵素质大大提高, 但人口老龄化也随之出现^[1]。随着机器视觉、智能控制出现, 未来无人作战替代士兵短兵相接的作战趋势。当今现代化战争中无人作战起着重要作用, 尤其体现俄乌战场上^[2-3]。有人驾驶布雷车在布雷作业中, 士兵面临危险环境, 且易无法保持长时间精神高度集中, 降低布雷车效率, 增加漏布或误布^[4]。而无人布雷车能够使驾驶员脱离危险环境, 改善工作条件, 精确布雷, 减少误差^[5-6]。

目前, 国内外布雷车多为人工驾驶, 在无人布雷上研究鲜有, 因此, 提出基于机器视觉的无人布雷车纯路径轨迹跟踪控制系统。

1 无人布雷车轨迹行驶控制系统构架设计

1.1 行驶控制系统

无人驾驶布雷车主控系统硬件构架设由主控

制器、电源模块、时钟模块^[7-8]、图像信息数据接收模块、信息数据传输模块、通信模块组成。设计布雷的路径和跟踪实现智能化避障, 提升布雷效率。

1.2 纯路径跟踪行驶跟踪

1) 无人布雷车位置信息姿态。

位姿的获取由布雷车安装的多信息传感器采集车当前位置、姿态、运动等信息, 采用高精度定位定向姿态传感器, 精度在 1 cm+1 ppm 之内, 速度在 0.03 m/s 之内, 计算车的经纬度、行驶角、速度等, 通过算法计算预设行驶位置偏差; 由视觉导航算法, 计算控制位置与预设路径距离和行驶偏差。

2) GPS、北斗、伽利略模块。

笔者采用 3 大定位向结合的进行定位, 兼容 GPS、北斗、伽利略卫星等对行驶路径定位, 依据 RTK 得厘米级精度。

收稿日期: 2024-06-16; 修回日期: 2024-07-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51766011); 太原工业学院青年(后备)学科带头人资助项目(21020909);

山西省高等学校科技创新项目(2023L342)

第一作者: 岳光(1983—), 男, 河北人, 博士。

2 视觉纯路径跟踪数学模型及算法设计

2.1 布雷作业环境采集图像降噪

对布雷作业环境图像降噪，提出低通滤波法。图像跳变和噪声、边缘为高频分量，其他背景区域为低频分量，采取细节锐化，由傅里叶变换至低通滤波，再由傅里叶反变换得滤波后的布雷环境图像。

定义， $T(a, b)$ 为含噪声原始布雷环境图像 $f(x, y)$ 傅里叶变换， $D(a, b)$ 低通滤波器传递函数：

$$L(a, b)=D(a, b) \cdot T(a, b)。(1)$$

2.2 Sobel 边缘检测及图像分割

为节省机器视觉采集图像边缘检测像素计算量，提出 Sobel 边缘检测，该算法由方向和方向的梯度模板与选择像素模板进行卷积、运算。定义 X 为 Sobel 卷积模板水平方向矩阵， Y 为垂直方向矩阵， J 为布雷环境像素， LX 为水平梯度， LY 为垂直梯度，则分别对 2 个方向进行梯度运算：

$$LX=J * X。(2)$$

$$LY=J * Y。(3)$$

对布雷图像各像素 2 个方向的灰度值运算：

$$L=\sqrt{LX^2+LY^2}。(4)$$

2.3 布雷土地环境图像滤波处理

笔者采用在形态的滤波开操作，先对布雷土地图像腐蚀后膨胀，再闭操作先膨胀后腐蚀。

$$(f \oplus L)(X, Y)=\min\{f(X-m, Y-n)-L(-m, -n)\}。(5)$$

式中： $(f \oplus L)(X, Y)$ 为着灰度被腐蚀之后的图像； $f(X-m, Y-n)$ 为着原图像某像素点横纵坐标； $L(-m, -n)$ 为像素点梯度函数。对图像任一幅图像 $f(x, y)$ ，灰度膨胀为：

$$(f \oplus L)(X, Y)=\max\{f(x-m, y-n)+L(-m, -n)\}。(6)$$

2.4 无人驾驶布雷车横向和行驶航向偏差

笔者提出纯路径跟踪算法对预设路线跟踪，其横向偏差是偏离跟踪的路线距离，计算偏差大小、正负，以实现转向、转向量。“+”偏差为逆时针向转。计算点到直线间的距离求得横向偏差大小：

$$c=|Rx_0+Sy_0+T|/\sqrt{R^2+S^2}。(7)$$

行驶航向偏差为当前航向 α 和跟踪直线路径 β 间偏差， R 为 0， $\beta=90$ ； R 非 0， $\beta=\arctan(-S/R)$ 。

2.5 基于纯路径跟踪算法的预设路线跟踪

定义，无人驾驶布雷车坐标系为 xoy ， X_J 为目标点横坐标， Y_J 为纵坐标， ε 为行驶中转弯曲率，

逆时针转弯， $\varepsilon>0$ ，反之 $\varepsilon<0$ ； R 为转弯半径， e 为预设路径横向误差值，偏差“+”向逆时针转，偏差“-”向顺时针转， K_e 为前视距离， ω 为航向与目标点行驶方向偏差， φ 为方向角变化。

$$\left. \begin{aligned} X_J &= -1/\varepsilon + \cos\varphi/\varepsilon \\ Y_J &= -\sin\varphi/\varepsilon \end{aligned} \right\};(8)$$

$$X_J^2+Y_J^2=H_c^2。(9)$$

由式(8)-(9)：

$$\varepsilon=-2X_J/H_c；(10)$$

$$X_J=-c\cos\omega+\sqrt{K_e^2+c^2}\sin\omega；(11)$$

$$\varepsilon=2\frac{c\cos\omega-\sqrt{K_e^2+c^2}\sin\omega}{K_e^2}；(12)$$

$$\dot{\omega}=\varepsilon v=v\tan\theta/Z。(13)$$

式中： $\dot{\omega}$ 为行驶航向变化率； Z 为前后轴距； v 为行驶速度； θ 为目标转角。由此可得：

$$\theta=\arctan\frac{2zc\cos\omega-\sqrt{K_e^2+c^2}\sin\omega}{K_e^2}。(14)$$

3 实验结果与分析

为验证提出基于机器视觉的无人驾驶布雷车轨迹跟踪控制系统方法性能，进行仿真实验。搭建了无人驾驶布雷车系统，实验数据来自某型无人驾驶布雷车，验证本文中所提方法的正确性、可行性。

对路径跟踪效率，如图 1 所示，根据路径跟踪效率(%)对比，由路径跟踪效率(%)计算公式。

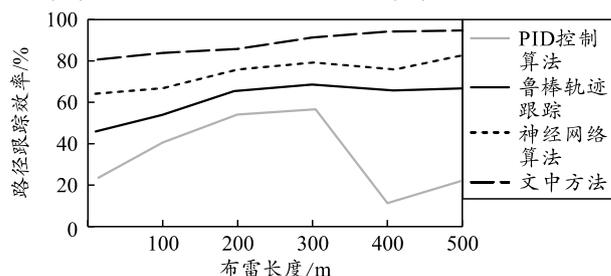


图 1 无人布雷车行驶路径跟踪效率对比

由上图可知：笔者提出方法在进行 500 m 的布雷长度时，跟踪效率高、波动较小。神经网络算法超过 300 m 时，效率低，波动大；鲁棒控制在超 300 m 时，跟踪效率低；PID 算法跟踪效率低、波动较大。

由图 2 可知，笔者提出方法行驶航向偏差最小，无人布雷时，机器视觉和纯路径跟踪算法运算，加快作业速度，减小航向偏差；PID 算法在长距离和复杂环境下，误差和偏差大；神经网络算法总体误差大；鲁棒控制虽波动相对小，但偏差大。

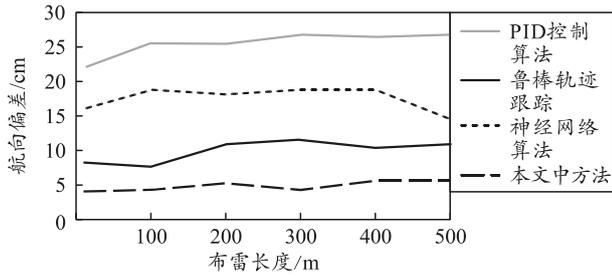


图 2 无人布雷车行驶路径跟踪偏差对比

4 结论

笔者提出的无人布雷车纯路径轨迹跟踪，无人布雷作业行驶效率高，误差低，大大提升响应速度，解决传统有人布雷车高强度、布雷紧张中常出现迟钝现象，为实现武器装备智能化水平提供基础研究。

参考文献：

[1] 穆巍炜, 何滨兵, 齐尧, 等. 基于环形阵列的地面无人装备集群通信干扰抑制[J]. 兵工学报, 2023, 44(5): 1414-1421.

[2] LI S, ZOU H, SHI D, et al. Event-Triggered Moving Horizon Pose Estimation for Spacecraft Systems[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2022, 31(4): 382-390.

[3] 胡宇辉, 王旭, 胡家铭, 等. 越野环境下无人驾驶车辆技术研究综述[J]. 北京理工大学学报, 2021, 41(11): 1137-1144.

[4] 黄金斗, 司访, 王永娟, 等. 轻型无人作战系统机电联合仿真[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(3): 31-35.

[5] 李玉玺, 李正宇, 徐宏斌, 等. 地面无人作战平台“作战机器人”国内外研究现状[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(12): 124-130.

[6] 刘通. 某型布雷武器交流伺服系统控制器研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.

[7] SUN Y S, ZHOU Y H. Design of Servo Control for Bridge Crane Based on DSP[J]. IEEE International Confefence, 2013(6): 1216-1228.

[8] 徐达, 王兆阳, 李华, 等. 基于改进 RRT 算法的弹药装填机器人路径规划[J]. 兵工自动化, 2023, 42(11): 93-96.

(上接第 89 页)

4 结论

1) 对攻坚战斗部前级装药结构进行了正交优化设计，找出了最优水平组合，分别为： $a=18\text{ mm}$ ， $b=12\text{ mm}$ ， $D=66\text{ mm}$ ， $h=3.2\text{ mm}$ 。

2) 提出了用侵彻深度 L 和无量纲数 γ 作为评价指标，并通过极差分析得到药型罩壁厚 h 、罩顶高 a 、隔板厚度 b 、隔板直径 D 等对穿深 L 的影响由主到次依次为 D 、 a 、 h 、 b ，对孔径 γ 的影响由主到次依次为 D 、 a 、 b 、 h 。

3) 试验验证了最优方案对钢筋混凝土的侵彻效果，侵彻通道较为均匀，侵彻通道最小孔径为 $\phi 30\text{ mm}$ ，比原结构提高了 20%；同时，验证了数值模拟加正交设计联合优化的有效性。

参考文献

[1] 王辉. 聚能装药侵彻混凝土介质效应研究[D]. 北京: 北京理工大学, 1997.

[2] 张雷雷, 黄风雷, 段卓平. 爆炸成型杆式侵彻体对混凝土靶侵彻研究[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(2): 1140-1142.

[3] 王静, 王成, 宁建国. 射流侵彻混凝土靶的靶体阻力计算模型与数值模拟研究[J]. 兵工学报, 2008, 29(12): 1409-1416.

[4] 段卓平, 温丽晶, 张连生, 等. 聚能装药的多点环形起

爆器性能测试及其应用[J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(6): 664-668.

[5] 肖强强, 黄正祥, 顾晓辉. 聚能装药侵彻混凝土的径向扩孔工程研究[J]. 兵工学报, 2010, 31(4): 464-468.

[6] 林华令, 丁育青, 汤文辉. 混凝土侵彻数值模拟的影响因素[J]. 爆炸与冲击, 2014, 28(1): 73-78.

[7] 王成, 王万军, 宁建国. 聚能装药对混凝土靶板的侵彻研究[J]. 力学学报, 2015, 47(4): 672-685.

[8] 陈闯, 李伟兵, 王晓鸣, 等. 串联战斗部前级 K 装药结构的优化设计[J]. 高压物理学报, 2014, 28(1): 73-78.

[9] RIEDEL W, THOMA K, HIERMAIER S. Penetration of reinforced concrete by BETA-B-500-numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes[C]//Proceeding of 9th International Symposium on Interaction of the Effect of Munitions with Structures. Germany: Berlin-Strausberg, 1999: 315-322.

[10] 黄正祥. 聚能装药理论与实践[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 192-204.

[11] 韩明蕾, 林溪石, 唐思凌. 变壁厚球缺型 EFP 战斗部结构优化设计[J]. 沈阳理工大学学报, 2015, 34(5): 54-57, 70.

[12] 王维占, 冯顺山, 李小军, 等. 局部变壁厚球缺形药型罩侵彻威力性能的数值模拟及试验验证[J]. 炸药学报, 2018, 41(4): 420-424.

[13] 韩阳阳, 尹建平, 陈闯, 等. 型罩结构参数对 K 型聚能装药成型影响分析[J]. 工学报, 2018, 39(1): 57-61.