

基于视觉惯性里程计的室内自主飞行无人机系统设计 *

蔺晓俊^{1,2}, 薛涛^{1,2}, 孙习贞^{1,2}

(1.天津理工大学 天津市先进机电系统设计与智能控制重点实验室,天津 300384;

2.天津理工大学 机电工程国家级实验教学示范中心,天津 300384)

摘要:为解决在 GPS 信号缺失的室内环境下无人机的定位和自主飞行问题,以多旋翼无人机为平台,基于机器人操作系统(Robot Operating System,ROS)和 MAVROS 构建了通信网络系统,并选用英伟达 Jetson NANO 运行该系统,采用 Pixhawk4 飞行控制板运行核心控制部分,结合基于英特尔追踪实感摄像头 T265 的位置信息,融合飞行控制板载传感器数据对无人机状态估计进行修正,提高了无人机室内自主飞行的稳定性。为进一步提高无人机室内自主飞行性能,基于 ROS 设计了飞行任务管理系统,实现了控制无人机在室内飞四边形的轨迹。真实飞行试验结果表明:无人机自主飞行过程中可以实现一键起飞、自主降落、稳定悬停和飞行。

关键词:无人机;室内自主飞行;ROS;T265;视觉惯性里程计

中图分类号:TP242.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-2354(2021)S2-0099-05

DOI:10.13841/j.cnki.jxsj.2021.s2.020

Design of UAV system for indoor autonomous flight based on visual inertial odometer

LIN Xiao-jun^{1,2}, XUE Tao^{1,2}, SUN Xi-zhen^{1,2}

(1.Tianjin Key Laboratory for Advanced Electromechanical System Design and Intelligent Control,
Tianjin University of Technology, Tianjin 300384;

2.National Demonstration Center for Experimental Mechanical and Electrical Engineering Education,
Tianjin University of Technology, Tianjin 300384)

Abstract: In order to solve the positioning and autonomous flight problems of UAV in indoor environment where GPS signals are missing, a communication network system based on Robot Operating System (Robot Operating System, ROS) and MAVROS was built on the platform of multi-rotor UAV, and Nvidia Jetson NANO was selected to run the system. The Pixhawk 4 flight control board is used to run the core control part. Combined with the position information of T265, which is based on Intel tracking camera, the state estimation of the UAV is revised by fusing the data of the flight control board sensor, which improves the stability of indoor autonomous flight of the UAV. In order to further improve the indoor autonomous performance of UAV, a flight task management system based on ROS is designed to control the quadrangular trajectory of UAV indoor flight. The real flight test results show that the UAV can realize one-button take-off, autonomous landing, stable hovering and flight in the process of autonomous flight.

Key words: unmanned aerial vehicle; indoor autonomous flight; ROS; T265; visual inertial odometer

在全球化的发展进程中,我国现代化及工业化得到了大力发展,机械设计自动化的发展随之提上日程。无人机(UAV)^[1]、航空航天对接设备与机械设计的自动化^[2]密切相关。基于户外定位技术的四旋翼无人机^[3]已广泛应用于军事、工业、农业、娱乐等方面,如空中侦察无人机、电力巡逻无人机、植保无人机^[4]、救援无人机^[5]、航拍无人机、遥感监测无人机^[6]等等。室内 GPS

信号较弱或没有和室内无人机硬件平台的约束限制了无人机室内导航^[7]的发展。近 10 年来,大家对基于室内定位技术的无人机需求增加,相关的控制优化、路径跟踪等其他问题也得到了重视,无人机室内导航的研究进展迅速。

室内无人机作为精准物流的重要组成部分,其室内空间位置精度对于室内人员和财产安全产生重要影响。天津大学展开

* 收稿日期:2021-06-18;修订日期:2021-08-05

基金项目:教育部产学研合作协同育人项目(202002066002);天津理工大学教学基金项目(YB21-02)

了光流传感器与 IMU 信息融合在无人机上的研究^[8],使用块匹配算法计算光流数据,使用卡尔曼滤波算法^[9]融合两者数据,试验结果显示最大定位误差在 1.41 m,比单独光流传感器定位效果好,但是误差仍然较大。中国电子科技集团公司研究出一种基于激光雷达和超声波传感器的四旋翼无人机控制系统,测试结果表明,搭建的无人机能实现较精确的自主悬停^[10],但是未做进一步的自主飞行研究。由于光流传感器和气压计等传感器定位精度普遍较低,故无法保证无人机飞行参数的稳定性^[11]。使用视觉和惯性部件可以分别定位目标。双目相机通过在像素平面捕捉目标、确定相差从而计算出目标物体的三维坐标,对于低速运动的目标能够较为准确地定位;使用搭载在目标物体上的惯性部件(如 IMU 或磁力仪等)能够高速、实时地测量物体的运动状态(或运动状态的改变),对于视觉方法难以处理的快速运动或运动状态剧烈变化等情况具有良好的适应性。融合视觉和惯性部件将能够大幅度提升定位的准确性和稳定性。因此,基于视觉定位和 IMU 惯性部件定位数据融合的视觉惯性里程计(Visual Inertial Odometer, VIO)^[12]方法成为保证无人机室内空间位置定位和自主飞行的首选。随着 ROS 系统在机器人领域的广泛应用和 px4 开源飞控的日渐成熟^[13],二者的结合为实现无人机室内自主飞行提供了解决方案^[14]。

针对于无人机在室内无 GPS 信号情况下无法完成自主定位飞行,本文提出一种基于视觉惯性里程计的无人机室内自主飞行方案,可以根据任务需求完成无人机的自主飞行,为精准物流配送无人机提供参考。

1 无人机整体方案设计

1.1 硬件设计

文中搭建的无人机系统主要包括:英伟达机载电脑 Jetson NANO、Pixhawk4 飞行控制板、英特尔 追踪实感摄像头 T265、无刷电机和供电模块。机载电脑实时处理 T265 采集的位置数据,与飞控板 IMU 位置信息融合对无人机进行位置估计,飞控板接收板载计算机控制指令后对无人机姿态和位置进行控制。图 1 为室内自主飞行无人机组装实物图。



图 1 室内自主飞行无人机组装实物图

Pixhawk4 飞控板内部集成板载主处理器、协处理器及多种高精度传感器,同时兼容开源飞控固件 PX4 和 ArduPilot,支持多种外设扩展接口^[15]。Pixhawk4 飞行控制器通过 WiFi 数传与

板载计算机进行双向通信,接收板载计算机控制指令,并向板载计算机实时反馈当前飞行参数,如图 2a 所示。

T265 内部自带 SLAM 模块,将摄像头与惯性测量单元(IMU)结合起来,利用环境中的视觉特征,在未知空间可精确追踪其路径。同时 T265 具有体积小、质量轻、功耗低和精度高的特点,非常适合装载在小型无人机上,如图 2b 所示。



(a) Pixhawk4



(b) T265

图 2 重要组成硬件

Jetson NANO 作为板载计算机(如图 3 所示),运行 Ubuntu18.04 操作系统并安装 ROS Melodic 和 MAVROS,通过 MAVLink 通信协议与飞行控制器 Pixhawk4 进行通信。Jetson NANO 运行基于 ROS 的任务管理系统,通过 ROS 话题和服务机制获取无人机当前位置与姿态并发送控制指令和位置信息实现无人机自主起降、任务点飞行、悬停、避障等动作。



图 3 板载电脑 Jetson NANO

1.2 软件设计

软件部分主要完成系统间的通信,传感器数据的采集,位置估计和位置控制的实现。基于 ROS 的架构,机载电脑内部节点采用 MAVROS 进行信息的订阅和发布,机载电脑与 Pixhawk4 飞行控制板的信息通信采用 MAVROS 通信协议。MAVROS 通信协议被广泛应用于无人机通信,其是一种为微形飞行器设计的非常轻巧的、只由头文件构成的信息编组库。无人机的控制、状态、位置等信息都可编译为 MAVROS 数据包,地面控制站与无人机间传递这些数据包。图 4 为室内自主飞行无人机整体方案。

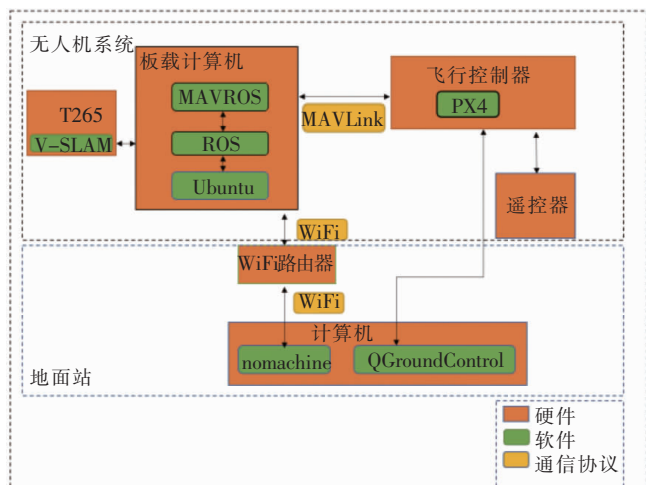


图 4 室内自主飞行无人机整体方案

2 无人机自主飞行控制算法设计

在室内卫星信号不好的地方,使用 T265 相机进行定位,T265 内部自带 SLAM 模块,它可以实时向 z 板载计算机发送位置信息,实现精准定位。使用 px4_command 开源项目 ROS 功能包,其总体架构如图 5 所示。

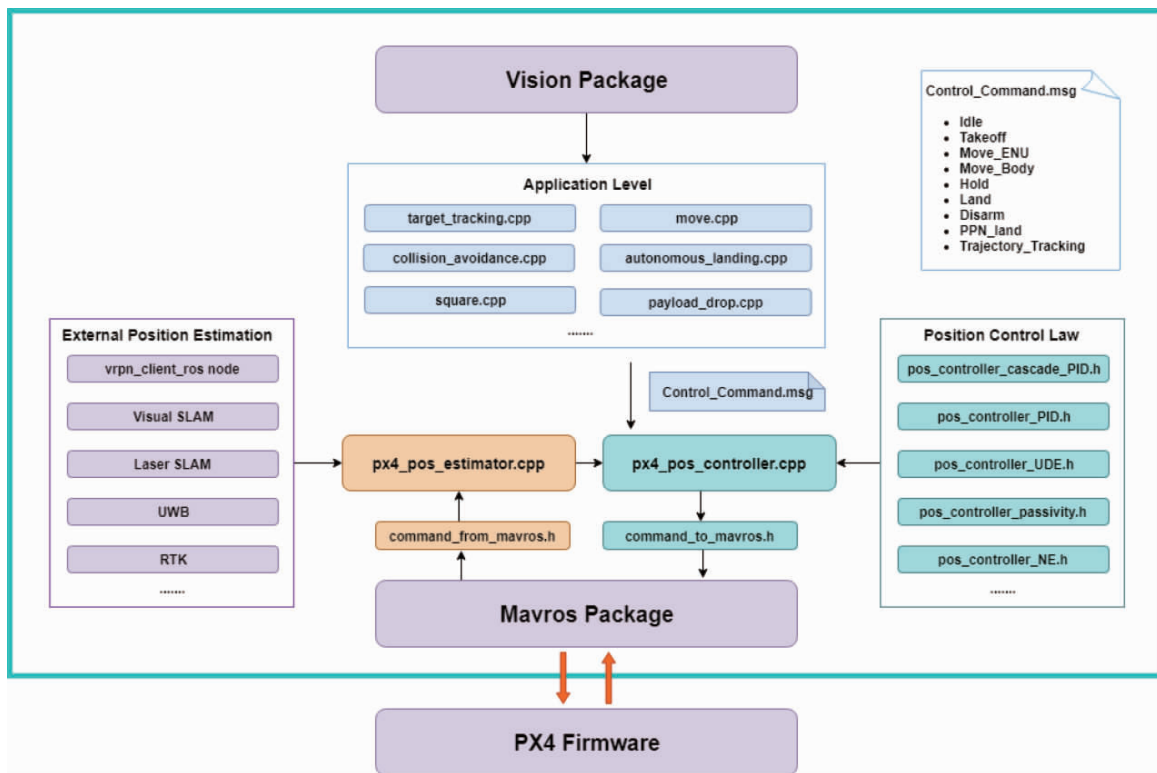


图 5 无人机自主飞行控制算法整体架构

3 试验结果与分析

为验证基于视觉惯性里程计的四旋翼无人机的飞行性能,综合考虑具体试验条件,设计无人机室内自主飞行试验方案如下。

系统中包含 MAVROS, T265, px4_pos_estimator, px4_pos_controller 等多个节点,其中 MAVROS 负责将 PX4 输出的包含无人机当前状态、姿态及位置信息的 MAVROS 消息转换成具有特定格式和标识符的 ROS 话题以供任务管理系统进行订阅;另外 MAVROS 节点还负责将任务控制器发布的包含无人机控制指令的话题和服务转换成 MAVROS 消息格式并发送到飞行控制器。T265 节点负责将 T265 位置信息以话题形式传送给 px4_pos_estimator。

px4_pos_estimator 节点订阅 T265 和发布的位置信息,并进行坐标转换,并且在 state_from_mavros 中已订阅飞控发布的位置、速度、欧拉角信息,根据订阅的数据,发布相应的位置、偏航角给飞控。

px4_pos_controller 节点订阅由位置估计发布的 DroneState,初始化当前飞机状态的时间。订阅 ControlCommand 发布 topic_for_log 主题。并选择串级 PID 控制律 cascade_PID,检查参数正确后,初始化完成。输入 1 将可以使无人机解锁 offboard 模式,并显示无人机当前位置和状态信息。

Move 节点对无人机下达位置控制速度控制和起飞降落等指令实现对无人机的精准控制。

Square 节点设置四边形轨迹的航点位置。

该试验方案由 A、B、C、D、E 五个任务点构成封闭四边形轨迹,定义 x、y 正方向如图 6 所示,z 方向为高度方向。O 为起始点,其坐标为(0,0,0)。A 点设置为起飞后悬停点,其坐标定义为(0,0,0.5),并设置无人机四边形航迹边长为 1 m,其余任务点与起点之间的相对关系如图 6 所示。

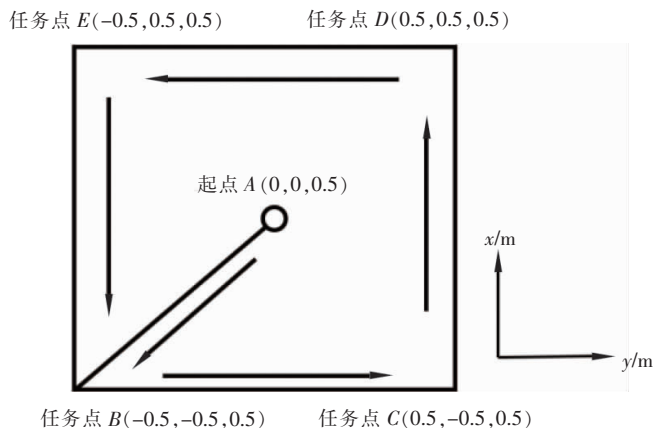


图 6 无人机自主飞行试验方案

试验流程:无人机执行四边形飞行任务前,首先让无人机在 A 点稳定悬停一段时间,之后无人机执行自主飞行四边形轨迹任务,分别先后经过 AB、BC、CD、DE、EB 五条边。任务结束后在 B 点自主降落。

试验结束后通过地面站程序对无人机飞行日志进行分析,获得如图 7 所示的真实飞行轨迹。整个试验过程中,运行任务管理系统的协同计算机可按照试验方案控制无人机自主起降并进行多任务点间直线飞行,所有任务均按预期执行,无异常情况出现。

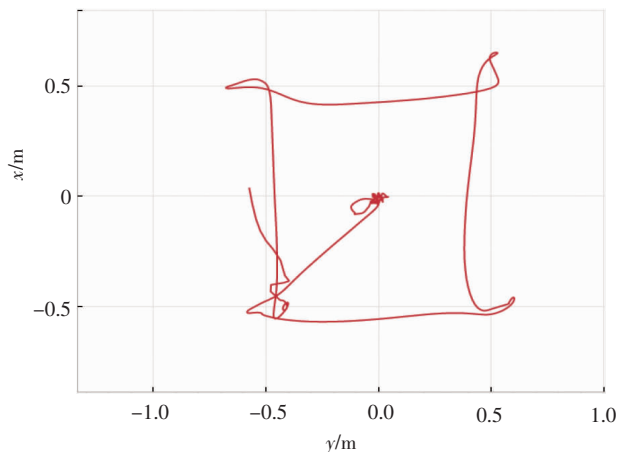
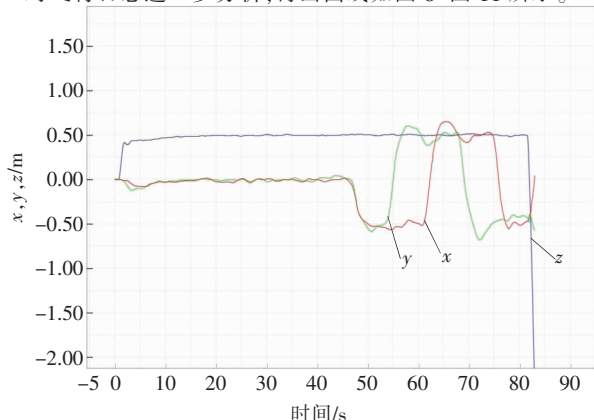
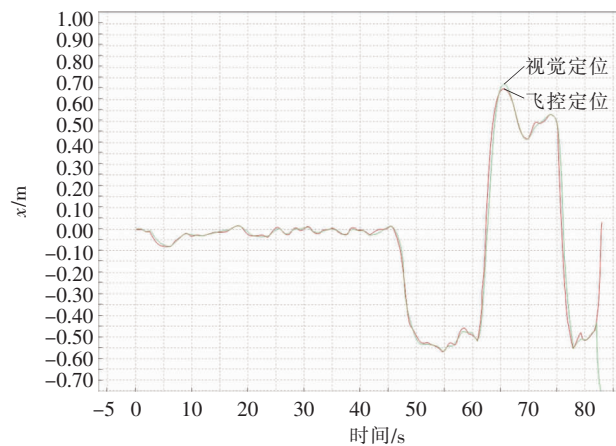
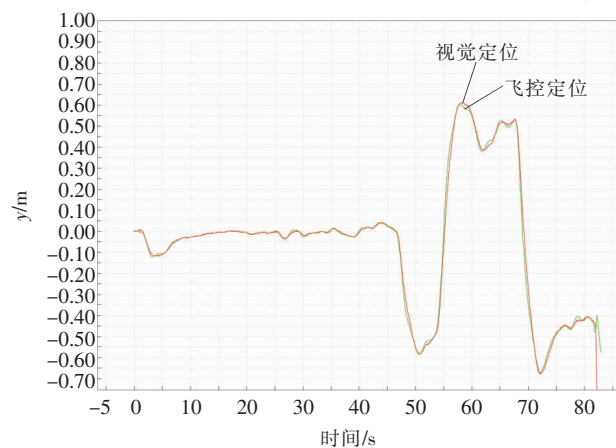
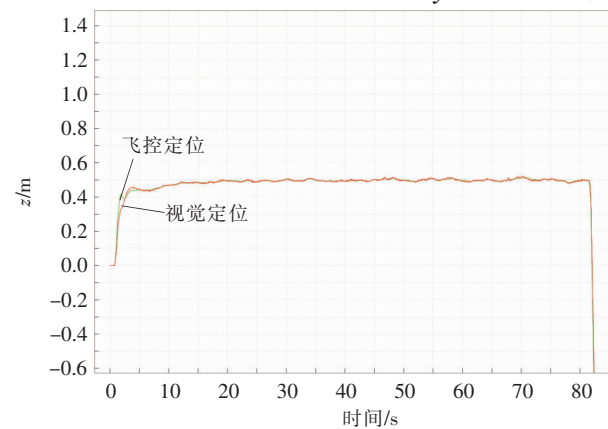


图 7 无人机真实飞行轨迹

对飞行日志进一步分析,得出曲线如图 8~图 11 所示。

图 8 无人机 x 、 y 、 z 坐标变化曲线图 9 T265 视觉定位与飞控定位 x 方向对比曲线图 10 T265 视觉定位与飞控定位 y 方向对比曲线图 11 T265 视觉定位与飞控定位 z 方向对比曲线

从试验结果可绘出无人机飞行时刻表如表 1 所示。

表 1 无人机飞行时刻表

任务点	出发时间/s	到达时间/s	x 向误差/m	y 向误差/m	z 向误差/m
A	0	20	-0.026	0.005	0.005
B	45	52	0.025	0.023	0.01
C	52	60	0.004	0.05	-0.002
D	60	66	0.05	0.005	0.01
E	66	74	0.027	0.04	0.007
B	74	81	-0.012 5	-0.06	-0.001
平均值			0.024 1	0.031	0.006

在 0~45 s 时无人机处于悬停状态,45 s 后开始执行自主飞

行四边形轨迹任务,45~52 s 在 AB 边飞行,52~60 s 在 BC 边飞行,60~66 s 在 CD 边飞行,66~74 s 在 DE 边飞行,74~81 s 在 EB 边飞行,之后自主降落。可以看出无人机真实飞行轨迹与预定轨迹基本吻合,T265 摄像头与飞控预估位置大致相同。在任务点的平均 x 向误差为 0.024 1 m,平均 y 向误差为 0.031 m,平均 z 向误差为 0.006 m。通过分析发现无人机能够精准的在室内完成飞行任务。

4 结论

构建了一种基于视觉惯性里程计的无人机自主飞行系统。使用追踪实感摄像头 T265 作为室内定位传感器,在英伟达 Jetson NANO 上搭载 ROS,采用 PX4 飞控进行无人机姿态和位置控制,基于 MAVROS 进行通信,通过无人机任务管理系统实现无人机位置控制。通过设计无人机自主飞行四边形试验测试无人机的性能。试验结果表明:

(1)该系统实现了无人机在室内一键起飞、自主悬停、自主飞行和自主降落功能。

(2)无人机能够按照预定飞行路线直线飞行,飞行过程中平均 x 向误差为 0.024 1 m,平均 y 向误差为 0.031 m,平均 z 向误差为 0.006 m。

(3)该系统定位精度高、稳定性强,对于室内智能物流配送无人机的实现具有很好的借鉴意义。

参考文献

- [1] Zha Changliu, Ding Xilun, Yu Yushu. Quaternion-based nonlinear trajectory tracking control of a quadrotor unmanned aerial vehicle [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30 (1): 77-92.
- [2] 徐剑锋. 机械设计自动化发展及航天领域的应用研究[J]. 机械设

计, 2021, 38(2): 151.

- [3] 葛畅, 何振鹏, 年哲, 等. 四旋翼无人机姿态测试平台设计及运动控制研究[J]. 机械设计, 2019, 36(1): 136-140.
- [4] 曹权玺, 章鉴烽. 六旋翼植保无人机造型设计[J]. 机械设计, 2020, 37(8): 2.
- [5] 张小开, 于春健. 救援子母无人机造型设计[J]. 机械设计, 2019, 36(6): 2.
- [6] 饶婉婧, 孙利, 吴俭涛. 面向用户行为过程的无人机遥感指挥车人机工程设计[J]. 机械设计, 2018, 35(11): 121-128.
- [7] 赵丽荣, 杨毅. 无人机室内定位技术综述[C]//第十四届全国信号和智能信息处理与应用学术会议论文集, 北京, 2021: 270-273.
- [8] 郭芳. 复杂环境下四旋翼无人机定位研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [9] 房德国, 王伟, 李自然, 等. VIO-SLAM 综述[J]. 电光与控制, 2020, 27(12): 58-62.
- [10] 姚光乐, 王守雷. Pixhawk 飞控系统的四旋翼无人机室内飞行技术研究[J]. 电子世界, 2021(7): 86-88.
- [11] 王大帅, Liu Xiaoguang, 李伟. 基于多传感器融合的无人机精准自主飞行控制方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(20): 98-106.
- [12] 王兆圣. 视觉惯性导航的融合与评测方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- [13] 吴佳青, 魏栋. 基于 RTK 与视觉辅助定位的自主无人机架线系统[J]. 电气自动化, 2021, 43(2): 27-29.
- [14] 林晓华, 王茂森, 戴劲松. 基于 ROS 的无人机占据地图构建方案设计[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(5): 215-220.
- [15] 李位星, 王大东, 葛声扬. 基于 STM32 的四旋翼无人机实验教学平台[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(2): 91-99.

作者简介: 蔺晓俊(2000—), 男, 学士, 研究方向: 无人机及机器视觉。

E-mail: 2225190774@qq.com

薛涛(通信作者)(1985—), 男, 讲师, 博士, 研究方向: 机构学与机器人。E-mail: xuetao506@126.com