

doi: 10.7690/bgzdh.2023.06.017

# 运输机器人自主行走与上下电梯控制技术

王怀榕, 汪正涛, 陶卫军

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

**摘要:** 针对室内跨楼层无接触配送服务需求, 设计一种搭载六自由度机械臂的室内运输机器人。根据功能需求设计运输机器人的机械结构、控制系统硬件框架以及运动学模型; 在此基础上运用即时定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)技术实现机器人在室内的自主行走与导航功能; 以YOLOv4-tiny卷积神经网络为基础, 实现电梯按钮的识别与定位并基于ROS中的MoveIt!来控制机械臂完成电梯按钮的按压功能。实验结果表明: 该机器人能够在大楼内实现自主定位导航与行走, 可自主搭乘电梯完成跨楼层运输任务的需求。

**关键词:** 运输机器人; 机械臂运动控制; SLAM; 视觉识别; YOLOv4-tiny

**中图分类号:** TP242 **文献标志码:** A

## Autonomous Walking and Elevator Control Technology of Transport Robot

Wang Huairong, Wang Zhengtao, Tao Weijun

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** An indoor transportation robot with a 6-Dof manipulator is designed to meet the needs of indoor cross-floor contactless delivery service. According to the functional requirements, the mechanical structure, the hardware framework of the control system and the kinematic model of the transport robot are designed, and on this basis, the simultaneous localization and mapping (SLAM) technology is used to realize the autonomous walking and navigation functions of the robot indoors; Based on YOLOv4-tiny convolutional neural network, the recognition and location of elevator buttons are realized, and based on MoveIt! to control the mechanical arm to complete the pressing function of the elevator button. The experimental results show that the robot can realize autonomous positioning, navigation and walking in the building, and can autonomously take the elevator to complete the cross-floor transportation task.

**Keywords:** transport robot; manipulator motion control; SLAM; vision recognition; YOLOv4-tiny

## 0 引言

自2020年初爆发的新冠疫情席卷全球以来,疫情不仅对人民的生命安全构成了巨大威胁,而且也严重影响了实体经济的发展<sup>[1]</sup>。在后新冠疫情的环境下,无接触配送<sup>[2]</sup>的模式走进了人们的生活,而物料运输机器人就是这一无接触配送模式的载体。目前国内外主流的运输机器人主要包括:波士顿动力公司的Stretch机器人<sup>[3]</sup>,主要用于在仓库环境下运输货物;普渡科技公司的配送机器人<sup>[4]</sup>,能够在餐厅、医院等场合完成餐具、医疗废物等物品的回收工作。此类机器人的工作区域多局限于单一楼层,只有较少部分的机器人,如天波公司开发的配送机器人能够通过无线通信来达到不同楼层运输货物的需求。然而,要实现机器人与电梯之间的无线通信,往往需要对电梯进行改造,导致额外的成本。根据特种设备安全监察条例<sup>[5]</sup>的规定,对电梯的改造需要得到电梯生产厂家的许可;因此,运

输机器人通过与电梯的无线通信来进行跨楼层运输的功能有一定的局限性。笔者设计一种搭载了六自由度智能机械臂的运输机器人,能够在不改造电梯的情况下,通过视觉识别电梯按钮并自主按压电梯按钮来搭乘电梯,从而实现跨楼层运输物品的功能。

## 1 物料运输机器人制作

### 1.1 机器人功能要求及技术指标

运输机器人主要用于如酒店、公寓、写字楼等配有电梯的多楼层服务场合,根据不同楼层的运输任务,能够在执行跨楼层的运输任务时在大楼楼道内自主导航及自主搭乘电梯。针对上述功能要求,机器人的技术指标如表1所示。

### 1.2 结构设计

物料运输机器人需要能在楼道内、电梯中等狭小的空间里工作,要求机器人结构紧凑且具有较高的灵活性。采用四轮独立转向独立驱动底盘,该底

收稿日期: 2023-02-10; 修回日期: 2023-03-05

作者简介: 王怀榕(1996—),男,福建人,硕士,从事智能机械与机器人应用技术研究。E-mail: 410302389@qq.com。

盘各个轮子上分别由一个驱动电机来控制轮子的转动行进，在各个轮子上方安装转向机构和转向电机来控制轮子的行走，构成全向轮模块。4 个轮子对称分布于底盘的左右和前后两侧，底盘中间为控制仓，放置驱动器、控制器以及锂电池等硬件。在底盘上安装了一只带有六自由度的机械臂，负责在执行跨楼层任务中自动识别并按压电梯按钮。所设计的机器人结构如图 1 所示。

表 1 机器人主要参数指标

技术指标	项目内容	参数说明
结构参数	质量/kg	自重≤60, 载重≥30
	结构尺寸/mm	700×650×1 000
	最大运行速度/(m/s)	0.6
性能指标	续航能力/h	≥3
	越沟宽度/mm	30
	按钮识别指标	准确率/%
按钮定位指标	定位精度/%	≥95
按钮按压指标	成功率/%	≥95

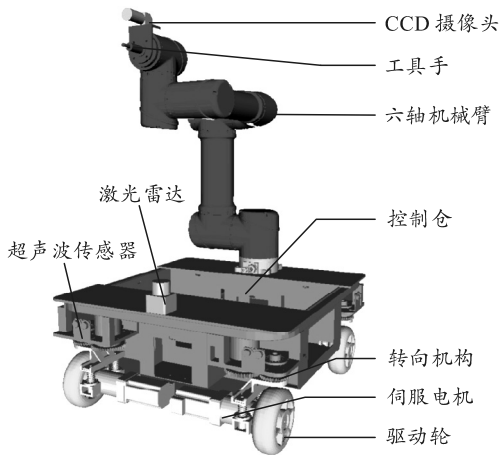


图 1 机器人结构

### 1.3 控制系统硬件构成

机器人控制硬件主要实现以下 3 个功能：底盘及机械臂的运动控制、机器人对自身状态及周围环境的感知、电梯按钮的视觉识别。根据这些要求，机器人的控制系统硬件构成如图 2 所示。

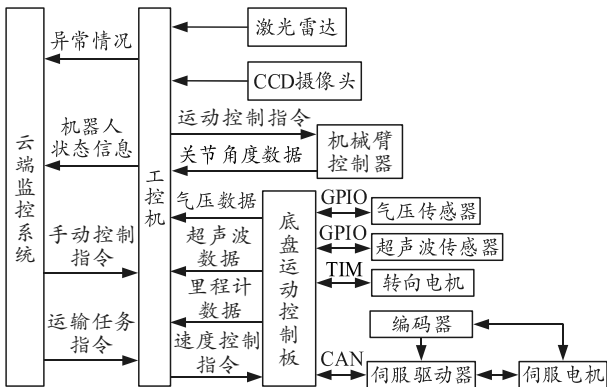


图 2 机器人控制系统硬件构成

## 2 基于 SLAM 的自主行走与导航定位方法

### 2.1 静态地图构建

室内环境下的机器人定位定姿主要使用即时定位与地图构建(SLAM)技术<sup>[6-8]</sup>，其可以描述为机器人从一个未知环境的一个未知位置出发，在移动过程中通过传感器获取环境深度信息，以此确定并得到自身位置和姿态，同时构建增量式地图。目前常用的 SLAM 算法主要包含 2 种：基于粒子滤波算法的 SLAM、基于图优化方法的 SLAM。考虑到物料运输机器人的主要应用场景不仅限于楼道与电梯内，还会在大堂、大厅等较大范围的场景内。基于粒子滤波算法的 SLAM 在处理大场景地图时由于每一个粒子都携带一幅地图，导致在构建地图时所需的计算资源大大提升，且没有回环检测易导致地图错位。作为对比，图优化方法在构建大场景地图时占用系统资源少，支持全局优化且有回环检测便于消除累计误差；因此，采用基于图优化的 SLAM 来构建环境静态地图。通过激光雷达获取的环境深度信息、编码器反馈的里程计数据及激光雷达与底盘之间的 TF 坐标关系，从而构建环境的 2 维地图。建图的框架如图 3 所示，所构建的大厅静态地图如图 4 所示。

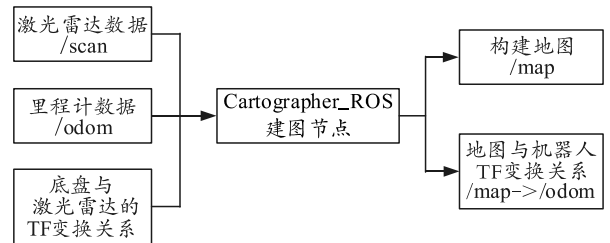


图 3 机器人建图框架



图 4 静态地图

### 2.2 运动控制

所设计的运输机器人采用四轮独立驱动独立转

向底盘，具有多个冗余可控自由度，能够实现直行、横移、斜行、原地转向等多种运动模式。针对实际应用需求，机器人主要采用直行、横移及原地转向 3 种运动模式。机器人运动模式如图 5 所示。机器人处于图 5(a)、(b)中的直行及横移的运动模式时，采用滑动转向驱动 (skid-steer drive)<sup>[9]</sup>作为其驱动方式，为简化运动模型，作出以下 3 点假设：1) 驱动轮在滚动时始终与地面保持接触且不产生空转；2) 机器人本体的质量分布均匀且质心 (centerofmass, COM) 位于机器人几何纵向对称线上；3) 机器人左右位于同侧的轮子转速相同。

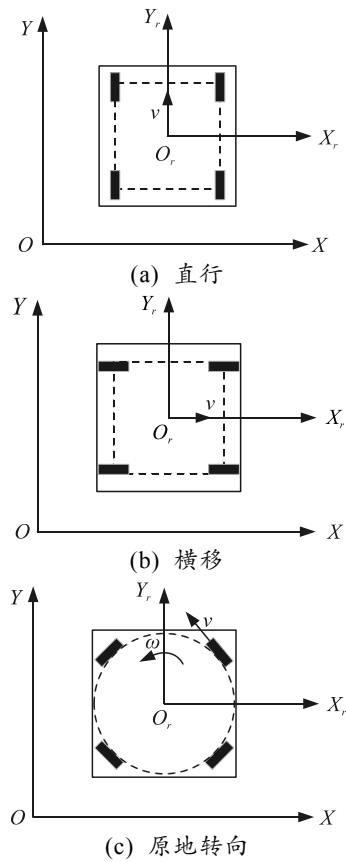
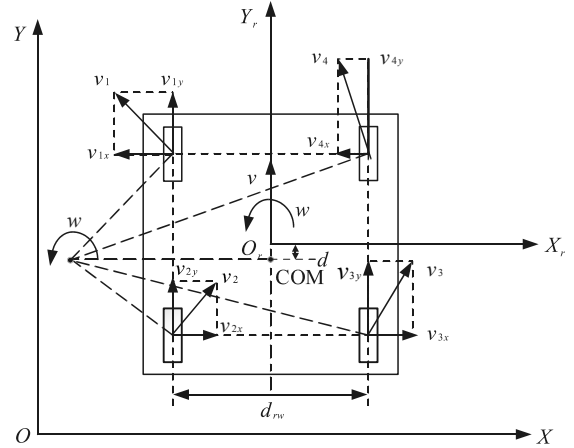
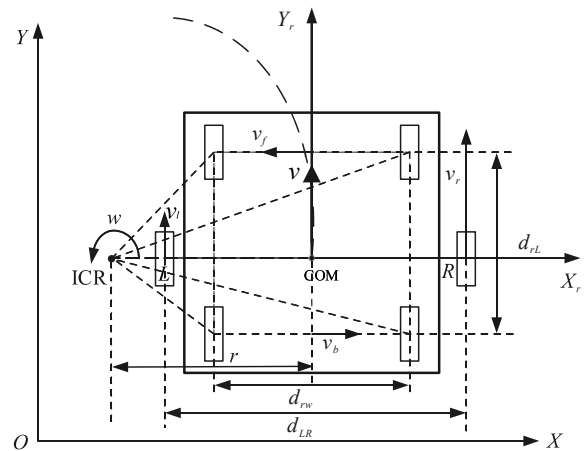


图 5 机器人运动模式

四轮驱动的滑动转向驱动运动学模型如图 6(a) 所示。在运输机器人滑动转向驱动运动模型中， $OXY$  为世界坐标系， $O_r X_r Y_r$  为机器人的几何中心坐标系，COM 为机器人的质心，ICR 为机器人的瞬时旋转中心， $d$  为质心到几何中心距离， $d_{rw}$  为左右轮轮距， $d_{rL}$  为前后轮轮距，点  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、和  $D$  分别表示轮胎与地面的理想接触点。为建立运动学模型如图 6(b) 中所示将四轮驱动运动模型等效处理为两轮差速驱动运动模型，其中：点  $L$  和  $R$  为等效处理后虚拟左右两轮的位置。 $d_{LR}$  为左右虚拟轮轮距， $r$  为瞬时旋转中心到质心的距离。



(a) 直行及横移运动模式下运动模型



(b) 滑动驱动模型简化等效

图 6 滑动转向驱动运动学模型

根据建立的运动模型，可以得到如下关系式：

$$r = v/w = (v_l + v_r)d_{LR}/2(v_r - v_l) \quad (1)$$

式中  $v_r$  及  $v_l$  表示机器人虚拟左右轮的线速度。根据简化后的等效模型，其运动学正解为：

$$\begin{pmatrix} v \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (v_r + v_l)/2 \\ (v_r - v_l)/2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/2 & 1/2 \\ 1/d_{LR} & -1/d_{LR} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_r \\ v_l \end{pmatrix} \quad (2)$$

由式(2)可以得到机器人运动学逆解为：

$$\begin{pmatrix} v_r \\ v_l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v + d_{LR}w/2 \\ v - d_{LR}w/2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & d_{LR}/2 \\ 1 & -d_{LR}/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ w \end{pmatrix} \quad (3)$$

### 2.3 导航与定位

导航的关键是要实现机器人定位及路径规划<sup>[10]</sup> 2 部分。机器人在构建好的静态地图中导航时，通过获取激光雷达采集的实时环境信息、编码器采集的里程计信息并进行综合分析得到机器人在全局地图中的定位信息。在此基础上，通过 ROS 系统提供的 TF 坐标变换工具发布激光雷达坐标系与底盘坐标系，里程计坐标系与底盘坐标系之间的 TF 变换。提供给 ROS 系统中的 move\_base 功能包即可规划出

一条从当前位置到目标位置的路径，并控制机器人根据规划路线完成相应的运动。运输机器人的导航功能框架如图 7 所示。

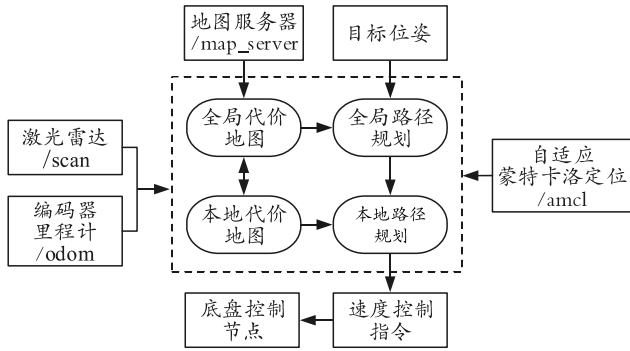


图 7 导航功能框架

### 3 基于视觉识别的机械臂按压电梯按钮技术

#### 3.1 按钮的视觉识别与训练

按钮识别过程主要依赖于面向按钮的目标检测算法。机器人在自主搭乘电梯时，既要保证按钮的识别精度，又要保证按钮的识别速度。笔者采用基于深度卷积神经网络的 YOLOv4-tiny 目标检测算法<sup>[11]</sup>进行电梯按钮的目标检测，其能在保证高识别率的同时还具有高实时性。基于 YOLOv4-tiny 的目标检测算法目前主要应用于车辆辅助驾驶中交通标志等目标的检测。其主要识别流程如图 8 所示。

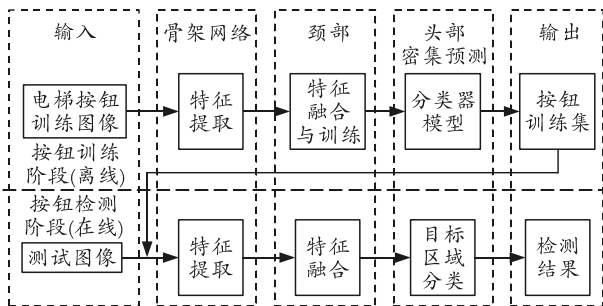


图 8 电梯按钮检测流程

在按钮训练(离线)阶段，首先在输入端输入电梯按钮的数据集，在骨架网络区对电梯按钮进行特征提取，在颈部区针对提取的电梯按钮特征进行融合与自对抗训练，在头部区针对训练结果用分类器分类得到分类器模型，最后输出电梯按钮的训练权重。在按钮检测(在线)阶段，根据相机采集的图像和按钮训练权重，在骨架网络与颈部区进行电梯按钮的特征提取与融合，最后在头部区域对识别区域分类并输出检测结果。

#### 3.2 按钮的视觉定位

按钮的视觉定位问题可以等效为求机械臂末端

的手指按到目标按钮所需要到达的目标位姿。为获取基于机器人底盘坐标系下目标按钮在世界坐标系下的位姿信息，需要对目标按钮进行从像素坐标系至世界坐标系的坐标转换。按钮视觉定位的方法主要基于针孔相机的投影模型<sup>[12]</sup>，如式(4)所示：

$$sp = KP_c = K[R|t]P_w \quad (4)$$

式中： $p=[u \ v \ 1]^T$  为像素坐标系下坐标； $P_c=[X_c \ Y_c \ Z_c]^T$  为相机坐标系下的坐标； $P_w=[x \ y \ z \ 1]^T$  为世界坐标系下的坐标； $K$  为相机内参矩阵可通过相机标定获得； $R$  和  $t$  分别为相机坐标系到世界坐标系的旋转矩阵和平移向量； $s$  为图像的缩放比例。在此基础上根据按钮实时检测的结果可以获得按钮的图像坐标  $p$ 。根据 ROS 中提供 TF 变换工具与建立的机器人 URDF 格式 3 维模型，可以获取机器人当前状态下相机坐标系 camera\_link 与工具手坐标系 finger\_link 的位姿信息。然后根据 OpenCV 中提供的 solvePNP<sup>[13]</sup>算法，求得基于机器人本体的世界坐标系下的目标按钮与相机坐标系之间的位姿变换： $[R|t]$ 。

#### 3.3 按钮按压过程控制方法

按钮按压过程控制方法融合了 YOLOv4-tiny 的实时检测结果与目标按钮定位结果，并通过 Ros 系统中 MoveIt! 软件来控制机械臂运动，最终完成电梯按钮的按压。

按钮按压流程：当机器人执行跨楼层运输任务时，机器人首先自主导航至电梯前并调整至准备按压上下楼层按钮的姿态，根据当前楼层与目标楼层的差值选择对应按钮；根据实时按钮检测结果先调整机械臂位姿直到目标按钮圆心位于相机坐标系原点，由按钮定位结果发布机械臂末端工具手指所要到达的目标位姿通过 MoveIt 控制机械臂运动到目标位姿；在按钮按压完成后，机械臂恢复正常行驶姿态同时底盘调整至准备进电梯姿态，并根据机器人底盘前侧左右 2 个超声波测距传感器获取的距离信息判断电梯门是否打开；进入电梯后再根据底盘左右两侧的超声波传感器调整机器人在电梯空间中的位置，然后机械臂调整至按压数字按钮姿态，按压完成后机械臂复位同时底盘调整至准备出电梯姿态，并根据底盘后侧左右 2 个超声波传感器判断电梯门的开关以及气压传感器的数据判断是否到达目标楼层。

## 4 实验

### 4.1 楼道自主行走实验

在楼道内自主行走实验中，机器人所处的室内环境如图 9 所示，根据房间分布的实验区域约为 (24.8 m×21.6 m)，电梯所处楼道区域约为 (7.2 m×3.2 m)。首先机器人根据建立好的静态地图以及预设的房间及电梯位置坐标进行路径规划，规划的路径如图 9 中实现所示。机器人从 101 房间出发，按房间号顺序沿着走廊自主行走，到达 108 房间后最后运行至标号为 777 的电梯位置准备搭乘电梯，实际行走路线如图 9 中虚线所示。机器人在楼道内行走的平均速度为 0.3 m/s，实验场景如图 10 所示。

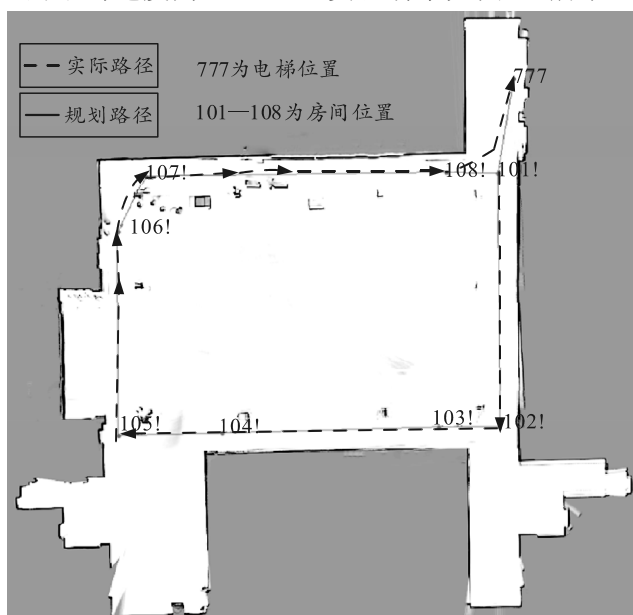


图 9 楼道自主行走实验轨迹



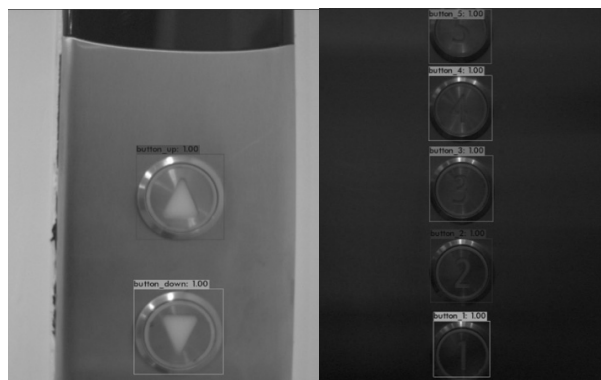
图 10 机器人自主行走场景

### 4.2 自主上下电梯实验

#### 4.2.1 按钮视觉识别实验

在按钮识别实验中，利用安装在机械臂末端的 CCD 相机对电梯的上下及数字按钮进行视觉识别实验。本实验环境中，电梯按钮的直径为 34 mm，

所需识别的内容为数字 1—5 及上下楼箭头。首先收集电梯按钮样本并制作数据集，每个按钮收集 150 份样本，数字 1—5 对应标签 button\_1 至 button\_5，上下楼箭头对应标签 button\_up 和 button\_down。然后修改训练配置文件，并将标注好的数据集载入 YOLOv4-tiny 的预训练权重网络中训练，得到所需电梯按钮的识别权重模型。最后使用该模型进行按钮识别，识别过程如图 11 所示。



(a) 上下按钮识别 (b) 数字按钮识别

图 11 电梯按钮识别实验

视觉识别时，相机与按钮平面垂直，相机与按钮间的距离约为 300 mm，每个按钮分别识别 30 次，最终实验结果如表 2 所示。

表 2 按钮识别实验结果

按钮类别	实验次数	成功次数	成功率/%	按钮类别	实验次数	成功次数	成功率/%
1	30	30	100	5	30	29	96.7
2	30	30	100	上	30	30	100
3	30	28	93.3	下	30	30	100
4	30	30	100				

由上表的结果可知，按钮 3 与 5 在 30 次识别实验中分别错误识别了 2 次与 1 次，结果如表 3 所示。

表 3 按钮识别错误结果

预测输出按钮标签	实际输出按钮标签	错误次数
3	5	2
5	3	1

根据按钮识别实验的结果可知，笔者采用的 YOLOv4-tiny 网络对电梯按钮图案的识别成功率为 98.5%。在环境光线较好，相机成像清晰的情况下识别成功率能够达到 100%；但在光线较暗的电梯内，成像较差，对于相似的数字易发生识别错误的情况，如数字按钮 3 与 5。

#### 4.2.2 按钮视觉定位与按压实验

在按钮的视觉定位实验中，首先，根据张友正标定法<sup>[14]</sup>标定相机，得到相机的内参矩阵  $K$  与畸变系数向量  $D$ ：

$$K = \begin{bmatrix} 1\,444.098 & 0 & 907.345 \\ 0 & 1\,379.247 & 638.671 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$D = [0.026\,248, 0.036\,187, -0.003\,893, 0.079\,235, 0]. \quad (6)$$

CCD 相机采集的图像分辨率为 1 280×960，根据 YOLOv4-tiny 网络得到按钮在像素坐标系下的坐标，再由 solvePNP 算法得到相机的外参。最后结合 ROS 中的 TF 工具得到当前相机坐标系的位姿信息，得到最终工具手所需达到的目标位置的位姿信息。表 4 所示为各按钮视觉定位实验结果。

分析下表数据可知，世界坐标系下按钮的坐标 X 轴与 Z 轴的误差在 ±3 mm 内，按钮的直径为

34 mm，按钮圆心位置视觉定位精确度约为 96.5%。

表 4 按钮视觉定位实验结果 mm

按钮类别	实际坐标	测量坐标
1	(539.42, 423.36, 990)	(537.21, 425.69, 987.15)
2	(539.42, 423.36, 1 035)	(541.39, 424.87, 1 037.63)
3	(539.42, 423.36, 1 080)	(538.84, 421.76, 1 083.54)
4	(539.42, 423.36, 1 125)	(537.48, 424.54, 1 123.64)
5	(539.42, 423.36, 1 170)	(542.63, 425.15, 1 171.89)
上	(-324.58, -462.25, 1 060)	(-326.13, -464.58, 1 058.65)
下	(-324.58, -462.25, 1 115)	(-323.31, -461.95, 1 113.15)

图 12 所示为机器人自主上下电梯实验，本实验中机器人初始楼层为 5 楼，目标楼层为 2 楼，根据按钮视觉定位的实验结果，通过 MoveIt! 控制机械臂按压指定按钮，按钮按压实验结果如表 5 所示。

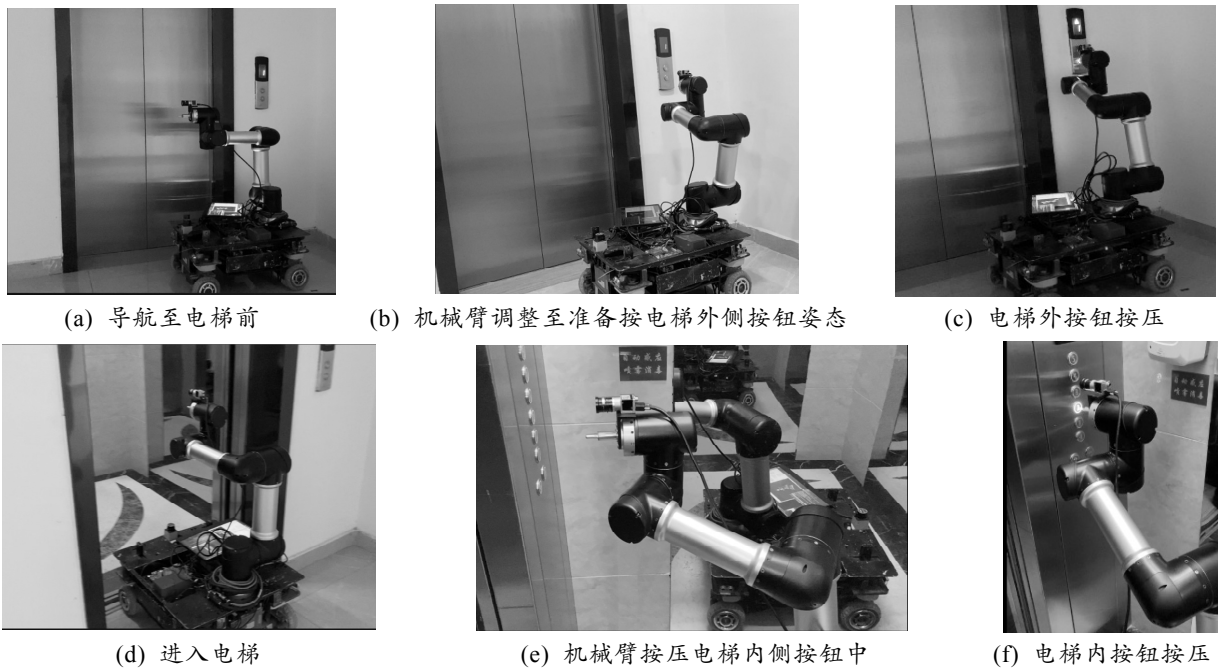


图 12 自主上下电梯实验

表 5 按钮按压实验结果

按钮类别	实验次数	成功次数	成功率/%	按钮类别	实验次数	成功次数	成功率/%
1	20	20	100	5	20	19	95
2	20	19	95	上	20	20	100
3	20	18	90	下	20	19	95
4	20	20	100				

根据按钮按压的实验结果，基于 YOLOv4-tiny 网络按钮按压技术的平均成功率为 96.4%，结果表明基于此方法的电梯按钮按压技术能够自主完成电梯按钮的按压。根据自主搭乘电梯的实验结果可知，所设计的运输机器人能够完成自主搭乘电梯完成跨楼层的运输任务。

### 5 结束语

笔者基于 ROS 系统与 YOLOV4-tiny 卷积神经

网络，实现了搭载 6-DOF 机械臂的四轮独立驱动独立转向的运输机器人的运动控制并能够完成自主导航与自主搭乘电梯完成跨楼层运输任务。实验结果表明：该运输机器人能够满足自主行走与跨楼层的运输任务，电梯按钮的识别、定位与按压精度都大于 95%。对无接触运输这一需求提供了一种新的解决方案，有良好的应用前景。

### 参考文献：

[1] 任静, 尚景文, 何庆柏, 等. 后疫情时代我国物流智能配送发展现状及策略[J]. 商业文化, 2021(11): 94-95.  
 [2] 宋子琪, 赵汇丰, 葛玉婷, 等. 智慧物流驱动下无接触配送模式创新研究[J]. 物流工程与管理, 2021, 43(5): 6-9.