

doi: 10.3969/j.issn.1674-1242.2024.04.003

# 基于自主导航和感知抓取的智能照护机器人系统研究

雷浩<sup>1</sup>, 杨涵<sup>2</sup>, 王金武<sup>2,3</sup>

(1. 上海徐汇卓越医工交叉与医学人工智能技术创新中心, 上海 200233;

2. 上海交通大学生物医学工程学院, 上海 200030;

3. 上海交通大学医学院附属第九人民医院骨科, 上海 200011)

**【摘要】** 该文设计了一款带有机械臂, 可以自主导航、感知抓取的智能照护机器人, 以满足老年人对照护的多样化和复杂性需求。首先, 应用 Cartographer 算法实现照护机器人在养老场景下的同时定位与地图构建 (SLAM) 功能。其次, 利用构建好的 SLAM 地图, 将分段混合搜索 (SHS) 等法用于自主导航。此外, 利用 Y-GGCNN 网络进行精确的物体姿态分析和抓取。因此, 照护机器人能够在复杂的社区照护任务 (如搀扶老人、端茶倒水、开门、取快递、盖被子等) 中展现出卓越的自适应能力和优秀的操作性能。实验表明, 基于自主导航和感知抓取的智能照护机器人系统在真实世界环境中的操作精度与响应速度能得到有效提高。该系统为老龄化社会的社区养老提供了一个高效和智能的照护解决方案, 解决了人力护工短缺的问题, 适用于医院、养老院、家庭等场所。

**【关键词】** 社区照护机器人; 自主导航; 感知视觉; 移动 App 端**【中图分类号】** R454**【文献标志码】** A

文章编号: 1674-1242 (2024) 04-0299-16

## Design of an Intelligent Care Robot System Based on Autonomous Navigation and Perceptual Grasping

LEI Hao<sup>1</sup>, YANG Han<sup>2</sup>, WANG Jinwu<sup>2,3</sup>

(1. Shanghai Xuhui Excellent Medical and Industrial Intersection and Medical Artificial Intelligence Technology Innovation Center, Shanghai 200233, China;

2. School of Biomedical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;

3. Department of Orthopaedic Surgery, Shanghai Ninth People's Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200011, China)

**【Abstract】** This article designs an intelligent care robot with a robotic arm that can autonomously navigate and perceive grasping to meet the diverse and complex needs of the elderly for care. Firstly, the simultaneous localization and map building (SLAM) function is implemented using the Cartographer algorithm. Secondly, the SHS path planning method is implemented for autonomous navigation. Furthermore, the Y-GGCNN network is used for precise object pose

收稿日期: 2023-10-07。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFF1202600); 上海市科学技术委员会“科技创新行动计划”国内科技合作领域项目 (22015820100)。

作者简介: 雷浩 (1975—), 男, 上海市人, 中级架构师, 从事智能机器人研究。

杨涵 (1993—), 男, 河南省南阳市人, 科研助理, 从事数字医学研究。

注: 雷浩与杨涵为共同第一作者。

通信作者: 王金武, 男, 教授, 博士生导师; 邮箱 (E-mail): Jinwu\_wang@163.com。

analysis and grasping. Those above enable care robots to demonstrate excellent adaptive ability and efficient operational performance in handling complex community care tasks, such as assisting the elderly, serving tea and water, opening doors, picking up parcels, and covering blankets. Experiments have shown that autonomous navigation and perceptual grasping can effectively improve the operational accuracy and response speed of care robots in real-world environments. This system provides an efficient and intelligent care solution for community elderly care in an aging society, solving the shortage of human caregivers. It is suitable for hospitals, nursing homes, homes and other places.

**【Key words】** Community Care Robots; Autonomous Navigation; Perceived Vision; Mobile App

## 0 引言

随着老龄化社会的到来<sup>[1]</sup>, 养老服务需求日益增加。家庭养老因“少子化”和“空巢”问题<sup>[2]</sup>而面临挑战。照护机器人的应用成为解决养老问题的有效方案之一, 其可以提供安全照护、健康监测和日常生活服务等功能, 帮助老年人更好地居家生活。例如, 哈尔滨理工大学侯春阳<sup>[3]</sup>设计的助老服务机器人能辅助老年人行走、提取物品, 实时监测老年人生命质量, 并与老年人进行语音交互。然而, 由于机械臂设计自由度低和路径规划算法缺陷, 这款机器人在日常抓取和提取物品等任务上的灵活性不足。山东科技大学张腾飞<sup>[4]</sup>的研究聚焦于基于激光同时定位与地图构建 (Simultaneous Localization and Mapping, SLAM) 的移动护理机器人导航控制系统。尽管构建高精度地图模型能提高导航的精确度和效率, 但是机器人在狭窄的过道或门框处仍易撞到障碍物或无法规划出有效路径。针对这些问题, 本研究研发了一款带有机械臂的新型照护机器人, 该机器人通过创新的行为交互, 可全面、智能地实现老年人照护功能, 如搀扶、协助取物和引导锻炼。同时, 通过设计冗余自由度, 机器人的机械臂在运动时更加灵活; 通过改进路径规划算法, 机器人在通过狭窄的过道或门框时, 不会碰到障碍物或无法规划出路径。该机器人不仅能提供日常生活照护、健康监测等功能, 还能及时应对紧急情况, 并与老人互动, 缓解其孤独感。

照护机器人大多数运用在室内。与室外相比, 室内空间小, 可通行区域少, 障碍物多, 因此机器人室内路径规划的安全性至关重要。由于地面的摩擦力、轮胎滑动及定位和转向不精确, 机器人实际行驶轨迹与规划的路径存在一定的偏差<sup>[5]</sup>。为

了避免因这些偏差而导致与障碍物的碰撞, 路径规划算法需要生成既安全又可行的路径, 同时确保路径与障碍物之间有足够的间隙, 以便在后续步骤中对路径进行优化和平滑处理。

关于路径规划算法, 近年来, 学术界对 A\* 算法的优化进行了深入的研究, 提出了多种改进措施。Xiong 等<sup>[6]</sup>提出了一种基于运动学约束的 A\* 算法与动态窗口算法 (Dynamic Window Approach, DWA) 相融合的方法, 用于自动导引车的动态路径规划。该方法通过检查节点与障碍物中心之间的距离是否超出预设的安全距离处理路径穿越障碍物的问题, 但这种方法并没有在路径生成阶段就预防穿越障碍物的情况。Zhang 等<sup>[7]</sup>和 Wang 等<sup>[8]</sup>通过设置栅格单元周围的安全距离, 在搜索阶段排除障碍物周围一定范围内的节点, 以避免路径规划时的碰撞问题。然而, 这种方法在狭窄空间中可能会错过最优路径。Li 等<sup>[9]</sup>通过分析路径点之间的夹角和连线是否穿透障碍物去除冗余路径点, 优化路径规划。Fu 等<sup>[10]</sup>采用逐步连接起点与剩余点的方法, 保留可行且编号最大的路径点, 以此提高路径规划的成功率并缩短路径长度。尽管上述方法在去除冗余路径点方面取得了一定的效果, 但存在安全性不足和计算量大的问题。为了解决这些问题, 本研究提出了一种新的改进 A\* 算法, 即分段混合搜索 (Segmented Hybrid Search, SHS) 算法。该算法结合了栅格地图和拓扑地图的优势, 通过提取关键节点形成拓扑地图, 并在此基础上进行分段搜索, 以预定义的安全路径点作为局部目标, 有效地规划出一条既安全又高效的路径, 特别是在狭窄区域的应用中表现出色。

## 1 带机械臂的智能照护机器人的硬件设计

带机械臂的智能照护机器人的硬件部分由底盘系统、机械臂系统、控制系统、传感器系统、交互系统、电源系统等组成，其设计架构如图1所示。

### 1.1 底盘系统

带机械臂的智能照护机器人底盘系统由轮组、

电机、减速器、编码器、电机驱动器、万向轮、载重结构和悬挂结构等组成。轮组、电机、减速器、编码器、电机驱动器组成一个驱动轮组，电机驱动器实现驱动轮组电流环、速度环、位置环的控制。整机由两个驱动轮组构成一个两轮差速底盘，轮组安装在悬挂结构上，保证整机运动过程中的稳定性。智能照护机器人的底盘系统布局如图2所示。

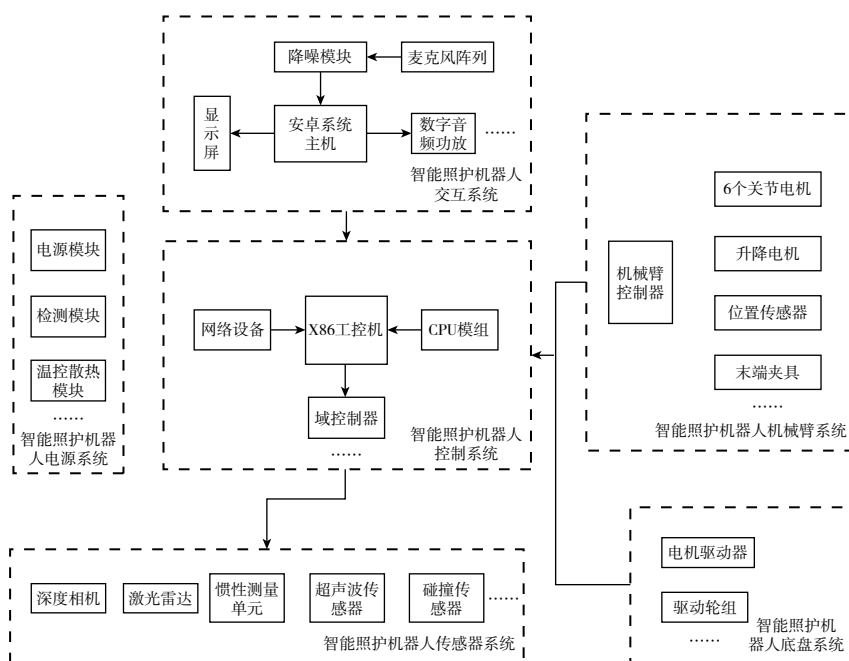


图1 智能照护机器人的硬件设计架构

Fig.1 Hardware design architecture of intelligent care robot

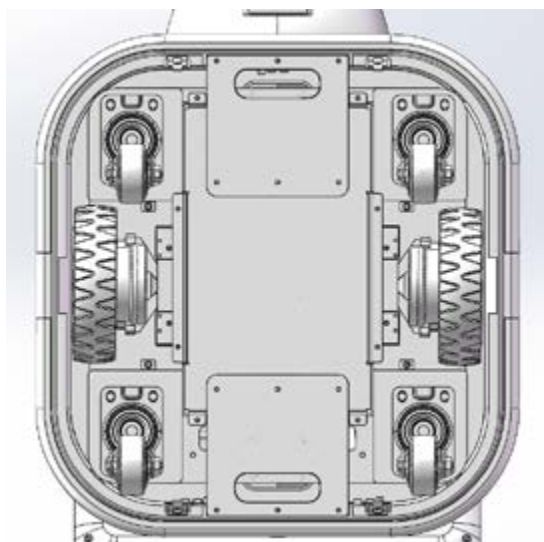


图2 智能照护机器人的底盘系统布局

Fig.2 Chassis structure diagram of intelligent care robot

### 1.2 机械臂系统

带机械臂的智能照护机器人的机械臂系统由关节电机、升降电机、末端夹具、位置传感器、驱动器、电机控制器和机械结构等组成，其布局如图 3 所示。多个关节电机组成一个 6 自由度机械臂，可实现 360° 运动，配合升降电机实现更大范围的自由抓取。升降结构采用精密直线滑轨，使用直流无刷伺服电机驱动，运行平稳，外部安装位置传感器，可以测量滑轨的位移。电机控制器根据位移信息实现电机闭环控制，从而满足升降控制要求。



图 3 智能照护机器人的机械臂系统布局

Fig.3 Mechanical arm transmission system of intelligent care robot

### 1.3 控制系统

带机械臂的智能照护机器人的控制系统由 X86 工控机、GPU 模组、域控制器、路由器、网络设备和 5G 网络等组成。其中，X86 工控机运行机器人操作系统，处理传感器融合、导航规划等任务；

GPU 模组处理摄像头、深度相机及人工智能等密集型运算；域控制器用于扩展多种传感器接口、驱动器接口，实现系统监测、电机控制、避障传感器控制等功能，并将数据实时上传到工控机；路由器、网络设备和 5G 网络组成高带宽通信网络，满足控制系统的高数据流通信需求。

域控制器集中了多种传感器接口和电机控制接口，实现了底盘电机驱动、电池管理系统（Battery Management System, BMS）、升降电机驱动、避障传感器驱动、惯性测量单元（Inertial Measurement Unit, IMU）数据处理、里程计融合及电源检测。因此，带机械臂的智能照护机器人具有多路 CAN 控制器局域网（Controller Area Network, CAN）总线、多路串口、RS232、RS485、通用输入等通信口，提供了丰富的扩展接口。

域控制器使用高性能 Cortex-M7 单片机，采用实时操作系统（Real-Time Operating System, RTOS），以实现分层设计，使上层应用完全独立于硬件平台开发，增强了系统的可移植性和软件模块的复用性，使应用设计的扩展更加丰富。其电路图如图 4 所示。

### 1.4 传感器系统

带机械臂的智能照护机器人的传感器系统由深度相机、激光雷达、惯性测量单元、超声波传感器、

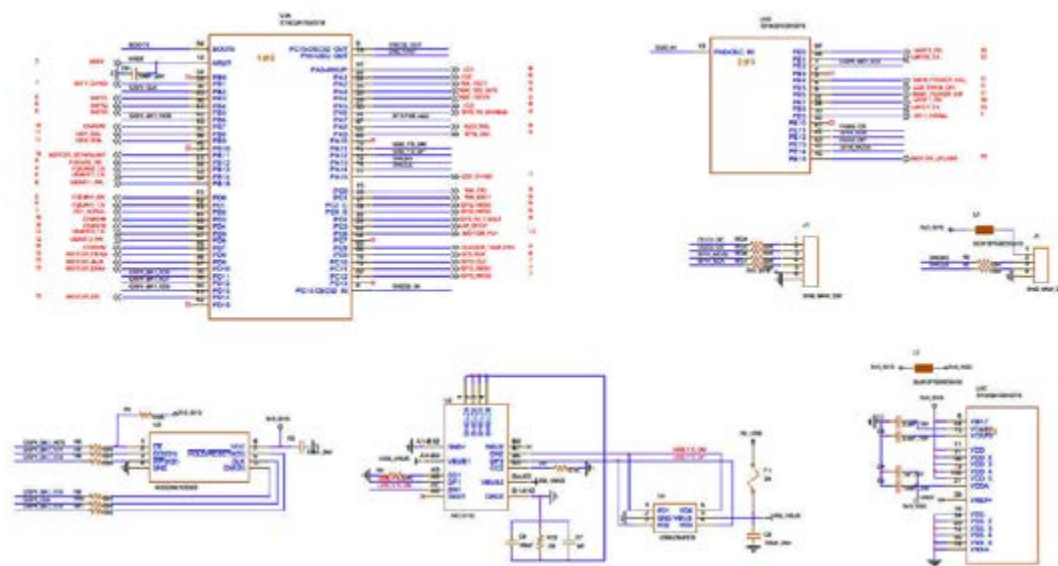


图 4 智能照护机器人的域控制器电路图

Fig.4 Domain controller circuit diagram of intelligent care robot

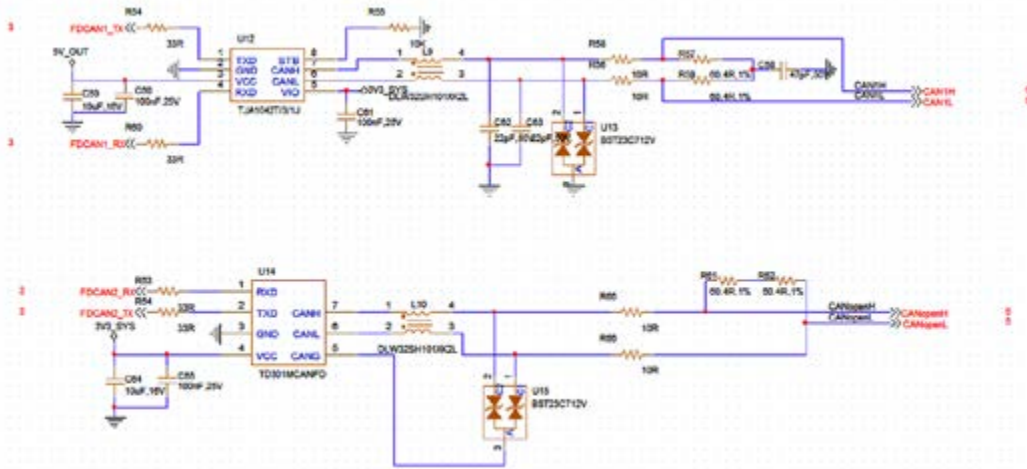


图 4 智能照护机器人的域控制器电路图 (续)

Fig.4 Domain controller circuit diagram of intelligent care robot (continued)

碰撞传感器、编码器等组成。机器人根据布置在其身上的不同传感元件对周围环境的状态进行实时测量，其中激光雷达、惯性测量单元、编码器是导航定位系统使用的主要传感器，这些传感器的稳定性是导航定位精确度的重要保证。惯性测量单元利用梯度下降算法将加速度计和陀螺仪进行融合，得到最优的机器人姿态数据。该算法适用于机器人系统，其优点是计算量小，低频下效果好。深度相机、超声波传感器、碰撞传感器组成避障传感器，提供远、中、近 3 层安全保护，极大地提高了机器人运行的安全性。

惯性测量单元选用 Bosch BMI088 高性能 IMU，该器件专门应用于无人机和机器人。该款 6 轴传感器在 3mm × 4.5mm × 0.95mm 小尺寸栅格阵列封装 (Land Grid Array, LGA) 中集成了 16 位三

轴陀螺仪和 16 位三轴加速度计。该惯性测量单元采用经过汽车验证的陀螺仪技术和全新的低温度系数偏移 (Temperature Coefficient of Output, TCO) 加速度计设计。经过汽车验证的陀螺仪具有无与伦比的偏置稳定性 (低于 2°/h) 和低于 15mdps/K 的 TCO<sup>[11]</sup>。惯性测量单元的其他特性包括 0.2mg/K 的低 TCO，以及在 ±24g 的极宽测量范围内具有仅  $230 \times 10^{-6} g/\sqrt{Hz}$  的低频谱噪声。借助 Bosch BMI088，即使在自然的高振动环境下，机器人也能轻松地进行精确的转向，从而改善飞行和导航体验。智能照护机器人的惯性测量单元电路图如图 5 所示。

### 1.5 交互系统

带机械臂的智能照护机器人的交互系统由麦克风阵列、降噪模块、数字音频功放、视频摄像头、

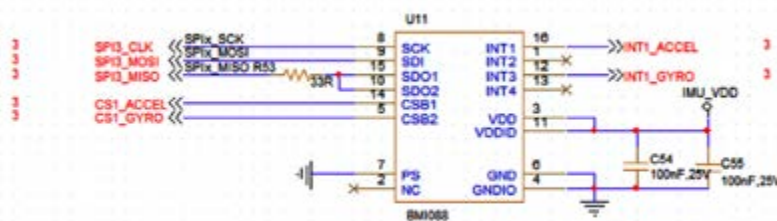


图 5 智能照护机器人的惯性测量单元电路图

Fig.5 Circuit diagram of inertial measurement unit for intelligent care robot

显示屏、头部关节电机和安卓系统主机等组成。麦克风阵列对远场干扰噪声具有很强的抑制作用，在较大噪声的环境中使用是能取得较好的效果，可为语言识别提供良好的信号来源。降噪模块基于数字信号处理（Digital Signal Processing, DSP）技术实现回声消除和降噪处理，可以有效解决机器人免提通话中的回音、啸叫及环境背景噪声大的问题，达

到优异的全双工通话效果。数字音频功放、视频摄像头、显示屏在远程交互和人机对话过程中提供双向输入输出功能，显示屏的模拟动画和头部关节的运动使交互更加生动形象。安卓系统主机可以保证音视频流和交互功能的流畅运行。智能护照机器人交互系统的数字音频功放电路图和数字音频降噪电路图分别如图6和图7所示。

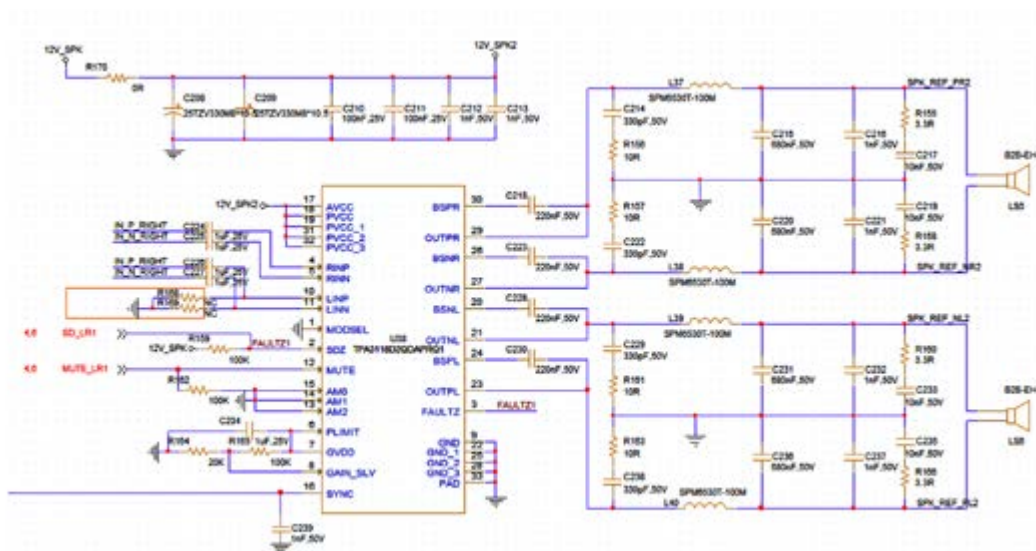


图6 智能照护机器人交互系统的数字音频功放电路图  
Fig.6 Circuit diagram of digital audio amplifier for intelligent care robot interaction system



图7 智能照护机器人交互系统的数字音频降噪电路图  
Fig.7 Circuit diagram of digital audio denoising for intelligent care robot interaction system

### 1.6 电源系统

带机械臂的智能照护机器人的电源系统由保护模块、滤波模块、电源模块、直流电转换模块、检测模块、温控散热模块等组成。机器人的各种子系统需要多种电压、功率等级，电源系统中各个模块在输出不同电压的同时，保护用电设备的安全。电源系统通过检测模块监测电源工作状态，温控散热

模块可以保证电源系统在最佳温度下实现最优运行效率。智能照护机器人的电源系统电路图如图8所示。

### 1.7 性能评估

在完成硬件设计后，本研究对带机械臂的智能照护机器人进行了性能评估。首先进行底盘系统评估，包括载重能力、行驶速度、驱动系统的控制精度、稳定性、转向、运动灵活性及续航能力等关键指标。

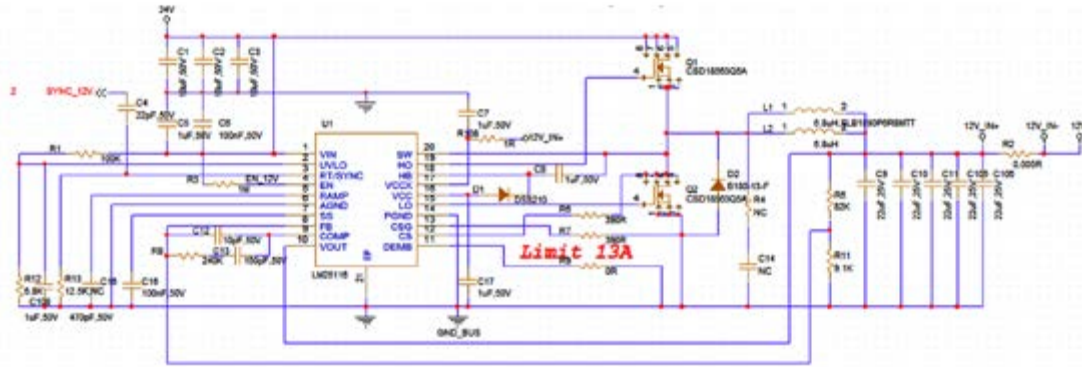


图8 智能照护机器人的电源系统电路图  
Fig.8 Power system circuit diagram of intelligent care robot

具体评估数据如表 1 所示。

表 1 底盘系统性能评估数据

Tab.1 Chassis system performance evaluation parameters		
指标	数值	备注
最大载重	100kg	—
最大速度	1.5m/s	—
加速度	2s	从静止到最大速度所需时间
电流环控制精度	0.01A	—
速度环控制精度	0.05m/s	—
位置环控制精度	0.00m	—
电机功率	200W	单个电机
电机效率	85%	—
平坦地面稳定性	高	无明显晃动，运行平稳
斜坡稳定性	中	能够应对中等斜坡（不高于20°），但较陡的斜坡存在一定风险
障碍物通过性	低	只能通过低矮（3cm）且小型的障碍物
最小转弯半径	0.5m	—
差速转向响应时间	0.2s	—
电池续航时间	8h	—
单次充电行驶里程	15km	—

实验结果表明，底盘系统在各项关键指标上均表现出色，尤其是在载重能力和行驶速度方面表现优异，能够满足智能照护机器人在复杂养老场景中的需求。同时，驱动系统的高控制精度和电机的高效率保证了底盘系统在运动过程中的平稳性与响应速度。通过悬挂结构的设计，底盘在不同地面条件下能够保持稳定，为整机提供了良好的运动基础。

本研究对机械臂系统的性能也进行了详细的评估，包括运动精度、负载能力、控制系统的响应速度、稳定性等关键指标。具体评估数据如表 2 所示。

表 2 机械臂系统性能评估数据

Tab.2 Mechanical arm system performance evaluation parameters

指标	数值	备注
机械臂自由度	6	
运动范围	全关节 360°	
升降行程	500mm	
负载能力	5kg	
关节电机位置精度	0.1°	
升降电机位置精度	0.01mm	
关节电机响应时间	0.1s	
升降电机响应时间	0.2s	
升降电机功率	150W	
升降结构稳定性	高	运行平稳，无明显晃动
控制系统闭环精度	高	实时反馈控制，误差较小

实验结果表明，机械臂系统在各项关键指标上均表现出色，尤其是在运动精度和负载能力方面表现优异，能够满足智能照护机器人在复杂操作场景中的需求。同时，关节电机、升降电机的高响应速度与高效率保证了系统在运动过程中的平稳性和准确性。通过精密的直线滑轨和高精度位置传感器的设计，机械臂在升降操作中能够保持稳定，为整机提供了良好的操作基础。

综上所述，底盘系统和机械臂系统为智能照护机器人提供了坚实的硬件支持，可以确保其在执行后续任务时具备卓越的自适应能力和高效的操作性能。

## 2 带机械臂的智能照护机器人的软件设计

带机械臂的智能照护机器人的核心软件架构由以下几部分组成。首先，利用自主建图导航技术，

机器人能够在老年人的活动区域内自动更新地图，确保准确和高效的服务。其次，结合视觉算法和机械臂，机器人可以在多环境下操作物品，提供个性化辅助。进一步地，借助基于 YOLOv8 模型的视觉检测功能和 MediaPipe 模型的手势识别功能，机器人可以实现人体跟随和自然的人机交互。

### 2.1 自主建图导航模块

#### 2.1.1 Cartographer 地图构建

如图 9 所示，Cartographer 算法架构主要由 3 部分构成：传感器数据输入、前端处理和后端处理。

在 Cartographer 算法中，激光雷达产生的点云数据首先经过体素滤波和合成自适应体素滤波进行数据压缩，以便进行后续处理<sup>[12]</sup>。同时，通过融合 IMU 和轮式里程计数据，位姿估计器为接下来的扫描匹配步骤提供初始位姿估计。

在扫描匹配的初步阶段使用相关性扫描匹配（Correlative Scan Matching, CSM）技术，实现了从激光雷达数据到地图的粗略匹配，从而估计出机器人在地图上的大致位置。在这一过程中，通过概率栅格算法，连续几帧的点云数据被用来构建子地图。每帧点云数据与最新生成的子地图进行匹配，

更新子地图中相应栅格点的概率值。当没有新的点云数据加入时，视为子地图优化完成。

在这一过程中，Ceres 库被用于点云位姿的优化，通过构建非线性最小二乘问题求解点云的精确位姿。前端处理得到的数据随后由后端进行全局优化，以确定所有子地图的最佳位姿。回环检测被用于消除累积误差。在这一阶段，分支定界算法被用于提高检测效率。最终，这些步骤共同作用于生成完整的环境地图。

总而言之，Cartographer 算法的集成使照护机器人在为老年人提供安全、准确和高效的照护服务时，具有更好的性能和可靠性。

#### 2.1.2 基于 SHS 算法的自主导航

在带机械臂的智能照护机器人的开发中，路径规划是一项关键的技术挑战，尤其是在多变和充满障碍的家庭环境中。这些环境要求机器人不仅能够安全高效地导航，还能够在保证精确性和可靠性的同时，灵活应对突发情况。传统的路径规划算法，如 Dijkstra 算法和 A\* 算法，虽然在开放和相对简单的空间中表现良好，但在狭窄或障碍密集的家庭环境中往往不足以满足照护机器人的需求<sup>[13]</sup>。

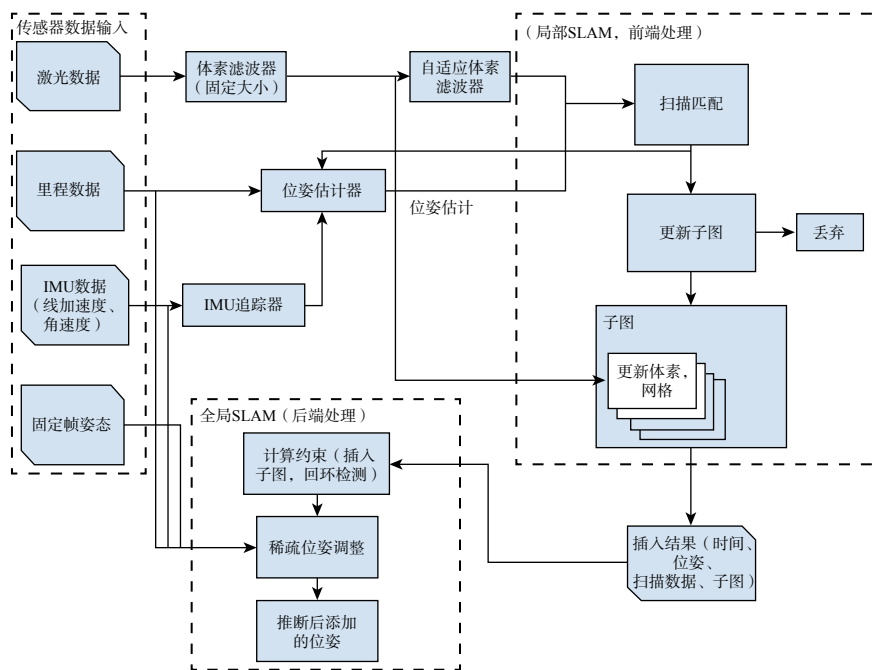


图 9 Cartographer 算法架构  
Fig.9 Cartographer algorithm architecture



具体来说, Dijkstra 算法在路径规划中被广泛应用, 因为其能够找到从起点到终点的最短路径。然而, 它没有考虑环境的具体结构和机器人的实际导航逻辑。因此, 在狭窄或障碍密集的空间, Dijkstra 算法常常规划出过于接近障碍物的路径, 增加了机器人执行任务的难度, 并可能引发安全问题。

A\* 算法在 Dijkstra 算法的基础上进行了改进, 加入了启发式函数以加速路径搜索, 从而提升路径规划速度。但是, 它存在与 Dijkstra 算法类似的问题, 尤其是在狭窄或障碍密集的区域。

此外, 激光雷达定位的机器人在探测近距离障碍时可能存在盲区, 影响定位精度和导航效率。在这些情况下, 机器人可能无法准确地感知周围环境的细节, 从而进一步增加了路径规划的难度和风险。

为了解决这些问题, 本研究提出了一种将栅格

地图与拓扑地图相结合的 SHS 算法。该算法首先分析现有栅格地图, 挑选关键节点形成拓扑地图, 从而创建一个融合了栅格特征和拓扑特征的综合地图。在该地图上, 通过搜索预定义的安全路径点, 并以这些点为局部目标进行分段路径规划, 机器人可以有效地找到一条穿过狭窄区域中心的安全路径。

SHS 算法的基本原理如下。首先通过 Cartographer 算法和多源 (如激光雷达、惯性测量单元、里程计) 数据生成二维栅格地图。在此基础上, 通过选取拓扑点建立拓扑图, 形成栅格 - 拓扑混合地图。考虑到栅格地图中最短路径可能导致机器人过于靠近障碍物, 如在狭窄的过道或门框区域, 本研究在狭窄的过道中心或门框中心线处设置了关键拓扑点以优化路径。如图 10 所示, 当起点和终点在同一房间内时, 直接采用 A\* 算法进行路径规划。

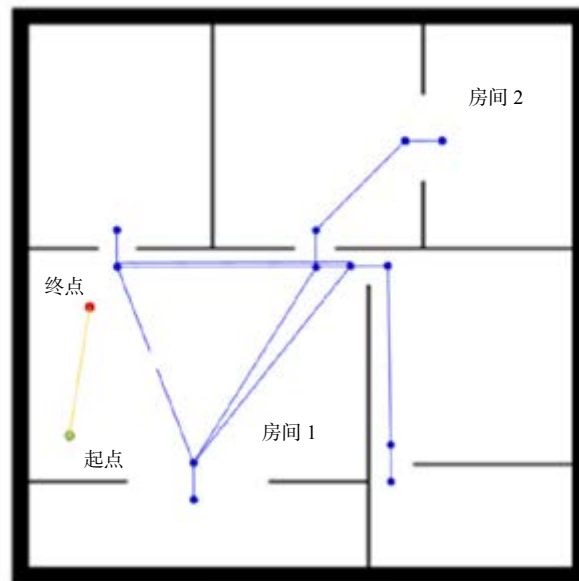


图 10 起点和终点位于同一房间内的路径规划

Fig.10 Path planning with starting and ending points located in the same room

如图 11 所示, 当起点和终点位于不同房间, 且要经过多个狭窄的门框时, 启用 SHS 算法。该方法先在拓扑地图上用 Dijkstra 算法搜索安全航路点序列, 再将这些点作为局部目标, 用 A\* 算法进行分段路径搜索。

SHS 算法的结构流程如图 12 所示。

## 2.2 基于 Y-GGCNN 的视觉检测抓取

机械臂设计用于协助老年人完成日常任务, 如拿取物品、开关房门、准备餐点等, 旨在识别和操作家居物品, 减轻老年人家人和护工的负担。对行动不便或自理能力减退的老年人而言, 机械臂可以显著提升他们的生活质量和活动自主性。

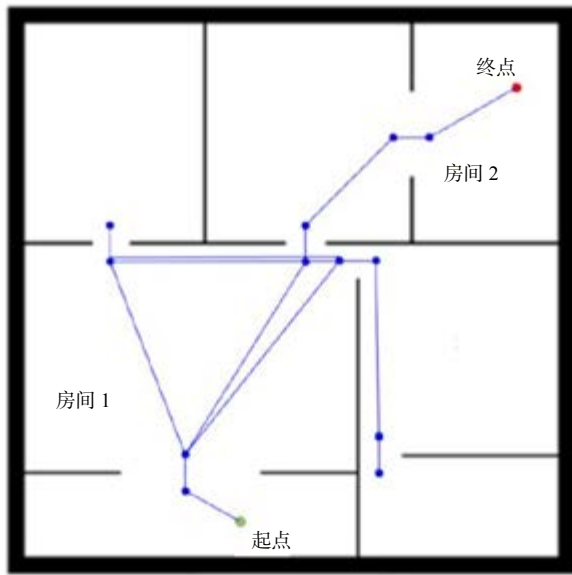


图 11 起点和终点位于不同房间的路径规划

Fig.11 Path planning with starting and ending points located in different rooms

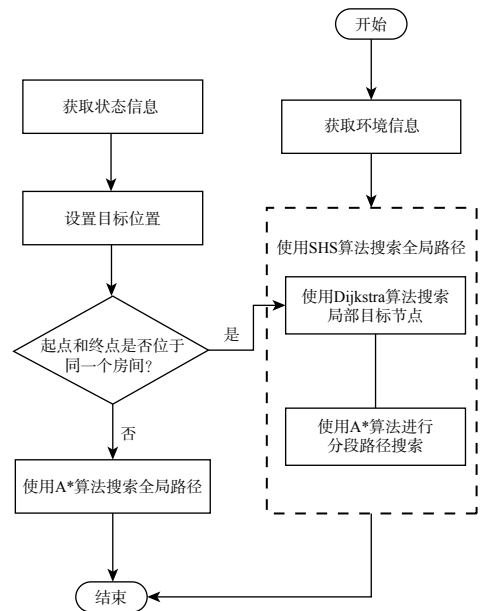


图 12 SHS 算法的结构流程

Fig.12 Structural flowchart based on SHS path planning

在视觉识别和物体抓取方面，通过优化生成抓取卷积神经网络（Generative Grasping Convolutional Neural Network, GG-CNN）并融合 YOLOv5 网络形成 Y-GGCNN，机械臂的物体识别能力得到显著增强，能为特定物体生成精准的抓取姿态。Y-GGCNN 的网络结构如图 13 所示。与传统深度学习抓取技术相比，Y-GGCNN 展现出了明显的优势。

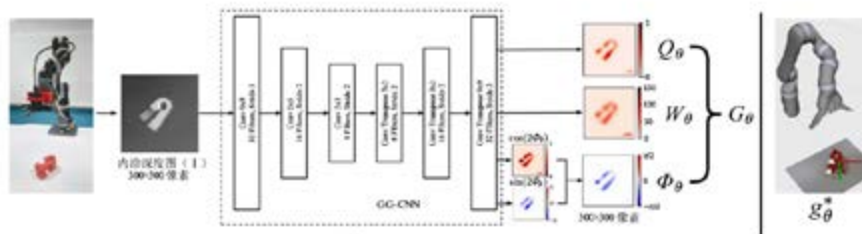
通过将 GG-CNN 和 YOLOv5 相结合，机械臂在复杂和动态环境中的识别能力与操作能力更加精确<sup>[14]</sup>，从而在提供日常生活辅助服务时变得更加精准和灵活，更好地满足老年人个性化和多样化的需求。

### 3 系统测试和应用

#### 3.1 测试平台

测试平台（带机械臂的智能照护机器人）如图 14 所示。它集成了多种高级传感器和模块，包括先进的激光雷达用于环境感知、惯性测量单元用于确保稳定的导航，以及高效能处理器用于数据处理和决策制定。

该机器人设计兼顾实用性、灵活性和模块化，适应家庭环境中的多样移动和操作需求。机械臂的加入进一步拓展了该机器人在护理方面的功能，如拿取物品和操作门等。基于机器人操作系统的软件系统提升了该机器人的模块化程度和可扩展性，赋



$Q_{\theta}$ —抓取质量； $W_{\theta}$ —抓取宽度； $\Phi_{\theta}$ —抓取角度； $G_{\theta}$ —抓取质量、抓取宽度和抓取角度的集合； $g_{\theta}^*$ —最终抓取姿态。

图 13 Y-GGCNN 的网络结构

Fig.13 Network architecture diagram of Y-GGCNN

予了其根据环境变化灵活适应的能力。

### 3.2 SLAM 建图测试

为了验证该机器人在社区养老场景中的建图效果，本研究进行了一系列实地测试。在多个典型的社区环境中，机器人被部署以执行建图任务，运用 Cartographer 算法处理激光雷达、惯性测量单元和里程计数据，生成高精度的栅格地图，如图 15 所示。该测试覆盖了不同类型的家庭布局，包括多种家具和空间配置，旨在评估算法在各种实际场景中的适应性和准确性。

通过图 15 的建图结果可以看出，Cartographer



图 14 测试平台（带机械臂的智能照护机器人）  
Fig.14 Testing platform (intelligent care robot with robotic arm)

在该 App 中，用户可以实时查看 Cartographer 算法生成的栅格地图。图 16 展示了该 App 中保存的栅格地图。

### 3.3 自主导航测试

在实验中，以 1 号和 2 号房间为例，设置机器人的起点和终点，并利用机器人操作系统中的 Navigation 包进行路径导航。使用 A\* 算法进行路径规划，优化前的路径如图 17 所示。在图 17 (a) 中，未对障碍物进行任何膨胀处理，导致规划的路径紧邻障碍物边缘。在图 17 (b) 中，由于障碍物膨胀半径过小，机器人在尝试通过门时路径离障碍物过近，受激光雷达盲区的影响，导致定位失败，无法顺利通过。在图 17 (c) 中，障碍物膨胀半径

算法能够有效地识别和映射出各类障碍物与空间布局。特别是在狭窄的通道和拥挤区域，机器人展现出了优秀的建图能力，地图的细节和精度均符合预期。此外，实验还测试了机器人在动态变化的环境中的建图性能。例如，在移动家具或不同光照条件下验证了机器人的鲁棒性和适应性。

同时，为了进一步提升用户友好性和操作便利性，本研究开发了一款手持端控制 App。该 App 允许用户直接参与机器人的自主建图和导航，提供直观的界面和易操作的功能，便于老年人及其家属实时监控和指导机器人的运动路径与状态。

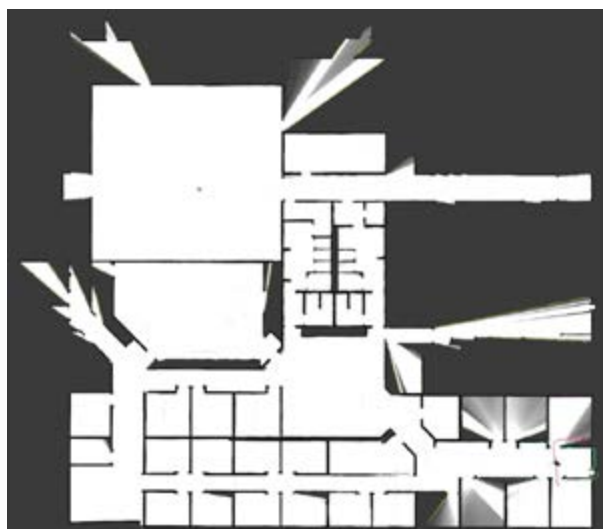


图 15 2D 栅格地图  
Fig.15 2D raster map

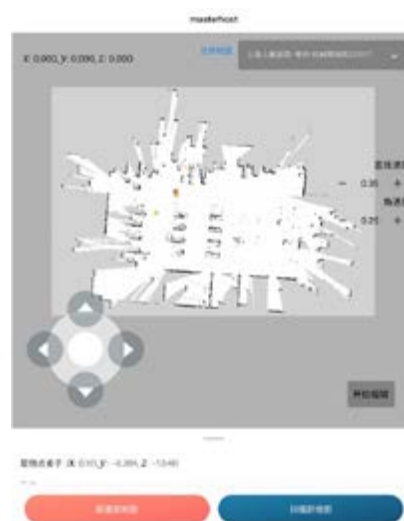


图 16 App 中保存的栅格地图  
Fig.16 Raster map in App

被设置得过大，机器人在面对宽度足够的门框时无法通过。在图 17 (d) 中，通过合理设置膨胀半径，机器人能够通过门，但路径并未沿门框中心线，存在一定的安全风险。

相比之下，SHS 算法通过在门框的中心线设置拓扑点，优化了机器人的导航路径，如图 18 所示。该算法结合了栅格地图的详细信息和拓扑地图的空

间布局，使机器人能够在避免碰撞的同时，高效地通过门，不仅提高了路径规划的安全性，还确保了机器人的运动更加符合实际的家庭环境需求，提升了其在社区养老场景中的实用性。

为了更全面地评估 SHS 算法与传统的 A\* 算法和 Dijkstra 算法在实际应用中的性能，本研究对比了三者实验场景中的表现。主要比较指标包括平

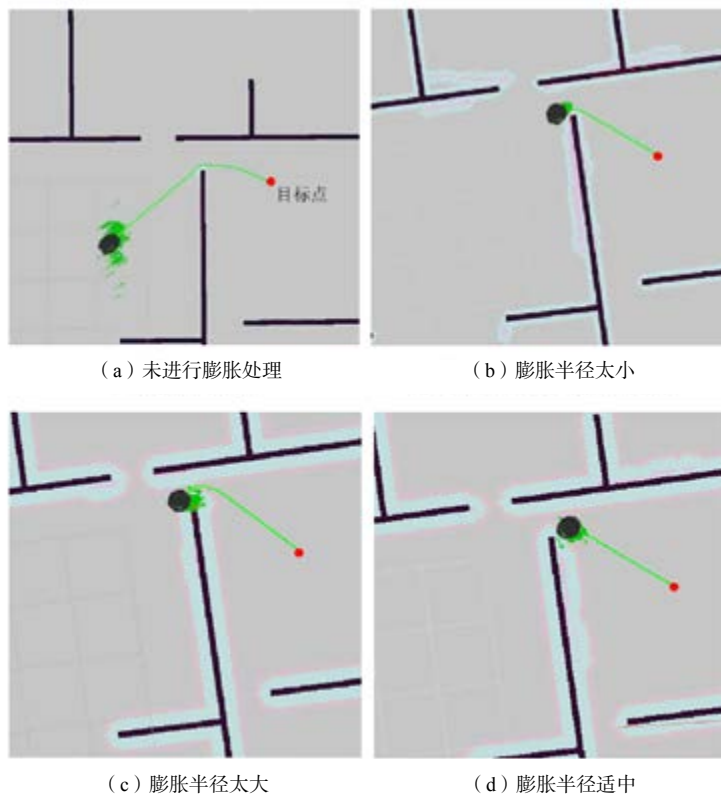


图 17 优化前的路径

Fig.17 Path before optimization

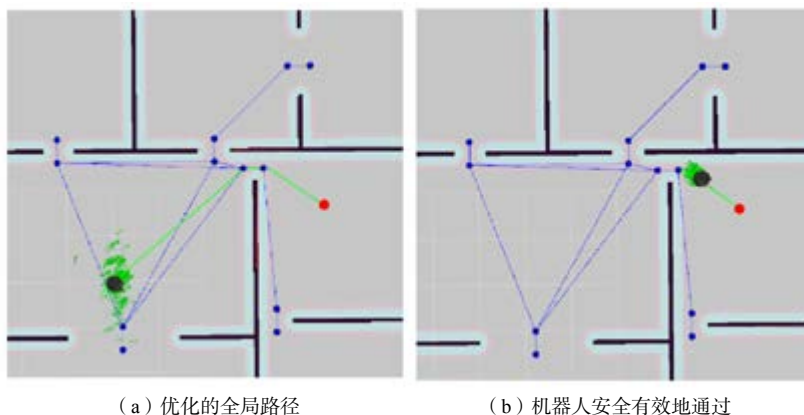


图 18 优化后的路径

Fig.18 Optimized path

均成功率、平均导航效率、平均路径长度、与门框的平均距离（避障能力），在同一起点和终点的条件下，每种算法运行10次，具体对比结果如表3所示。

通过对比分析发现，A\*算法和Dijkstra算法在狭窄或障碍密集的环境中表现不佳，平均成功率分别为70%和60%。主要是因为这两种算法在路径

规划中未能充分考虑环境的具体结构和机器人的实际导航逻辑，导致路径规划紧邻障碍物，增加了导航难度和导航失败的风险。而SHS算法通过在门框的中心线设置拓扑点，结合栅格地图的详细信息和拓扑地图的空间布局，显著提高了平均成功率，达到100%。

表3 不同算法的指标对比

Tab.3 Comparison of parameters for different navigation algorithms

指标	A* 算法	Dijkstra 算法	SHS 算法
平均成功率	70%	60%	100%
平均导航效率	35.6s	40.1s	30.8s
平均路径长度	12.1m	13.1m	11.5m
与门框的平均距离	5cm	4.3cm	10.5cm

A\*算法和Dijkstra算法在处理复杂环境时平均导航效率相对较低，分别为35.6s和40.1s。主要是因为这两种算法在路径规划过程中没有优化路径选择，导致路径规划时间较长。SHS算法优化了路径选择，能够快速找到安全且高效的路径，平均导航效率为30.8s，优于其他两种算法。

A\*算法与Dijkstra算法的平均路径长度分别为12.1m和13.1m。这两种算法在路径规划过程中没有充分考虑环境结构，导致路径较长。SHS算法通过合理设置拓扑点和优化路径选择，使路径长度达到11.5m，比其他两种算法更短。

在避障能力方面，A\*算法与Dijkstra算法在导航过程中与门框的平均距离分别为5cm和4.3cm，增加了碰撞风险和导航失败的概率。SHS算法通过在门框的中心线设置拓扑点，显著提高了避障能力，机器人与障碍物的平均距离达到10.5cm，保证了导航过程中的安全性。

综上所述，SHS算法在平均成功率、平均导航效率、平均路径长度、避障能力等方面均优于传统的A\*算法和Dijkstra算法。SHS算法结合了栅格地图的详细信息和拓扑地图的空间布局，使机器人能够在复杂的家庭环境中安全高效地导航，提升了其在社区养老场景中的实用性。SHS算法不仅提高了机器人导航的安全性和效率，也为智能照护机器人在实际应用中提供了可靠的技术支持。

### 3.4 机械臂视觉抓取测试

在本次测试中，重点验证了机械臂结合视觉系统进行物体抓取的效果。通过使用优化的GG-CNN和集成的YOLOv5视觉识别技术，机械臂展现出了卓越的物体识别和抓取能力。

本次测试在不同环境和多样化的物品上进行，包括日常生活中常见的小型物品，如胶带、厨具和工具用品等。机械臂首先使用YOLOv5识别物体，并结合GG-CNN生成精确的抓取点和姿态。在测试过程中，机械臂显示出了极高的识别准确率，并能够迅速、准确地调整抓取姿态，以适应不同形状和大小的物品。本次测试所用物品如图19所示。



图19 测试所用物品

Fig.19 Analysis of object grasping posture

测试结果如图 20 所示。由图可见，机械臂在抓取任务中的成功率极高，即使面对复杂的抓取场景和不规则形状的物品，也能保持稳定性和高效性。此外，机械臂的操作灵活性和适应性在本次测试中得到了充分验证，其能够准确无误地完成任

务。总体来看，机械臂视觉抓取测试结果非常好，充分证明了机械臂在实际应用中的高效性和可靠性。这为其将来在社区养老服务中的广泛应用提供

了坚实的技术基础。

### 3.5 用户体验评估

在完成了技术评估之后，本研究进一步对用户体验进行了评估，特别是对目标用户群体——老年人的易用性和接受度进行了评估。为此，本研究设计并实施了一系列用户体验评估活动，包括问卷调查、现场测试和深度访谈，以全面了解老年用户的使用体验。

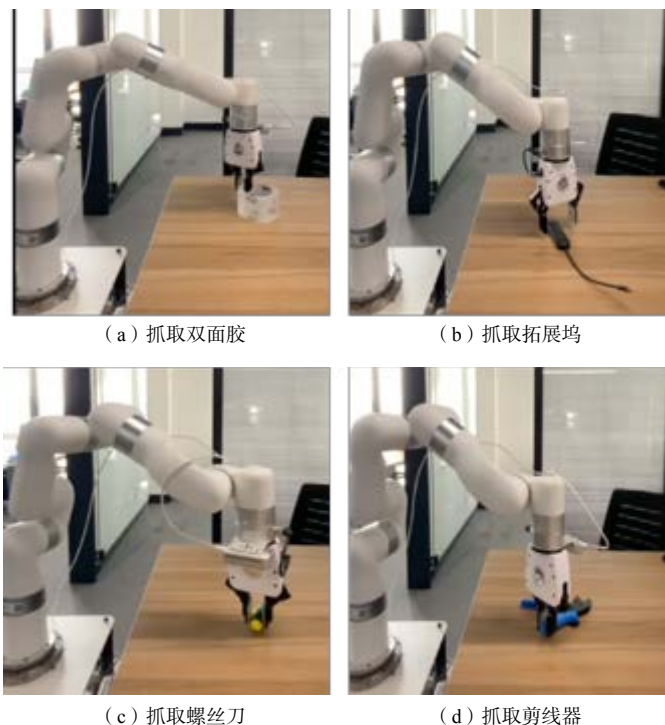


图 20 机械臂视觉抓取测试结果  
Fig.20 Mechanical robotic arm grasping

首先，通过问卷调查，收集老年用户对机器人功能、易用性和整体体验的反馈。问卷设计涵盖了操作简便性、功能满足度和日常使用意愿等关键问题。调查结果显示，大部分老年用户认为机器人操

作简便，功能能够满足他们的需求，且大多数用户愿意在日常生活中使用机器人。然而，仍有部分用户在操作上存在一定的困难，表明操作界面需要进一步优化。问卷调查结果如表 4 所示。

表 4 问卷调查结果  
Tab.4 Survey overview

问题	反馈结果
机器人操作是否简便	85% 的用户认为操作简便，15% 的用户认为有一定的困难
机器人功能是否满足需求	90% 的用户认为功能满足需求，10% 的用户认为需要改进
操作界面是否友好	75% 的用户认为操作界面友好，25% 的用户认为操作界面复杂
个性化设置功能是否足够	70% 的用户认为功能足够，30% 的用户希望增加更多选项
是否愿意在日常生活中使用	80% 的用户表示愿意，20% 的用户表示观望
是否有进一步培训的需求	85% 的用户希望有系统培训，15% 的用户认为不需要培训

其次，在社区养老中心和家庭环境中进行现场测试，观察老年用户在实际使用过程中的反应和操作情况。测试结果表明，绝大多数老年用户能够在短时间内掌握机器人的基本操作方法。在使用过程中，机器人在导航、物体识别与抓取方面表现出色。然而，一些用户在首次使用时对机器人发出的语音指令不够熟悉，需要进一步改进人机交互界面的友好性。

最后，通过深度访谈，收集参与测试的老年用户对机器人使用感受的详细意见和建议。在访谈中，老年用户普遍对机器人的智能化和功能性表示认可，但也提出了一些改进建议，包括：使操作界面更加简洁直观，减少复杂的按钮和选项；提高语音识别的准确性，提供多语言支持和更自然的语音交流；增加个性化设置选项，使机器人能够根据不同用户的需求和偏好进行调整。这些反馈为进一步改进机器人系统提供了宝贵的参考。

通过用户体验评估，我们了解到，虽然机器人在技术层面表现出色，但在用户界面和交互方面仍有改进空间。为改善老年用户的使用体验，建议简化操作界面，使用更大、更明显的按钮和图标，方便老年用户操作；提升语音识别技术，支持多种方言和口音，提供更自然的语音交互体验；开发个性化服务功能，根据用户的使用习惯和需求进行定制化设置，提高用户的满意度和接受度。此外，还应在社区养老中心和家庭中提供系统的使用培训，帮助老年用户快速熟悉和掌握机器人的操作方法，提升用户体验。

## 4 结论与展望

### 4.1 结论

本研究在老龄化和技术发展的背景下，设计并实现了一款集成多种人工智能技术的机械臂照护机器人，针对社区养老的需求提供了创新的解决方案。

通过集成和应用一系列先进算法，本研究显著提升了社区照护机器人的性能和效率。不同的核心技术（如使用 Cartographer 算法实现 SLAM 功能、使用 SHS 算法进行自主导航，以及使用 Y-GGCNN 进行物体姿态分析和精确抓取）共同构成了机器人的技术框架。这些技术的综合运用使机器人在执行

社区照护任务时，不仅能适应复杂的环境，还能以更高的效率和精确性完成任务。

在实验测试中，本研究进行了多项具体实验来验证这些集成算法在真实世界环境中的有效性。例如，在自主导航测试中，通过模拟家庭环境中的路径规划任务，验证了 SHS 算法的优越性，它显著提高了机器人的导航效率和成功率。在物体抓取实验中，利用 Y-GGCNN 和 YOLOv5 视觉识别技术，机器人在识别和抓取多种日常物品时表现出色，抓取成功率达到 95%。此外，通过 SLAM 功能测试，验证了 Cartographer 算法在复杂环境中的 SLAM 能力，有效提高了机器人的操作精度和响应速度。实验测试结果验证了这些集成算法在真实世界环境中的有效性，表明机器人在操作精度和响应速度方面有了显著提升。这些成果不仅体现了机器人技术在社区养老领域的应用潜力，也为老龄化社会提供了一种高效、智能的照护方式。

综上所述，本研究的成果为社区养老服务领域带来了创新和实用的技术应用，为未来在该领域的进一步研究和开发奠定了坚实的基础。未来的工作将聚焦于进一步优化这些算法和技术，扩大其应用范围，以更好地服务社会和老年人群体。

### 4.2 展望

虽然本研究在社区养老机器人技术方面基本达到预期的目标，但仍存在一些不足和需要改进之处。以下是对未来工作的展望。

#### 4.2.1 算法优化

尽管 SHS 算法和 Y-GGCNN 在测试中表现优异，但在更复杂和动态变化的环境中，SHS 算法的鲁棒性和效率仍有待进一步提高。未来的研究将致力于优化这些算法，以提升机器人的环境适应能力和导航效率。

#### 4.2.2 多传感器融合

当前的系统主要依赖激光雷达和视觉传感器。未来可以考虑集成更多类型的传感器（如超声波传感器、惯性测量单元等），通过多传感器数据融合提高机器人感知环境的准确性和可靠性。

#### 4.2.3 人机交互

为了更好地服务老年人，机器人的人机交互能

力需要进一步提升。未来将探讨如何通过自然语言处理和语音识别技术,使机器人能够与使用者进行更加自然和流畅的交流。

#### 4.2.4 大规模应用测试

本研究中的实验主要在实验室和模拟家庭环境中进行。未来将进行大规模的实际应用测试,评估机器人在真实社区养老场景中的表现,并根据反馈进行进一步改进。

通过这些改进和扩展,相信社区养老机器人将能够更好地满足老年人的多样化需求,提供更高效、更智能的照护服务,推动老龄化社会的发展进程。

#### 参考文献

- [1] 汪伟. 中国人口老龄化发展趋势与应对[J]. **团结**, 2023(3): 34-37.  
WANG Wei. China's population aging development trend and response[J]. **Unity**, 2023(3): 34-37.
- [2] 陶涛, 金光照, 郭亚隆. 中国老年家庭空巢化态势与空巢老年群体基本特征[J]. **人口研究**, 2023, 47(1): 58-71.  
TAO Tao, JIN Guangzhao, GUO Yalong. The trend of empty nest in Chinese elderly families and the basic characteristics of empty nest elderly population[J]. **Population Research**, 2023, 47(1): 58-71.
- [3] 侯春阳. 助老服务机器人及其运动控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2011.  
HOU Chunyang. Research on elderly care service robots and their motion control[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2011.
- [4] 张腾飞. 基于激光SLAM移动护理机器人导航控制系统研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2019.  
ZHANG Tengfei. Research on navigation control system of laser slam mobile nursing robot[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2019.
- [5] YASUDA S, KUMAGAI T, YOSHIDA H. Safe and efficient dynamic window approach for differential mobile robots with stochastic dynamics using deterministic sampling[J]. **IEEE Robotics and Automation Letters**, 2023, 8(5): 2614-2621.
- [6] XIONG Y, PING C, KANGWEN Z, *et al.* Dynamic path planning of AGV based on kinematical constraint A\* algorithm and following DWA fusion algorithms[J]. **Sensors (Basel, Switzerland)**, 2023, 23(8):4102.
- [7] ZHANG H X, TAO Y D, ZHU W L. Global path planning of unmanned surface vehicle based on improved A-star algorithm[J]. **Sensors**, 2023, 23(14): 6647.
- [8] WANG H W, LOU S J, JING J, *et al.* The EBS-A\* algorithm: an improved A\* algorithm for path planning[J]. **PloS One**, 2022, 17(2): e0263841.
- [9] LI Y B, WANG Z X, ZHANG S Y. Path planning of robots based on an improved A\* algorithm[C]// 2022 IEEE 5th Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC). Shenzhen: IEEE, 2022: 826-831.
- [10] FU B, CHEN L, ZHOU Y, *et al.* An improved A\* algorithm for the industrial robot path planning with high success rate and short length[J]. **Robotics and Autonomous Systems**, 2018(106): 26-37.
- [11] 刘晓君. 无人驾驶多传感器集成及定位算法硬件加速平台设计与实现[D]. 武汉: 华中师范大学, 2020.  
LIU Xiaojun. Design and implementation of hardware acceleration platform for multi sensor integration and positioning algorithm in autonomous driving[D]. Wuhan: Huazhong Normal University, 2020.
- [12] 徐淑萍, 杨定哲, 房嘉翔, 等. 一种改进 Cartographer 算法的建图方法研究[J]. **激光杂志**, 2024, 45(10): 86-93.  
XU Shuping, YANG Dingzhe, FANG Jiexiang, *et al.* Research on an improved cartographer algorithm for mapping method[J]. **Laser Magazine**, 2024, 45(10): 86-93.
- [13] 杨国, 吴晓, 肖如奇, 等. 改进 A\* 算法的安全高效室内全局路径规划[J]. **电子测量与仪器学报**, 2024, 38(7): 131-142.  
YANG Guo, WU Xiao, XIAO Ruqi, *et al.* Improved A\* algorithm for safe and efficient indoor global path planning[J]. **Journal of Electronic Measurement and Instrumentation**, 2024, 38(7): 131-142.
- [14] 闫贺, 黄佳, 李睿安, 等. 基于改进快速区域卷积神经网络的视频 SAR 运动目标检测算法研究[J]. **电子与信息学报**, 2021, 43(3): 615-622.  
YAN He, HUANG Jia, LI Rui'an, *et al.* Research on video SAR moving object detection algorithm based on improved fast region convolutional neural network [J]. **Journal of Electronics and Information Technology**, 2021, 43(3): 615-622.