

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108436

机器人轮椅用户行为与自主导航动态共享控制方法*

高翔^{1,2} 孟子晗^{1,2} 徐国政^{1,2} 王强^{1,2} 谭彩铭^{1,2}

(1.南京邮电大学自动化学院、人工智能学院 南京 210023; 2.南京邮电大学机器人信息感知与控制研究所 南京 210023)

摘要: 机器人轮椅人机交互研究表明长时间采用单一模式交互容易导致用户操作意图误判且稳定性会变差,完全自主模式亦会因用户缺乏控制体验而产生沮丧情绪。针对当前基于人机协作的机器人轮椅交互存在模式间硬切换与缺乏对环境变化的动态调整能力的问题,本文以手势交互控制轮椅为基础,提出一种基于用户行为与自主导航相结合的机器人轮椅动态共享控制方法。首先基于 Leap Motion 传感器追踪用户掌心坐标,生成用户手势速度指令;其次,基于 RPLIDAR A1 激光雷达传感器并结合自主导航算法,生成自主导航控制指令;最后基于距离、疲劳及误差等多种约束条件实时更新人-机控制指令权重,实现对机器人轮椅的动态共享控制。实验结果表明,本文所提动态共享控制方法能根据轮椅运行环境与用户操作性能动态调整不同模式间的角色分配,避免了不同模式间的直接硬切换,具有较好的用户体验。

关键词: 机器人轮椅;用户行为;自主导航;动态共享;人机交互

中图分类号: TP242;TH9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Robotic wheelchair interactive control via dynamic sharing gesture with navigation

Gao Xiang^{1,2} Meng Zihan^{1,2} Xu Guozheng^{1,2} Wang Qiang^{1,2} Tan Caiming^{1,2}

(1. College of Automation & College of Artificial Intelligence, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;

2. Robotics Information Sensing and Control Institute, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: Studies of robot wheelchair human-robot interaction have shown that long-term use of a single mode of interaction can easily lead to misjudgment of user operation intentions and decrease of control stability. The complete autonomous mode can also cause people frustration due to the lack of user control experience. Aiming at the problems of hard mode switching and lack of dynamic adjustment ability to environmental changes in the existing robot wheelchair interaction based on human-robot cooperation, this paper uses the gesture interactive control and proposes a robot wheelchair dynamic shared control method based on the combination of user behavior and autonomous navigation. Firstly, the user's palm coordinates are tracked based on the Leap Motion sensor to generate the user's gesture speed command. Secondly, the autonomous navigation control command is generated based on RPLIDAR A1 lidar sensor and autonomous navigation algorithm. Finally, the weight of human-robot control command is updated in real time based on various constraints such as distance, fatigue and error, so as to realize the dynamic shared control of robot wheelchair. The experimental results show that the dynamic shared control method can dynamically adjust the role allocation between different modes according to the wheelchair operating environment and user operating performance, avoid the direct hard switching between different modes, and has a better user experience.

Keywords: robotic wheelchair; user behavior; autonomous navigation; dynamic shared control; human-robot interaction

0 引言

社会老龄化及各种灾难、疾病、事故等造成的下肢运动

功能障碍与残障人士日渐增加,如何开发适用于上述人群的代步工具,已成为近年来社会各界普遍关注的问题。机器人轮椅作为一种典型的智能移动服务机器人,除了具备

收稿日期:2021-11-24

* 基金项目:江苏省自然科学基金(BK20210599)、江苏省博士后科研项目(2019K030)、江苏省高等学校自然科学研究面上项目(20KJB510023)资助

普通电动轮椅的运动及控制功能外,还兼具了移动机器人的自主导航与避障等功能,已经成为了近年来国内外相关研究机构的研究热点^[1-2]。

传统电动轮椅主要使用操纵杆进行控制,但是该方式对于肢体有障碍的用户来说难以实现。研究表明,10%的用户在使用操纵杆控制轮椅时需要帮助,约 40%的用户在使用操纵杆进行转向和控制任务时会遇到困难^[3]。为解决操纵杆控制的不足,研究者们开发了基于用户语音^[4]、手势^[5]、头姿^[6]、舌尖^[7]及生物电信号^[8-9]的机器人轮椅交互控制方式,取得了一定的效果,但是用户长时间基于单一模式操控轮椅,会使用户产生疲劳和肌肉酸痛,进而导致用户操作稳定性变差与意图误判。

为克服单模控制方式的不足,基于人机协作的多模共享控制方式成为了近年来机器人轮椅人机交互领域的研究热点^[10-11],其控制的关键在于如何将用户行为指令与机器人轮椅自主导航指令进行融合。文献[12]提出了一种针对轮椅控制器的模糊推理系统,用于改善轮椅跟踪行为与应急行为间的切换特性,优化了不同行为模式间切换的速度和响应时间;文献[13]提出了一种基于触觉反馈的电动轮椅共享控制方法,实现了基于触觉反馈的用户意图预测、辅助用户避障及人机决策间的协调;文献[14]提出了一种基于轮椅的低复杂度感知共享控制系统,通过基于传感器的共享控制率,纠正轮椅运行轨迹,减少与避免碰撞发生。上述不同类型人机协作模式在机器人轮椅控制方面取得了积极的效果,但仍存在不足。切换类型的人机协作是早期的一种共享控制方法,在不同模式之间进行硬切换,会导致行驶过程中产生不必要的间断;触觉反馈类型的人机协作控制,其用户指令直接由触觉装置发送给机器人轮椅;线性组合类型人机协作模式,人-机控制指令的权重系数固定,不能随驾驶环境改变而改变,有一定的安全隐患。

为保证用户驾驶轮椅的安全性与连续性,同时尽可能地让用户参与到控制任务中,锻炼用户的控制技能,本文面向机器人轮椅交互控制,以手势控制为例,提出了一种用户行为与自主导航结合的动态共享控制方法。首先基于 Leap Motion 传感器追踪用户掌心坐标,生成用户手势速度指令;其次,基于 RPLIDAR A1 激光雷达传感器并结合自主导航算法,生成自主导航控制指令;最后基于距离因素、疲劳因素及误差因素等多种约束条件实时更新人-机控制指令权重,实现对机器人轮椅的动态共享控制。

1 机器人轮椅人机交互控制方式

1.1 基于 Leap Motion 的手势交互控制方式

基于 Leap Motion 的手势控制方式,是通过 Leap Motion 人体追踪传感器实时追踪手部掌心坐标并生成速度指令信息来实现的。其手势交互控制方式流程如图 1 所示。

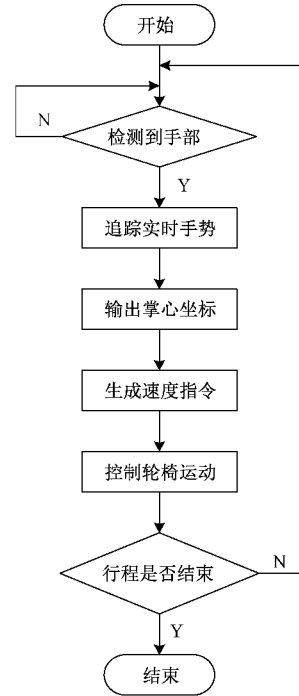


图 1 手势交互控制方式流程

首先通过 Leap Motion 传感器获取用户手部姿态,其手势模型如图 2 所示,然后追踪手部姿态,获取实时掌心坐标 (x, y) 。根据式(1)、(2)得到机器人轮椅线速度 v 、角速度 ω 信息。其中 R 为轮椅驱动轮半径, L 为轮椅驱动轮轴距。运动控制模块将接收的速度指令根据轮椅的运动学模型^[15]分解发送到每个电机上,通过底层 PID 控制器调速最终完成轮椅的运动任务。

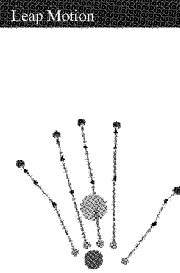


图 2 手部模型

$$\begin{cases} nl = 2 \cdot (4x + y) \\ nr = 2 \cdot (4x - y) \end{cases} \begin{cases} vl = \frac{nl}{30} \cdot R \cdot \pi \\ vr = \frac{nr}{30} \cdot R \cdot \pi \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} wc_v = \frac{vr - vl}{L} \\ wc_w = \frac{vr + vl}{2} \end{cases} \begin{cases} v = \frac{wc_v}{32} \\ w = \frac{wc_w}{32} \end{cases} \quad (2)$$

1.2 基于 RPLIDAR A1 的自主导航控制方式

机器人轮椅自主导航系统框图如图 3 所示。通过 RPLIDAR A1 传感器扫描环境信息,建立地图;在全局环

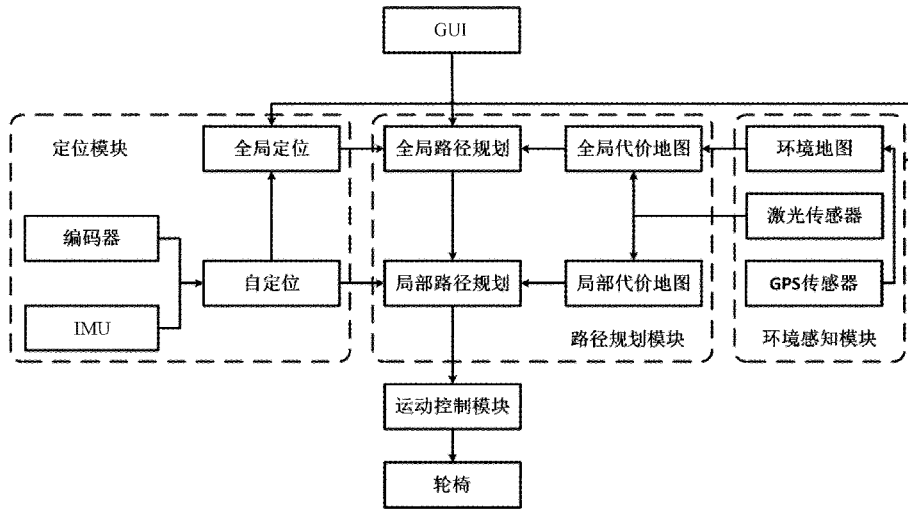


图3 机器人轮椅自主导航系统框图

境地图中对轮椅进行全局定位;获取目标点坐标,生成全局路径,不断优化局部路径,最后生成速度控制指令,控制轮椅运动。

2 机器人轮椅共享控制方法

本文的机器人轮椅共享控制采用的是以手势控制方式为例的用户行为和机器人轮椅自主导航方式相融合,共同控制轮椅运动的策略:

$$U(v, \omega) = kU(v_h, \omega_h) + (1-k)U(v_r, \omega_r) \quad (3)$$

其中, $U(v, \omega)$ 为最终发送至底层驱动器的速度信息, $U(v_h, \omega_h)$ 为用户指令速度信息, $U(v_r, \omega_r)$ 为自主指令速度信息, k 为人为控制方式的控制权重系数,由机器人轮椅与障碍物距离、用户疲劳程度、用户控制呈现的轨迹平滑度等因素决定, $1-k$ 为机器人轮椅自主指令的控制权重系数。根据多种约束条件动态更新人-机指令权重系数,实现机器人轮椅的动态共享控制。

2.1 距离因素权重系数 k_d

通过激光雷达扫描机器人轮椅周围环境信息,获取机器人轮椅距障碍物的最短距离 d ,并参照式(4)动态更新距离因素权重系数 k_d :

$$\begin{cases} k_d = 0, & d \leq 0.2 \\ k_d = \log_{2.5}(d+1), & 0.2 < d < 1.5 \\ k_d = 1, & d \geq 1.5 \end{cases} \quad (4)$$

当用户控制轮椅即将撞到障碍物, d 小于最短安全距离 0.2 m 时, k_d 为 0, 用户交出控制权, 机器人轮椅自主避障。轮椅距离障碍物越远, 越便于避障, 用户指令权重系数越大; 轮椅距离障碍物越近, 越不便于避障, 用户指令权重系数越小; d 大于安全距离 1.5 m 时, k_d 为 1, 用户掌握控制权, 控制轮椅运动。

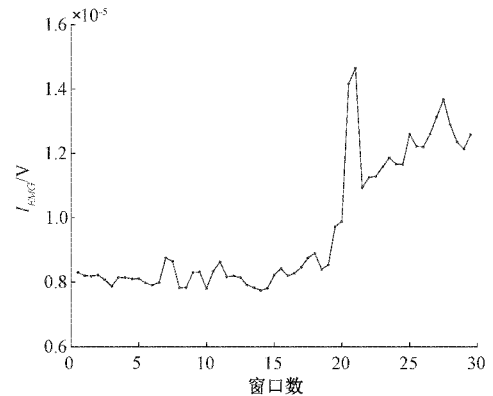
2.2 疲劳因素权重系数 k_f

在通过手势交互控制方式控制轮椅运动时, 采集用户

掌心肌肉实时肌电信号, 共采集 3 组数据, 每隔 10 min 采集一组, 每组数据的采集时间为 30 s。对采集得到的肌电信号进行去噪, 以 500 点作为步长, 1 000 点作为窗口长度, 进行重叠率为 50% 的滑动窗口计算, 参照式(5)得出积分肌电值 I_{EMG} 。

$$I_{EMG} = \int_t^{t+T} |x(t)| dt \quad (5)$$

如图 4 所示, I_{EMG} 随窗口数变化趋势图, 由图 4 可知用户控制轮椅时间越长, 积分肌电值越高。研究表明^[16], 用户手部肌肉积分肌电值越高, 用户越疲劳。

图4 I_{EMG} 随窗口数变化趋势图

参照式(6), 根据用户手部实时积分肌电值动态更新疲劳因素权重系数 k_f :

$$k_f = \frac{5}{I_{EMG} \cdot 10^6} \quad (6)$$

其中, I_{EMG} 为用户的实时积分肌电值。 I_{EMG} 越大, 用户疲劳感越强, k_f 越小, 分配给用户的控制权越少; I_{EMG} 越小, 用户疲劳感越弱, k_f 越大, 分配给用户的控制权越多。

2.3 平滑度因素权重系数 k_s

取一个滑动窗口, 实时获取前一段时间轨迹数据, 如

图 5 所示,每次等间距取上段轨迹的 3 个点 a, b, c , 拟合成曲线 $y = f(x)$, 使用中间的 b 点处的曲率作为该曲线的曲率估计, 从而得出上段时间轨迹的平滑度, 如果用户控制的平滑度理想, 平滑度因素权重系数 k_s 增高, 用户得到更多的控制权; 反之, 则降低用户的控制权。

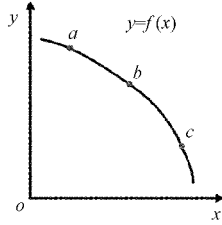


图 5 前段轨迹离散点拟合的曲线

曲线的直角坐标方程是 $y = f(x)$, 参照曲率公式, 有:

$$Q = \frac{|y''|}{(1+y'^2)^{3/2}} \quad (7)$$

$$r = \frac{1}{Q} \quad (8)$$

其中, Q 为该段曲线在 b 点处的曲率, r 为该段曲线在 b 点处的曲率半径。参照式(9), 根据用户控制轮椅生成的实时轨迹曲率半径更新平滑度因素权重系数 k_s :

$$\begin{cases} k_s = \frac{\ln(\rho + 1)}{2}, & 0 < r \leq 6.389 \\ k_s = 1, & r > 6.389 \end{cases} \quad (9)$$

r 越小, 曲线越不平滑, k_s 越小; r 越大, 曲线越平滑, k_s 越大。当 $r > 6.389$ m 时, k_s 为 1。

2.4 人-机控制指令权重系数

用户指令控制权重系数 k 主要由机器人轮椅距附近障碍物的距离因素 k_d 、用户的疲劳因素 k_f 、用户控制呈现的轨迹平滑度因素 k_s 来决定:

$$\begin{cases} k = a \cdot k_d + b \cdot k_f + c \cdot k_s \\ a + b + c = 1 \end{cases} \quad (10)$$

根据约束条件的重要程度给 k_d, k_f, k_s 的比例系数 a, b, c 赋值, 经过反复调参, a 取 0.45, b 取 0.32, c 取 0.23, 线性组合多约束条件权重系数, 得到最终的用户指令控制权重系数 k , 机器人轮椅自主控制方式指令的权重系数为 $1 - k$ 。

3 实验结果与分析

3.1 仿真实验与分析

为了验证本文提出的共享控制方法中各约束条件及其权重系数设计的合理性, 选取了仿真环境进行实验验证。仿真实验系统由 Ubuntu 操作系统结合 ROS 机器人操作系统组成, 选择 ROS 中的 Stage 作为我们的仿真平台。仿真实验场景如图 6 所示, 通过前文共享控制算法相融合的共享控制方式控制轮椅运动, 仿真实验图中圆圈代表轮椅, 起始点为 A 点, 目标点为 B 点。

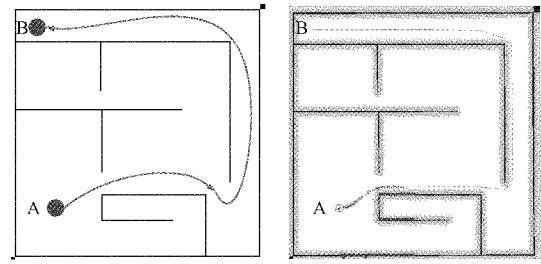
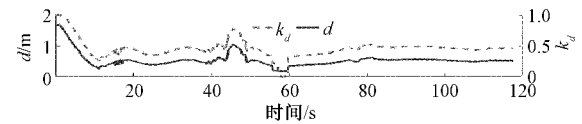


图 6 仿真实验场景图

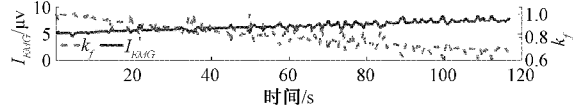
用户控制轮椅行驶过程中通过仿真环境里的 *laser_scan* 实时采集安全距离 d , 计算安全距离权重系数 k_d , 通过肌电采集设备采集实验者手腕部肌肉实时肌电信号, 计算积分肌电值 I_{EMG} 和疲劳因素权重系数 k_f , 通过仿真环境里的 *odom* 采集轮椅轨迹坐标, 计算曲率半径 r 和平滑度因素权重系数 k_s , 线性组合 k_d, k_f 和 k_s , 得到最终的用户指令权重系数 k 的值, 线性组合人机控制指令, 得到最终的共享控制速度信息, 记录并分析以上数据的变化情况。如图 7 所示为共享控制过程中各权重系数的变化情况, 下面就多种约束条件的权重系数实验结果作详细分析。

1) 距离因素权重系数 k_d

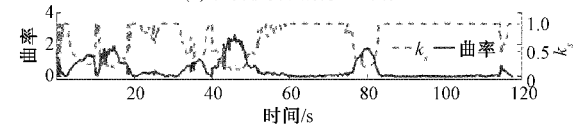
图 7(a) 所示为用户控制轮椅运动时权重系数 k_d 随着最短距离 d 变化时对应的变化情况, 图中表明, 轮椅距离障碍物越远, 用户指令权重系数越大; 轮椅距离障碍物越近, 用户指令权重系数越小, 参考图 7 中经历的路径所示, 当轮椅运行到 $d < 0.2$ m 的位置时, 所得 k_d 为 0, 满足预期效果。



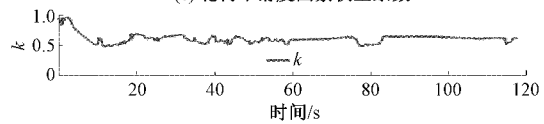
(a) 轮椅距离因素权重系数



(b) 轮椅疲劳因素权重系数



(c) 轮椅平滑度因素权重系数



(d) 轮椅最终人为控制指令权重系数

图 7 权重系数验证图

2) 疲劳因素权重系数 k_f

图 7(b) 所示为用户控制轮椅运动时权重系数 k_f 随着实时积分肌电值 I_{EMG} 变化时对应的变化情况, 图中表明,

用户控制轮椅时间逐渐增加,用户疲劳感逐渐增强,用户指令权重系数逐渐变小,分配给用户的控制权也渐渐降低,满足预期效果。

3) 平滑度因素权重系数 k_s

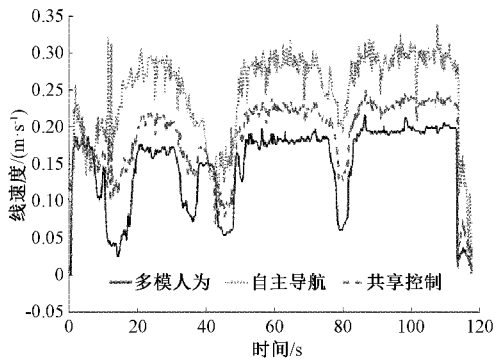
图 7(c) 所示为用户控制轮椅运动时权重系数 k_s 随着实时轨迹曲率大小变化时对应的变化情况,图中表明,用户控制轮椅轨迹越不平滑,分配给用户的控制权越小;用户控制轮椅轨迹越平滑,分配给用户的控制权越大,满足预期效果。

4) 最终的人为控制指令权重系数 k_f

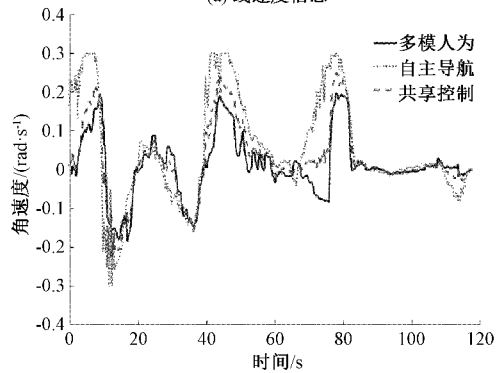
综合以上 3 种约束条件形成的权重系数,线性组合 k_d 、 k_f 和 k_s , 得到最终的人为控制指令权重系数 k , 图 7(d) 所示为最终用户指令权重系数 k 验证图,满足预期效果。

5) 速度指令分析

如图 8 所示为通过共享控制方式控制轮椅运动过程中,手势控制、自主导航和共享控制方式的速度指令信息的变化情况,综合图 7 中权重系数 k 值的变化,可见共享控制角速度与线速度的曲线夹于自主导航与多模人为曲线之间,相对适中、平缓。在简单环境中,用户控制指令权重系数较大,在复杂环境中,逐渐削弱用户指令权重系数,用户指令大部分时间占据主导地位,满足预期效果。



(a) 线速度信息



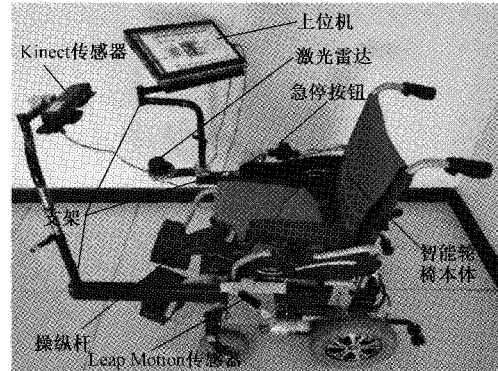
(b) 角速度信息

图 8 共享控制速度变化情况

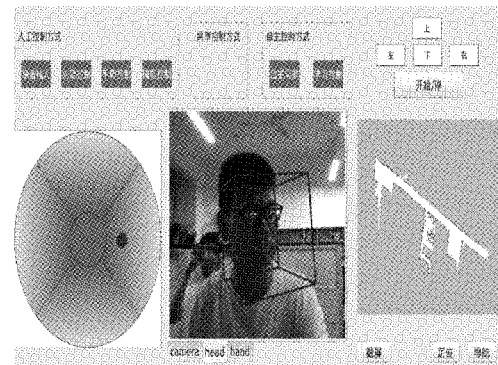
3.2 实机实验与分析

为了验证本文提出共享控制方法的实际效果,选取了

真实场景并搭建了如图 9 所示的机器人轮椅交互控制实验系统进行实验测试。



(a) 机器人轮椅实验平台



(b) 机器人轮椅人机交互界面

图 9 机器人轮椅交互控制实验系统

如图 9(a) 所示为机器人轮椅实验平台,各硬件模块如图中标注所示。人机交互控制界面如图 9(b) 所示,用户在使用时根据各种交互方式获得的控制信息在不同区域的映射位置,实现对用户行为的读取。

实验环境如图 10 所示,选择 5 名实验用户,在实验之前先对他们进行适当的驾驶培训,避免出现安全事故。实验者通过手势控制、自主导航、共享控制等 3 种方式控制机器人轮椅在由点 A 驶向点 E,行驶过程中设置有避障、过门等实验场景。

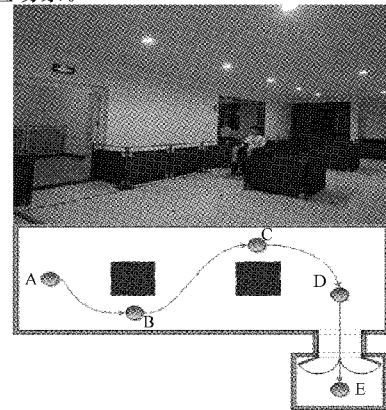


图 10 实验场景图

取 5 名实验者的控制数据进行实验分析。从手势控制、自主导航、共享控制等 3 种方式的平均控制时间、平均轨迹长度、平滑度和用户满意度等 4 个方面分析实验效果。

1) 任务完成时间与轨迹长度

如图 11 所示为 3 种控制方式完成运动任务的轨迹图。图 12 与表 1 所示为 3 种控制方式完成任务的平均用时、平均轨迹长度。如图可知,在完成相同运动任务的前提下,用时方面,手势控制方式用时最多,自主导航控制方式次之,共享控制方式用时最少;轨迹长度方面,自主导航控制方式轨迹最长,手势控制方式次之,共享控制方式轨迹最短。

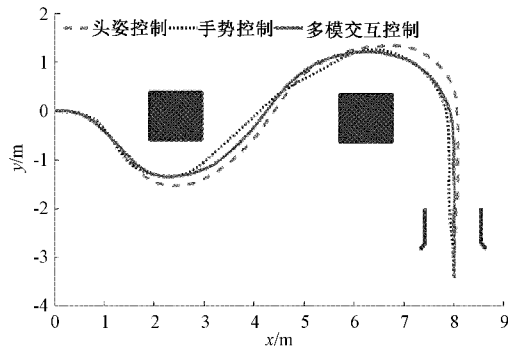


图 11 轮椅运行轨迹图

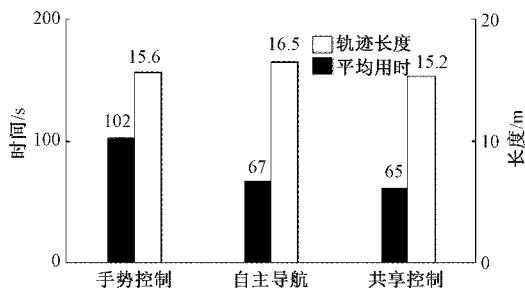


图 12 完成任务平均用时及平均轨迹长度

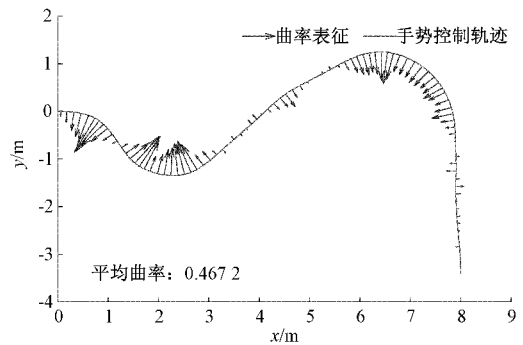
表 1 完成任务平均用时及平均轨迹长度

控制方式	平均用时/s	平均轨迹长度/m
手势控制	102	15.6
自主导航	67	16.5
共享控制	65	15.2

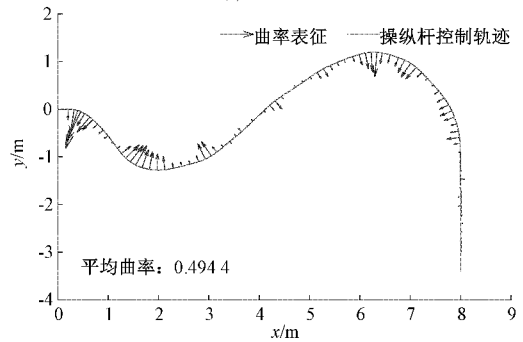
实验表明,共享控制方式相较于其他两种控制方式,能够使得用户在较短的时间内,通过较优的路径完成运动任务,满足预期效果。

2) 平滑度分析

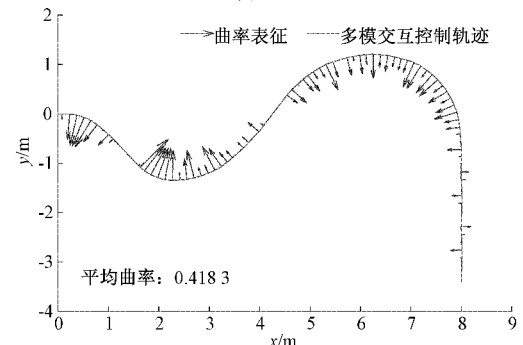
如图 13 所示为 3 种控制方式完成运动任务的轨迹平滑度分析图。图 13 表明,共享控制方式呈现出轨迹平滑度最优,自主导航控制方式次之,手势控制方式呈现的轨迹平滑度最差,满足预期效果。



(a) 手势控制



(b) 自主导航



(c) 共享控制

图 13 轮椅运行轨迹平滑度分析

3) 用户满意度调研

在完成实验之后,邀请 5 名实验者对分别对 3 种控制方式进行驾驶体验满意度打分,满分为 10 分制^[17]。表 2 所示为 3 种控制方式具体得分情况。

表 2 三种控制方式得分情况

控制方式	1	2	3	4	5	平均分
手势控制	8.5	8.7	8.5	8.8	8.4	8.58
自主导航	8.7	8.6	8.8	8.9	8.6	8.72
共享控制	9.2	9.1	9.0	9.3	8.9	9.10

由表 2 可知,用户对于共享控制方式的驾驶满意度较高,自主导航控制方式次之,手势交互控制方式较低,满足预期效果。

4 结 论

针对智能轮椅现有控制方式存在的不足,本文提出一种基于用户行为与自主导航控制方式相结合的动态共享控制方法。在用户控制轮椅的方式基础上,结合轮椅自主导航控制方式,设计了基于距离因素、疲劳因素和平滑度因素等多种约束条件的机器人轮椅动态共享控制方法。通过 Leap Motion 传感器、肌电传感器、激光雷达及电动轮椅等设备,搭建机器人轮椅实验系统,验证了本文所述的动态共享控制方法。实验以手势控制为例,表明该方法融合人-机控制指令的有效性,具备拓展至不同用户行为的能力,能够提高行驶过程中的连续性、安全性和舒适性,使用户充分参与控制过程,并避免用户过于疲劳,提高用户满意度。

参考文献

- [1] SCHWESINGER D, SHARIATI A, MONTELLA C, et al. A smart wheelchair ecosystem for autonomous navigation in urban environments [J]. *Autonomous Robots*, 2017, 41(3): 519-538.
- [2] LECROSNIER L, KHEMMAR R, RAGOT N, et al. Deep learning-based object detection, localisation and tracking for smart wheelchair healthcare mobility [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(1): 91.
- [3] CHANG Y, KUTBI M, AGADAKOS N, et al. A shared autonomy approach for wheelchair navigation based on learned user preferences [C]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision Workshops*, 2017: 1490-1499.
- [4] AL-ROUSAN M, ASSALEH K. A wavelet-and neural network-based voice system for a smart wheelchair control [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2011, 348(1): 90-100.
- [5] 罗元,谢彧,张毅. 基于 Kinect 传感器的智能轮椅手势控制系统的设计与实现 [J]. *机器人*, 2012, 34(1): 110-113.
- [6] 徐国政,李威,朱博,等. 面向机器人轮椅交互控制的头姿估计改进方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(9): 40-47.
- [7] KIM J, PARK H, BRUCE J, et al. Assessment of the tongue-drive system using a computer, a smartphone, and a powered-wheelchair by people with tetraplegia [J]. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2015, 24(1): 68-78.
- [8] PHINYOMARK A, PHUKPATTARANONT P, LIMSAKUL C. A review of control methods for electric power wheelchairs based on electromyography signals with special emphasis on pattern recognition [J]. *IETE Technical Review*, 2011, 28(4): 316-326.
- [9] RAMLI R, AROF H, IBRAHIM F, et al. Using finite state machine and a hybrid of EEG signal and EOG artifacts for an asynchronous wheelchair navigation [J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(5): 2451-2463.
- [10] ZHANG B, HOLLOWAY C, CARLSON T. A hierarchical design for shared-control wheelchair navigation in dynamic environments [C]. *2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics(SMC)*, IEEE, 2020: 4439-4446.
- [11] 戴廷飞,刘邈,叶阳阳,等. 人机共享控制机器人系统的应用与发展 [J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(3): 62-73.
- [12] RAO J B, ZAKARIA A. Improvement of the switching of behaviours using a fuzzy inference system for powered wheelchair controllers [M]. *Engineering Applications for New Materials and Technologies*. Springer, Cham, 2018: 205-217.
- [13] NGUYEN V T, SENTOUH C, PUDLO P, et al. Joystick haptic force feedback for powered wheelchair—a model-based shared control approach [C]. *2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics(SMC)*, IEEE, 2020: 4453-4459.
- [14] DEVIGNE L, NARAYANAN V K, BABEL M. Low complex sensor-based shared control for power wheelchair navigation [C]. *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS)*, IEEE, 2016: 5434-5439.
- [15] 徐国政,巩伟杰,朱博,等. 基于改进头姿估计方法的机器人轮椅交互控制 [J]. *机器人*, 2018(6): 878-886.
- [16] LUTTMANN A. Physiological basis and concepts of electromyography [M]. *Electromyography in Ergonomics*, Routledge, 2017: 51-96.
- [17] CANDIOTTI J L, KAMARAJ D C, DAVELER B, et al. Usability evaluation of a novel robotic power wheelchair for indoor and outdoor navigation [J]. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 2019, 100(4): 627-637.

作者简介

高翔,教授,主要研究方向为机器人传感与控制技术。

E-mail: gaox@njupt.edu.cn

孟子喆,硕士,主要研究方向为康复机器人。

E-mail: 1020051405@njput.edu.cn

徐国政(通信作者),教授,主要研究方向为康复机器人,智能移动服务机器人。

E-mail: xu_gz@hotmail.com