

轮椅机器人异构主从臂 关节空间中的运动映射研究

龚道雄^{1,2}, 何 睿^{1,2}, 左国玉^{1,2}, 于建均^{1,2}

(1. 北京工业大学信息学部自动化学院, 北京 100124; 2. 计算智能与智能系统北京市重点实验室, 北京 100124)

摘 要: 轮椅机器人系统是一种用于帮助有肢体运动困难的老年人/残疾人完成各种日常生活操作的辅助机器人, 研究异构主从臂之间的运动映射算法有助于提高此类机器人系统控制操作的便捷性和直观性. 本文以人手臂作为通用主臂, 异构的7DOF机械臂作为从臂, 采用穿戴式人体运动捕捉系统获取人手臂的关节运动数据, 然后根据从机械臂的构型特征将其关节分为肩、肘、腕3组, 研究在关节空间中由主臂到从臂的运动映射算法以及从臂的自主避障算法, 最终实现符合操作者日常习惯的异构从臂运动控制. 本算法具有如下两个突出的优点: (1) 老年人/残疾人可以根据生活直觉和日常习惯来控制机械从臂的运动, 操作疲劳程度和出错率得到显著降低; (2) 轮椅机器人在家庭等非结构化和受限空间中作业时的自身安全性得到显著提高. 上述优点对于轮椅机器人系统在助老助残中的应用具有非常重要的意义.

关键词: 轮椅机器人; 异构主从臂; 运动映射

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2018)02-0464-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.02.028

Motion Mapping in the Joint Space for the Control of the Heterogeneous Wheelchair-Mounted Robotic Arm

GONG Dao-xiong^{1,2}, HE Rui^{1,2}, ZUO Guo-yu^{1,2}, YU Jian-jun^{1,2}

(1. College of Automation, Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Beijing Key Lab of Computational Intelligence and Intelligent System, Beijing 100124, China)

Abstract: Wheelchair-Mounted Robotic Arm (WMRA) is a typical assistive robot system for the elder/disabled people. This paper studies the motion mapping from a human master arm to a heterogeneous slave WMRA for manipulation in activity of daily livings. The motion of the human master arm is measured via a wearable motion capture system, and then the motion captured data is transformed into the joint space of the heterogeneous slave robot arm using a corresponding joint-set motion mapping algorithm, and an autonomous obstacle avoidance algorithm is also developed, as a result, the motion of the heterogeneous slave WMRA can be easily controlled by the user via the motion of his/her arm. This method possesses two remarkable advantages that are vital to the application of the WMRA systems: the elder/disabled user can operate the WMRA system intuitively and conveniently, and the fatigue degree and error rate of the user can be significantly reduced; the safety of WMRA in an unstructured and constrained home environment can be significantly improved.

Key words: WMRA; heterogeneous master/slave arm; motion mapping

1 引言

中国的人口老龄化问题日益严重. 根据2010年第六次全国人口普查的结果, 60岁以上人口多达1.78亿, 占总人口的13.26%, 65岁以上人口多达1.19亿

人, 占总人口的8.87%, 均远超联合国10%和7%的人口老龄化指标; 同时, 我国残疾人的总数高达8502万, 约占全国总人口数的6.2%, 其中肢体残疾人2472万, 占总残疾人总数的29.07%, 在所有残疾种类中所占比重最大^[1]. 这个庞大的老年人/残疾人群体, 由于身体

原因导致生活质量显著下降,已经形成一个不可忽视的社会问题^[2].

轮椅机器人由智能轮椅和安装在轮椅上的机械臂构成,可以部分或全部实现老年人/残疾人已丧失的操作能力,是一种典型的、用于帮助肢体运动困难的老年人/残疾人完成各种日常生活操作(Activities of Daily Living, ADL)的辅助机器人(Assistive Robot)系统^[3-5].一般情况下,使用者通过手柄等人-机器人接口控制机械臂的运动,从而为其提供服务;在其他情况下,操作者也可以离开轮椅移动平台,(或者由老年人/残疾人的家庭成员/护理人员)通过人-机器人接口遥控操作控制轮椅机器人在房间中完成其他需要的家务劳动.比尔·盖茨在 2007 年预言机器人将进入千家万户^[6],轮椅机器人就是这样一种可望进入千家万户帮助老年人/残疾人解决日常生活困难、提高生活质量的辅助机器人系统.

轮椅机器人系统通常具有异构(Heterogeneous)的主臂(The Master Arm)和从臂(The Slave Arm),作为运动指令输入机构的主臂通常包括键盘、鼠标、操作手柄、BCI 等人-机器人接口^[7],作为运动执行机构的从臂通常是针对家居环境和日常生活任务而设计的串联性机械臂.典型的轮椅机器人系统 AMOR, ARPH, Handy 1, JACO, KARES II, FRIEND^[8]和 Movaid 等都采用了异构主从臂的设计方案.因此,在主从异构的轮椅机器人系统中必须要设计专门的算法,克服主从臂之间的运动学差异,将主臂的控制指令映射为从臂的相应运动^[9];否则将会导致主臂和从臂的运动轨迹显著不同,使从臂的运动控制难度加大,操作者的工作负担加重,甚至难以完成作业任务^[10,11].

异构主从臂运动映射最常用的算法是正逆运动学方法(Forward-Inverse Kinematics Approach),即先根据主臂的正运动学模型(比如 D-H 模型)计算出主手在其作业空间(Workspace)笛卡尔坐标系中的位置,然后采用线性映射计算出从手在其作业空间笛卡尔坐标系中对应的位置,最后根据从臂的逆运动学模型计算出从臂实现相应姿态的各关节构型,从而实现从手在其作业空间中对应的姿态和方位^[12-16].

Pierce 等的研究表明,正逆运动学方法并不能达到理想的主从臂运动映射效果^[17],存在如下一些不足之处:(1)轮椅机器人系统主从机械臂之间的异构特点,决定了其控制过程不符合操作者的日常习惯和直觉,在主端的操作过程中需要时时考虑具有特殊结构的从端机械臂应该如何操作,因此操作者需要进行大量的训练才能熟练掌握相关的技巧,并在作业过程中承受较大的工作压力,容易出错^[18-20],这种工作压力给老年人/残疾人使用者带来的负担尤为突出;(2)轮椅机器

人系统需要随时对从臂进行逆运动学计算并处理其冗余解,带来很大的计算量,这将影响到从臂运动控制的实时性和作业质量;(3)轮椅机器人系统在非结构化和受限的家居环境中工作,众多障碍物的存在迫使操作者必须时时处处留心以避免从机械臂与障碍物发生碰撞,这将进一步地增加操作者的工作负担,并给机器人系统自身的安全以及作业任务的顺利完成带来更多的不利因素^[21,22].

由此可见,遥操作机器人系统,尤其是面向有体力和脑力限制的特定人群的助老助残轮椅机器人系统,必须通过算法实现如下的功能特点:(1)机器人系统具有较好的操作性,主臂的控制符合操作者的日常习惯,异构主从臂的运动具有较高的相似性,即主从臂进行作业时在其工作空间中的构型具有较高的一致性,从而使得从臂的运动完全符合操作者的主观感受,操作者可以方便地对从臂进行直觉控制^[14-16,23,24];(2)机器人系统具有较好的安全性,即使在非结构化、动态的家居环境中,即使是体力和脑力受限的操作者进行了误操作,从机械臂也能够根据其自身的传感信息发现并规避危险,同时向操作者发出报警信号,以保证人员、环境和机器人系统本身的安全.

针对上述问题,本文提出如下的解决方案:(1)以人手臂作为通用主臂,采用穿戴式运动捕捉系统获取操作者的肢体运动信息,设计从通用主臂到机械从臂的运动映射算法,将操作者的运动信息转化为从机械臂的控制指令,这样操作者就可以无视主从两端异构的运动学约束和差异,根据从机械臂所处的作业环境,用手臂做出完全符合自己日常习惯和直觉的动作,通过异构主从臂的运动映射算法发出控制指令,控制机械从臂在其作业空间中复现主臂指令的运动;(2)考虑到家居环境非结构化和作业空间受限的突出特点,研究机械从臂的自主避障算法,赋予机械从臂在执行操作指令的前提下进行自主避障和预见到碰撞时报警的能力,减轻操作者的作业负担,使操作者能够专注于与作业任务本身相关的上层决策任务(Higher-level Tasks),更好地实现助老助残功能.

在本文的研究方案中,通用主臂是人的手臂,其肩、腕关节具有多个运动自由度,并且多个运动自由度的轴线相交于一点.针对上述特点,我们研究一种在关节空间(而不是笛卡尔空间)中进行异构主从臂之间运动映射的算法,将异构的主从臂关节根据其构型特点进行分组,以组为单位考虑关节之间的运动映射,克服前述笛卡尔空间中异构主从臂正逆运动学映射方法的固有缺点,使得轮椅机器人的控制操作更加直观方便,从而减轻操作者的工作负担并减少错误率.

2 轮椅机器人系统异构主从臂的构成

轮椅机器人是一种特殊的遥操作机器人系统,其操作者是需要帮助的老年人/残疾人.操作者在系统的控制环中,为轮椅机器人提供解决问题的决策智能和控制指令.操作者根据作业环境和任务需要做出一个上肢动作,人体运动捕捉系统获取操作者的上肢动作序列信息,将这些动作信息经异构主从臂运动映射算法转化为机械从臂的运动指令,驱动从机械臂执行操作者所希望的操作,完成相应的助老助残任务.对于操作者而言,最好的主臂不是操纵手柄、键盘、鼠标或其他

机械臂,而是操作者自己的手臂,因为直接用手臂操作是最符合操作者日常习惯和直觉的反应.以手臂作为通用主臂,可以显著降低操作者的工作压力,同时显著提高其作业效率.

因此,在研究中我们采用图 1 所示的系统实施方案.操作者可以是直接使用轮椅机器人的老年人/残疾人,也可以是借助轮椅机器人为老年人/残疾人提供帮助的家属或护理人员.用于输入控制指令的主臂是操作者的右臂,穿戴式运动捕捉系统作为人—机器人接口被用来检测操作者右臂在关节空间中的运动信息.

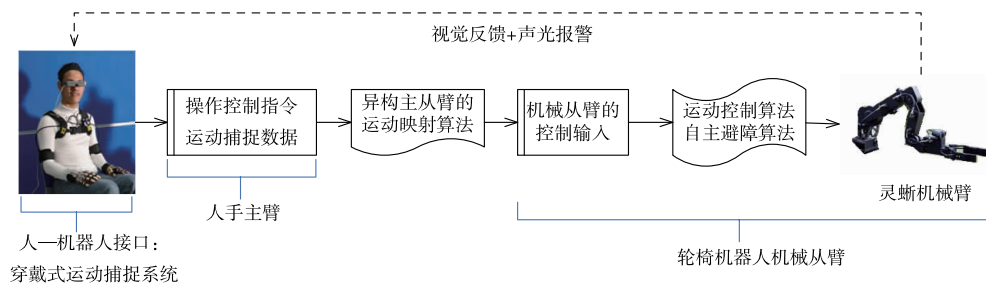


图1 轮椅机器人系统的结构图

穿戴式运动捕捉系统轻便简洁,容易穿戴,既不像机械式运动捕捉系统那样给使用者带来不便,又不像光电式运动捕捉系统那样对环境有较高的要求,特别适合于在轮椅机器人中应用.运动捕捉系统所得到的主臂运动信息包括肩关节的俯仰角、偏航角、以及上臂绕其自身轴线的横滚角,肘关节的俯仰角和小臂绕其轴线的横滚角、腕关节的俯仰角和偏航角共 7 个转动自由度(图 2)的时间序列数据.主臂的操作指令信息通过运动映射算法转换为异构机械从臂在关节空间中的运动控制指令,控制机械从臂执行各种作业任务.从臂采用中科院沈阳自动化所“灵蜥”遥操作机器人具有 5 个转动自由度的机械臂^[25].从臂末端执行器(End Effector)的开合实现其对物件的夹持和取放,因为该动作严格对应于人手拇指和食

指的开合动作,比较简单且容易实现,所以在后文中不再提及.机械从臂所在的作业环境信息直接为老年/残疾操作者所见,或者如图 1 所示通过视觉反馈给作为遥操作控制者的老年人/残疾人的家属或护理人员.机械从臂各连杆上均安装有接近觉传感器,当机械从臂在作业过程中检测到障碍物时,系统一边将障碍物信息发送到操作者主臂相应位置上的接收器,通过声光报警提醒操作者做出规避动作;一边启动机械从臂的自主避障算法,自动修正机械从臂的运动轨迹,避免其因为老年/残疾操作者的反应迟缓而与障碍物发生碰撞,从而保障人员、系统和环境的安全.

如图 2 所示,作为执行机构的机械从臂与作为指令输入机构的人手主臂在结构上具有显著的区别^[26].异构

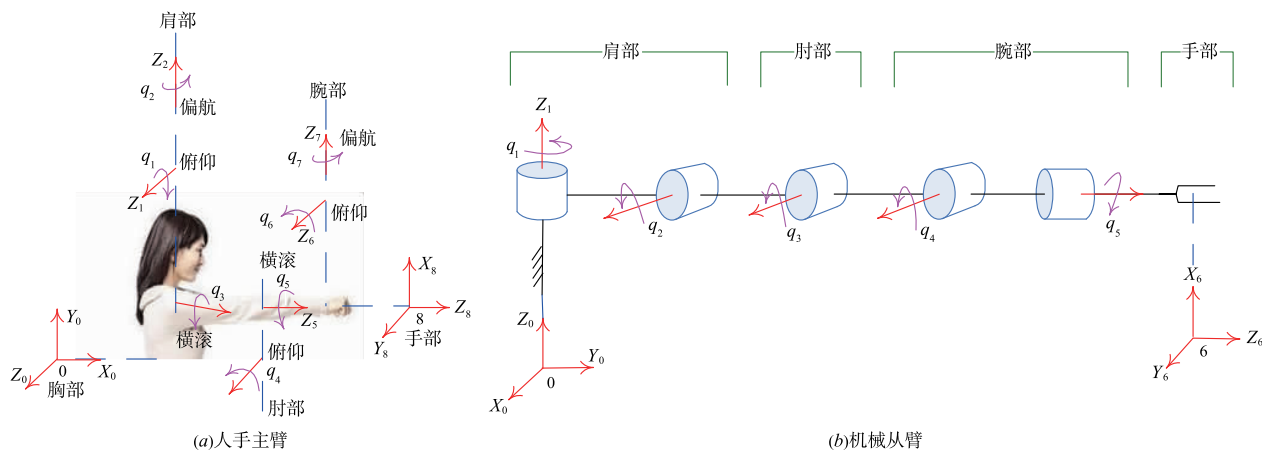


图2 人手主臂和机械从臂的结构差异和关节分组

主从臂具有明显不同的运动学模型(图 2)和作业空间(图 3,4),这就决定了我们不能直接采用从关节到关节

的运动映射来实现主臂对从臂的运动控制,而必须针对主从臂的结构差异,研究特定主从臂的运动映射算法。

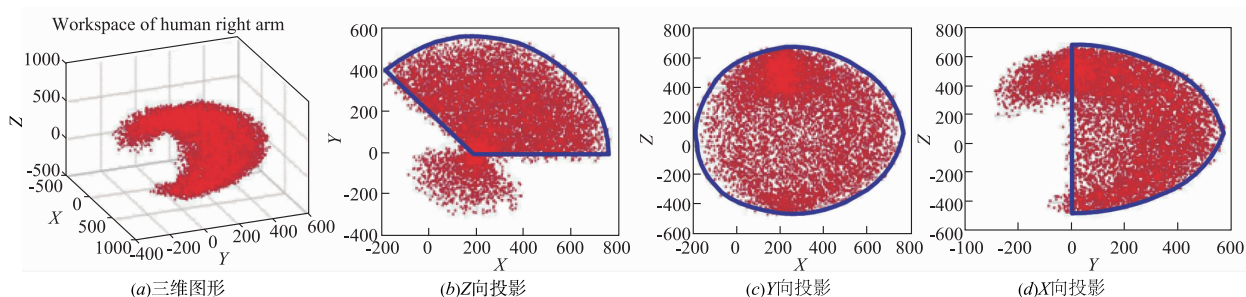


图3 人手主臂的作业空间和习惯作业空间

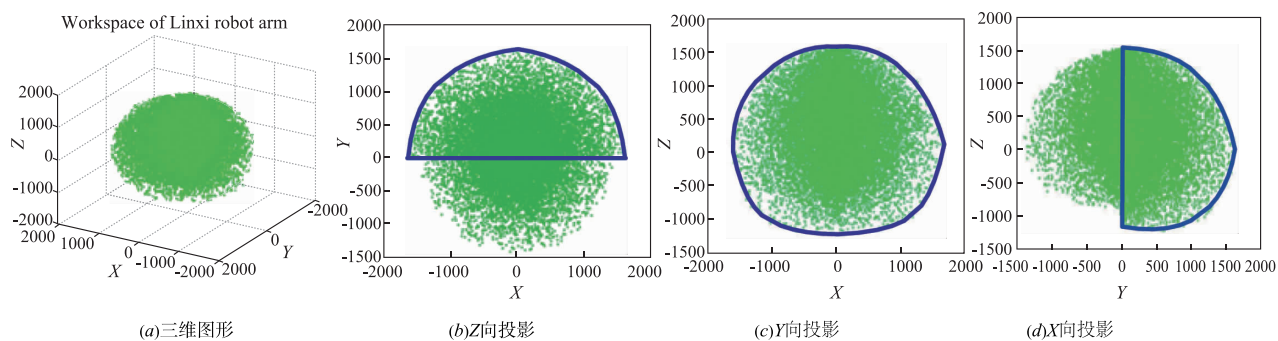


图4 机械从臂的作业空间和习惯作业空间

3 主从臂类比关节分组的运动映射

作为主手的人手臂和作为从手的机械臂在结构上具有显著的差别(图 2),比如人体肩部包括俯仰、偏航以及绕上臂轴线的转动(图 2a 中的 q_3)共 3 个运动自由度,腕关节包括俯仰、偏航和绕小臂轴线的横滚(图 2a 中的 q_5) 3 个运动自由度,而从机械臂则没有和人手主臂 q_3, q_5 相对应的运动自由度. 人手主臂和机械从臂的作业空间形状也具有显著的不同(图 3,4). 其结果是,像主从臂同构遥操作机器人系统那样采用每对关节——对应的运动映射方法在异构的轮椅机器人系统中已经不再适用. 为了研究的方便,我们把从机械臂视为人手主臂的某种变形,通过类比(Analogy)把从机械臂的运动关节分为“肩”、“肘”和“腕”3 组(图 2),在对应关节组的层面上研究从人手主臂到机械从臂的运动映射,在功能上较好地实现异构主从臂之间的运动对应,从而实现符合直觉和习惯的异构轮椅机器人系统的作业控制。

在日常生活中,人手有一个习惯作业空间,该空间只是人手整个可能作业空间的一部分. 比如人手臂的作业空间还包括身体背后的一部分子空间,但背后的子空间显然不是人手臂通常工作的空间,人手臂惯常的作业空间是位于我们身体前部的这一部分子空间. 每当要抓取的对象位于人手整个作业空间的某些边缘部分时,我们总是通过移动身体改变物体在手臂作业空间中的相对位

置,使我们手臂的操作具有较好的舒适性。

这就启发我们:虽然人手臂和机械臂都有其特定的作业空间或灵巧作业空间(Dexterous Workspace),但是实际上人或机器人通常都只在其作业空间的一个子空间中进行作业. 我们称这个惯常的工作子空间为习惯作业空间(Habitual Workspace). 当操作对象位于习惯作业空间之外时,人/轮椅机器人通过移动身体/轮椅使作业对象移动到自己的习惯作业空间中,从而较为方便地完成相应的作业任务. 我们定义如图 3 和图 4 中蓝色曲线所示的习惯作业空间,并只在习惯作业空间中研究异构主从臂之间的运动映射问题,可以使问题在很大程度上得到简化。

基于图 3 和图 4 所示人手主臂和机械从臂的习惯作业空间形状,我们可以容易地建立主从臂关节运动的线性映射关系如式(1)所示,其中 q_i^R 为机器人从臂第 i 个自由度的角度, q_j^H 为人手主臂第 j 个自由度的角度,比例系数 k 和偏置常数 d_i 根据主臂对应关节的运动范围确定。

$$q_i^R = k \cdot (q_j^H - q_{j0}^H) + d_i \quad (1)$$

由于主从臂异构,两者的关节运动自由度数目不相同,各个关节在作业空间中产生的运动效果也不尽相同. 因此在主从臂运动映射时存在一对一、多对一、一对多共三种情况,本文设计主从臂之间的运动映射关系见表 1. 在表 1 中,人手主臂肩部的运动映射是最

为复杂的.这是因为人体肩部具有独特的球关节机构,并且肩关节是人手主臂串联结构的基关节,肩关节的运动将直接影响上臂、小臂和手部在三维空间中的姿态,而“灵蜥”机械从臂在结构上没有对应于人体肩部控制上臂绕其自身轴线转动的自由度,所以人手主臂绕上臂轴线的转动是最容易在机械从臂的运动映射中产生运动和姿态偏差的.这是轮椅机器人系统异构主从臂运动映射算法设计的难点和关键所在.

表 1 人手主臂到机械从臂的关节组运动映射关系

操作者动作	主臂自由度 j	从臂自由度 i	k	d_i	q_0^H	备注
肩俯仰	1	2	1	0	0	肘高于肩
		3	-2	0	0	肘低于肩
肩偏航	2	1	1	0	0	
肩横滚	3	1	-0.9	0	0	$q_3^H \in [0, \frac{\pi}{4}]$
		2	-0.374	1	0	
		1	-0.374	-0.707	0.785	$q_3^H \in [\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}]$
		2	-0.9	0.707	0.785	
肘俯仰	4	3	1	0	0	
肘横滚	5	5	1	0	0	
腕俯仰	6	4	2	0	0	
腕偏航	7	1	0.127	0	0	

4 受限环境中从机械臂的自主避障

通常情况下,轮椅机器人的工作场所是非结构化和空间受限的家居生活环境.在这样的环境中工作,由于老年人/残疾人自身身体状况的局限,在操控从机械臂执行作业任务的同时还要在充满家具等障碍物的环境中进行避障等轨迹规划操作,这无疑会给操作者带来极大的工作压力,这种工作压力将使操作者不堪重负,变得非常容易出错,甚至直接导致助老助残操作的失败或机器人系统的损坏.

为了解决这个问题,根据阿西莫夫关于“机器人必须尽力保护自己”的定律^[27],我们必须赋予轮椅机器人一定的自主性:当轮椅机器人根据其自身的传感器信息检测到运动路径上有障碍物时,即使根据操作者的指令从臂应该继续沿着既定轨迹运动,机器人会在报警提醒操作者的同时自主地在逼近障碍物的运动方向上减速以避免碰撞^[21],从而既确保轮椅机器人自身的安全,又减轻操作者的工作负担.

为了实现上述自主避障功能,首先,我们要从硬件上赋予机械从臂检测和感知障碍物的能力:我们在机械从臂各连杆的中部和两端靠近关节处安装多个接近

觉(红外)传感器,这些接近觉传感器沿着垂直于连杆轴线的横截面周边均匀布置,从而可以使机械臂连杆从任意方向检测到障碍物的接近;同时我们根据本文第三部分主从臂之间基于类比的关节分组关系,针对机械从臂上每一个安装接近觉传感器的位置,在人手通用主臂上相对应的位置上设置声光报警装置.然后,我们要设计机械从臂的自主避障机制:当机械从臂在运动路径上检测到有障碍物接近时,立即自主发起应急避障过程,机器人系统一边将从臂的障碍物信息发送到操作者主臂相应位置上的接收器,发出声光报警信号,提醒操作者做出规避动作;一边启动从机械臂的自主避障算法,修正从机械臂的运动轨迹,避免其因为老年/残疾操作者的反应迟缓而与障碍物发生碰撞,从而保障老年/残疾操作者、轮椅机器人系统以及家居环境中其他人员和物品的安全.

在自主避障算法中,我们需要完成以下两个方面的工作,一是确定机械从臂中需要减速的关节,二是确定这些关节的减速方案.

关于机械从臂需要减速的关节,显然只可能涉及到机械臂从基座到即将碰撞障碍物的连杆之间运动链上的关节.在这些关节中,又只有那些通过转动可以在当前连杆趋向障碍物方向上产生位移分量的关节才需要减速.设在机械从臂的每一个连杆 L_i 上垂直于坐标系 $\{i\}$ 中坐标轴的方向上配置接近觉传感器,用于检测障碍物逼近该连杆的速度.如式(2)所示, ${}^i\mathbf{v}$ 是障碍物在机械从臂的坐标系 $\{i\}$ 中的速度矢量, $\dot{\mathbf{q}}$ 是机械从臂的关节角速度矢量, ${}^i\mathbf{J}(\mathbf{q})$ 是坐标系 $\{i\}$ 的雅可比矩阵,则机械从臂需要减速的关节 q_j 满足如下条件:(1) $j < i$, 即 q_j 比将要与障碍物碰撞的机械臂连杆 L_i 更靠近基座连杆 L_0 ; (2) 当障碍物以一个正的速度逼近机械从臂连杆 L_i 时,通过雅可比矩阵联系的从机械臂需要减速的关节角速度 \dot{q}_j 为正.

$${}^i\mathbf{v} = {}^i\mathbf{J}(\mathbf{q}) \cdot \dot{\mathbf{q}}, \quad (2)$$

$$\text{其中 } q_j, j < i \text{ 且 } j \in \{\dot{q}_j > 0\}$$

关于关节运动的减速方案,如图5所示,由于障碍物的存在,从机械臂的作业空间受到限制, C 为从机械臂的工作空间中心区, B 为从机械臂的工作空间边缘,即障碍物位置.人手主臂到机械从臂的运动采用如图5或式(3)的非线性映射关系.工作空间的中心区 C 是从臂的自由工作区间,在此区间内人手主臂的运动以系数1映射到机械从臂.从 C 到障碍物 B 之间的范围是从臂的谨慎工作区间,该区间的大小根据实际的工作性质和环境状况进行设定.当遥操作机器人处于谨慎工作区间时,意味着机械从臂距离约束边界(比如天花板、墙壁、地面、家具或其他障碍物等)较近,需要小心移动以免发生碰撞.因此在谨慎工作区间,人手主臂的运动以系数 $k = \kappa > 1$ 映

射到机械从臂,即机械从臂以一种显著减小的幅度和速度在接近障碍物的方向上进行运动,同时发出警报信息提醒操作者的注意,从而达到自主避免碰撞发生,提高系统作业安全性和顺利完成作业任务的目的。

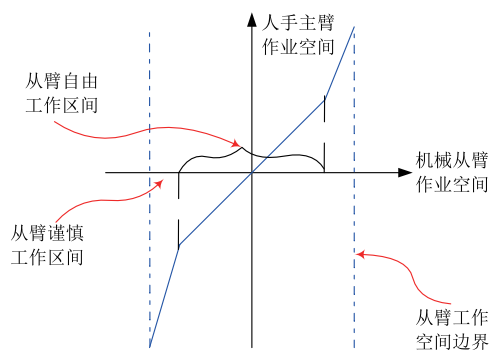


图5 自主避障时主臂到从臂的非线性运动映射

$$\Delta_d^H = k \cdot \Delta_d^R, \text{其中}, k = \begin{cases} 1, & |d| < C \\ \kappa > 1, & C < |d| < B \end{cases} \quad (3)$$

5 仿真实验

我们可以借助 Pajak^[28] 或 Corke^[29] 的 MATLAB 机器人工具箱进行仿真实验验证主从异构机械臂基于关节组运动映射算法的有效性。在仿真中,首先让作为主臂的人手右臂执行一个动作,然后将人手臂各个关节的运动数据根据前述关节组运动映射算法转换为机械从臂的运动指令,控制从机械臂执行相应的操作。由于主从臂具有不同的结构,不可能像同构遥操作机器人那样在主从臂之间取得高度相似的运动效果,但是通

过算法设计,我们仍然有可能获得比较好的主从臂运动相似性。通过比较人手主臂和机械从臂之间的运动轨迹,一方面我们希望验证基于类比的关节组运动映射算法的有效性;另一方面我们可以通过分析造成主从臂运动轨迹差异的原因,从而找到改进其运动映射效果的方法。

屈肘抬高上臂然后让小臂绕上臂轴线转动 90°,这是人在日常生活中常见的操作之一,也是最能体现人体肩关节结构特点的运动之一。如前所述,因为从机械臂的结构特点,它没有对应于人体肩部控制上臂绕其自身轴线转动的自由度,加之肩关节处于主从臂串联结构的根部,所以人手主臂绕上臂轴线的转动是最容易在机械从臂的运动中产生偏差的。人手主臂绕上臂轴线的转动在机械从臂端产生的运动效果是检验轮椅机器人异构主从臂运动映射算法优劣的关键点之一。

图 6 和图 7 展示了人手主臂绕其上臂轴线转动的两个典型动作在机械从臂端对应的运动轨迹。这两个典型动作分别是扳手腕动作和招财猫摆手动作。前者将上臂向前平伸、屈肘然后绕上臂轴线转动上臂,使小臂在前向平面内逆时针转动 90°至小臂水平向左;后者将上臂向前平伸、平摆至向右平伸、屈肘然后绕上臂轴线转动上臂,使小臂在侧向平面内逆时针转动 90°至小臂水平向前。由图 6 和图 7 中机械从臂末端执行器在三维空间中的运动轨迹及其在 2 维平面内的投影可见,本文的异构主从臂运动映射算法可以较好地处理人体肩部控制上臂绕其轴线转动的映射,使得异构的机械从臂末端执行器在三维空间中的运动轨迹和人手的相应运动轨迹具有较好的相似性。

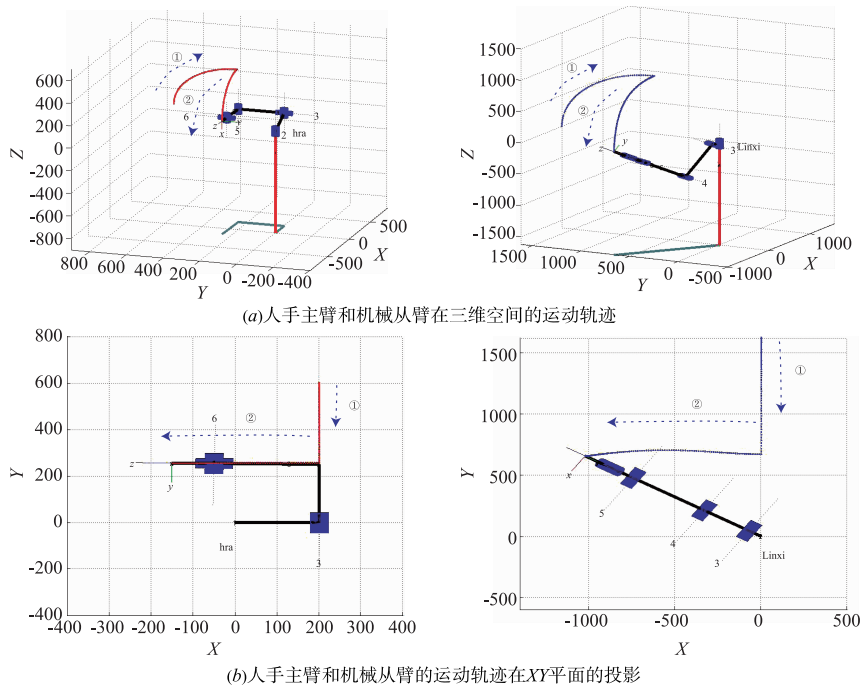
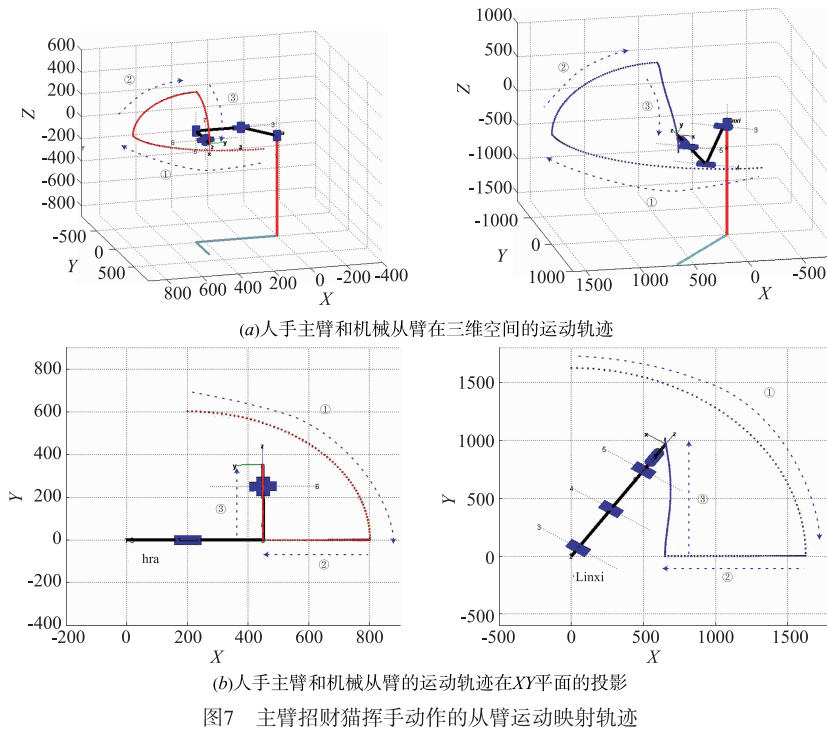
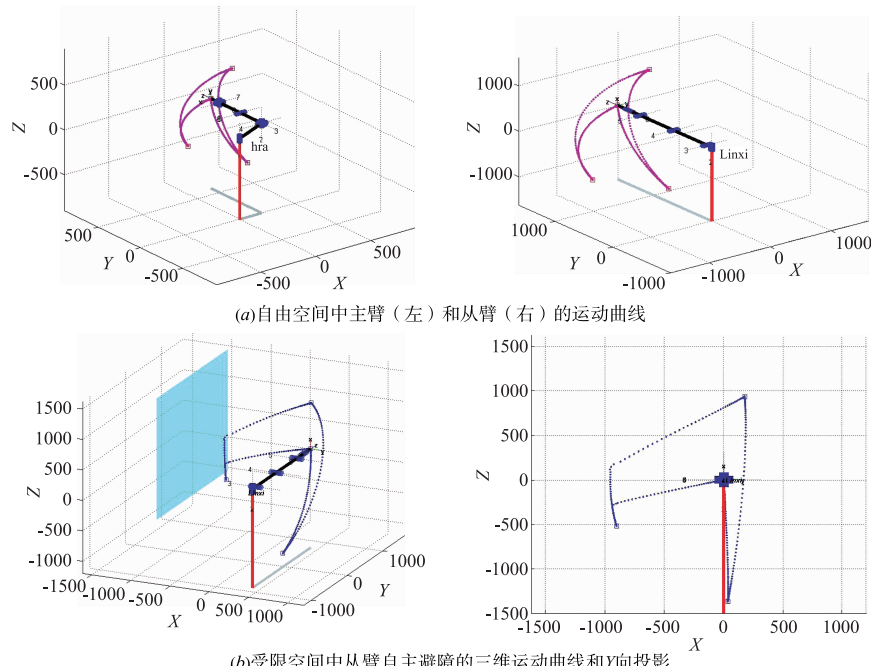


图6 主臂扳手腕动作的从臂运动映射轨迹



在图8(a左)中,人手臂在其习惯作业空间前部画出一段风筝形状的轨迹,然后我们得到从机械臂相应的风筝形状轨迹如图8(a右). 由图8可见,虽然由于主从臂异构的原因,两者的运动轨迹在尺寸和外观上不尽相同,但是两条运动轨迹在形状特征上具有高度的相似性,其细微的差异是可以接受的,而且也是可以在遥操作控制中通过人的控制进行调整的.

在图8(b)中,机械从臂工作在一个受限的工作空间中,在 $x = -1000$ 处有一道墙壁妨碍了机械臂的运动. 由于注意力不集中,或者工作压力过大而疏忽,操作者没有注意到障碍物的存在,仍然通过手臂给出如图8(a左)一样的运动指令,机器人面临碰撞到障碍物的危险. 通常情况下老年人/残疾人操作者在复杂的家居环境中是很难避免所有碰撞的,这将给操作者带来



极大的工作压力,而碰撞一旦发生,轻则导致作业任务的失败,重则造成机器人或者家具的损坏.如图 8(b)所示,机器人通过安装在机械臂上的传感器检测到了障碍物的逼近,及时启动自主避障功能(其中右图为左侧立体图在 $X-Z$ 平面内的投影,更清晰地反映了机械从臂对于障碍物的避让过程),同时报警以引起操作者的注意,从而不仅保证了机器人系统自身的安全,而且机械臂末端执行器的整体运动轨迹仍然保持了原有的曲线特征,确保了作业任务的顺利完成.

6 结论

轮椅机器人在助老助残领域中有着重要的应用.对于操作者而言,直接用人手臂进行各种操作是最为直观和最符合生活习惯的,因此以人的手臂作为统一的遥操作主臂具有非常突出的工程应用价值,不仅可以显著减少操作者的培训时间和费用,而且可以显著降低操作者的劳动强度,提高轮椅机器人助老助残操作的成功率.因为轮椅机器人的机械从臂根据其应用的不同而具有不同的结构形式,所以轮椅机器人系统的主从臂在大多数情况下都是异构的,异构主从臂之间的运动映射算法具有重要的理论研究意义.

本文研究了轮椅机器人异构主从臂在受限空间中作业的运动映射问题.我们以人手右臂为通用主臂,以灵蜥机械臂为从臂,采用穿戴式运动捕捉系统检测人手主臂的运动信息,采用功能类比的方法将机械从臂的关节分为肩、肘、腕 3 组,设计了由人手主臂到机械从臂的关节组运动映射算法,以及在接近障碍物时机械从臂的自主避障算法.仿真研究结果表明,本文所提出的算法在主从臂的运动轨迹上具有较好的相似性,这意味着操作者可以根据其习惯和直觉对轮椅机器人异构从臂进行控制,因此可以减轻操作者的工作负担,取得更好的遥操作控制效果.

本文的研究具有如下优点:

(1)对于操作者而言,直接用人手臂进行各种操作是最为直观和最符合生活习惯的.通过功能类比和关节组运动映射,借助穿戴式运动捕捉系统,我们可以实现由统一的人手主臂到异构的机械从臂的运动映射,使得轮椅机器人的使用者不需要经过很专业的训练就可以根据直觉很好地控制机器人.这一点对轮椅机器人作为运动能力下降的老年人/残疾人的辅助康复平台无疑具有十分重要的意义^[9,17].

(2)从臂在接近障碍物时根据传感器信息启动基于非线性运动映射的自主避障,使操作者可以只专注于作业任务本身,而不需要过多地关注作业环境中机器人的避障等底层任务,因此可以显著减少操作者的工作负担,提高助老助残的作业成功率,同时提高机器

人系统自身的安全性,避免老年人/残疾人因误操作而带来的损失.考虑到轮椅机器人通常在非结构化和受限的家居环境中工作,以及老年人/残疾人的身体状况,上述算法和功能的工程实用价值就显得尤为重要.

在后续研究中,我们将一方面继续研究和完善本文所提出的基于类比的关节组运动映射算法,进一步提高主从臂之间运动轨迹的相似性;另一方面采用更多不同的异构机械从臂运动学模型,研究本文算法在各种异构情况下的运动映射规律,以便将本文算法推广到更多和更一般的情形.我们还将对轮椅机器人或其他遥操作机器人物理平台上验证和改进本算法,以期取得较好的实验效果,并在此基础上将本文所研究的异构主从臂运动映射算法推向实际应用.

参考文献

- [1] 李光林,郑悦,吴新宇,等. 医疗康复机器人研究进展及趋势[J]. 中国科学院院刊,2015,30(6): 793-802.
- [2] 王田苗. 服务机器人辅助老年人生活的新模式与必要性[J]. 机器人技术与应用,2010,6(1): 4-5.
- [3] JAIN S, FARSHCHIANSADEGH A, BROAD A, et al. Assistive robotic manipulation through shared autonomy and a body-machine interface [A]. Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics [C]. IEEE, 2015. 526-531.
- [4] BROSE S W, WEBER D J, SALATIN B A, et al. The role of assistive robotics in the lives of persons with disability [J]. American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation, 2010, 89(6): 509-521.
- [5] PENCE W G, FARELO F, ALQASEMI R, et al. Visual servoing control of a 9-DOF WMRA to perform ADL tasks [A]. 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. IEEE, 2012. 916-922.
- [6] GATES B. A robot in every home [OL]. <https://www.scientific-american.com/article/a-robot-in-every-home/>, 2016-12-23.
- [7] ANVARI M. The future of robotic platforms [A]. Robotics in General Surgery [C]. Springer, 2014. 485-497.
- [8] MARTENS C, PRENZEL O, GRAESER A. The rehabilitation robots FRIEND-I & II: daily life independency through semi-autonomous task-execution [A]. Rehabilitation Robotics [C]. I-Tech Education and Publishing, 2007. 137-162.
- [9] KHURSHID R P, KUCHENBECKER K J. Data-driven motion mappings improve transparency in teleoperation [J]. Presence, 2015, 24(2): 132-154.
- [10] CHEN J Y C, HAAS E C, BARNES M J. Human performance issues and user interface design for teleoperated robots [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cy-

- bernetics-Part C: Applications and Reviews, 2007, 37 (6): 1231 - 1245.
- [11] CHUNG C-S, WANG H-W, COOPER R A. Functional assessment and performance evaluation for assistive robotic manipulators: literature review [J]. The Journal of Spinal Cord Medicine, 2013, 36(4): 273 - 289.
- [12] NIEMEYER G, PREUSCHE C, HIRZINGER G. Telero-botics [A]. Handbook of Robotics [C]. Springer, 2008. 741 - 757.
- [13] 冯美. 腹腔微创手术机器人系统关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [14] 李建民. 微创机器人机构设计与主从映射策略研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [15] 马如奇. 微创腹腔镜外科手术机器人执行系统研制及其控制算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [16] 唐奥林. 面向主从式微创外科手术机器人的遥操作运动控制策略研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [17] PIERCE R M, KUCHENBECHKER K J. A data-driven method for determining natural human-robot motion mappings in teleoperation [A]. Proceedings of the Fourth IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics [C]. IEEE, 2012. 169 - 176.
- [18] HA C-S, PARK S, HER J, et al. Whole-body multi-modal semi-autonomous teleoperation of mobile manipulator systems [A]. Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. IEEE, 2015. 164 - 170.
- [19] ANVARI M. The future of robotic platforms [A]. Robotics in General Surgery [C]. Springer, 2014. 485 - 497.
- [20] MAVRIDIS N, PIERRIS G, GALLINA P, et al. Subjective difficulty and indicators of performance of joystick-based robot arm teleoperation with auditory feedback [A]. Proceedings of the 2015 International Conference on Advanced Robotics [C]. IEEE, 2015. 91 - 98.
- [21] ATOELEN M F, DE TEJADA V F, HUETE A J, et al. Distributed and adaptive shared control systems [J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2015, 22 (4): 137 - 146.
- [22] KIM D, KIM J, LEE K, et al. Excavator tele-operation system using a human arm [J]. Automation in Construction, 2009, 18: 173 - 182.
- [23] 赵晓军, 黄强, 彭朝琴, 等. 基于人体运动的仿人型机器人动作的运动学匹配[J]. 机器人, 2005, 27 (4): 358 - 361.
- [24] 夏晶, 蒋再男, 刘宏, 蔡鹤皋. 机器人宇航员遥操作中手臂运动映射优化[J]. 华中科技大学学报, 2012, 40 (12): 55 - 59.
- [25] 中科院沈阳自动化所. 反恐防爆机器人[OL]. <http://eod.sia.cn/product1>, 2016-12-23.
- [26] 陈文斌. 人体上肢运动学分析与类人肢体设计及运动规划[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [27] Three Laws of Robotics [OL]. https://en.wikipedia.org/wiki/Three_Laws_of_Robotics, 2016-12-23.
- [28] PAJAK I. The matlab toolbox for modeling complex mechanisms [J]. International Journal of Applied Mechanics and Engineering, 2014, 19(2): 285 - 301.
- [29] CORKE P. MATLAB toolboxes: robotics and vision for students and teachers [J]. IEEE Robotics Automation Magazine, 2007, 14(4): 16 - 17.

作者简介



龚道雄 男, 1968 年出生于湖南永顺县, 现为北京工业大学信息学部自动化学院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为人形机器人和遥操作机器人。

E-mail: gongdx@bjut.edu.cn



何睿 男, 1993 年出生于内蒙古包头, 现为北京工业大学自动化学院硕士研究生, 主要研究方向为仿生机器人、机器人智能控制的理论与应用。

E-mail: heruibjut@163.com

左国玉 (通信作者) 男, 1971 年生于安徽枞阳, 现为北京工业大学信息学部自动化学院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为机器人学习和遥操作机器人。

E-mail: zuoguoyu@bjut.edu.cn

于建均 女, 1965 年出生于北京, 现为北京工业大学信息学部自动化学院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为智能控制、机器人控制和模仿学习等。

E-mail: yujianjun@bjut.edu.cn