DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513739

基于人体运动干扰建模预测的外肢体机器人补偿控制研究*

戴 欢,曾 洪,张建喜,张竞天,宋爱国
(东南大学仪器科学与工程学院 南京 210096)

摘 要:针对人机协作中外肢体机器人受到人体运动干扰从而影响末端工作精度的问题,提出一种基于人体运动干扰建模预测的外肢体机器人补偿控制方法。首先,为了精确测量人体运动干扰,设计了融合 IMU 和视觉估计的 T265 视觉惯性里程计传感方案。其次,针对人-外肢体系统进行了运动学建模与分析,构造了末端位姿关于人体运动干扰和外肢体机器人关节运动参数的函数,并以末端位姿保持不变作为控制目标,提出一种基于 PID 前馈控制的运动干扰补偿控制方法。此外,为了提高人体运动干扰补偿控制的响应速度,提出一种基于卡尔曼滤波器的人体运动干扰预测方法,通过构建人体运动状态空间方程,利用卡尔曼滤波算法实现了人体运动轨迹预测。最后,设计了人体运动干扰预测实验和人体运动干扰补偿控制实验。实验结果表明,人体运动干扰预测值与实际值的绝对误差为 0.48±0.32 mm,对比有无预测方法时人体运动干扰补偿控制效果,预测方法将外肢体机器人末端在工作平面内的绝对误差由 3.18±2.17 mm 降低至 1.23±0.91 mm。实验验证了所提出的外肢体机器人补偿控制方法能够有效提高末端工作精度,且基于卡尔曼滤波的运动干扰预测方法在克服控制延迟上效果显著。

关键词:外肢体机器人;人体运动预测;干扰补偿控制;人机协作
中图分类号:TH89 **文献标识码**:A **国家标准学科分类代码**:510.80

Research on compensation control of supernumerary robotic arms based onmodeling and prediction of human motion disturbances

Dai Huan, Zeng Hong, Zhang Jianxi, Zhang Jingtian, Song Aiguo
(*School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China*)

Abstract: To address the degradation of end-effector accuracy in supernumerary robotic arms (SRAs) caused by human motion disturbances during human-robot collaboration, we propose a compensation control method based on modeling and prediction of these disturbances. First, we design a sensory scheme using T265 visual-inertial odometry, which integrates an inertial measurement unit (IMU) with visual estimation to accurately measure human-induced disturbances. Next, we develop a kinematic model of the human-SRA system, expressing the end-effector pose as a function of both human motion disturbances and SRA joint movements. The control objective is to maintain a stable end-effector pose, and for this, we develop a disturbance compensation strategy using feedforward proportional-integral-derivative (PID) control. To further enhance the compensation control response speed, we propose a predictive approach utilizing a Kalman filter to estimate human motion disturbances. The Kalman filter algorithm is used to accurately predict human motion trajectories by formulating a state-space equation for human motion. Finally, we conduct experiments on both human motion disturbance prediction and disturbance compensation control. Experimental results show that the absolute error between predicted and actual disturbances is 0.48±0.32 mm. A comparison of compensation performance with and without prediction shows that the proposed method reduces the absolute error of the SRA′s end-effector on the working plane from 3.18±2.17 mm to 1.23±0.91 mm. These findings confirm that the proposed compensation control strategy effectively improves end-effector accuracy, with the Kalman filter-based prediction method significantly reducing control delay.

Keywords: supernumerary robotic arms; human motion prediction; disturbance compensation control; human-robot collaboration

收稿日期:2025-02-09 Received Date: 2025-02-09
*基金项目:国家自然科学基金(62173089)项目资助

0　引　　言

外肢体机器人是一种新型的可穿戴式机器人,它通过与人体肢体异构的穿戴形式,能够作为人的“第三只手”,在工作范围、作业精度、灵活性等多方面增强人体[1-3]。外肢体机器人适用于需要双手同时作业,且作业空间超出人体范围的应用场景,尤其在飞机装配、船舱作业、抢险救灾、空间站维护等作业空间狭窄或是具有一定危险性的复杂任务场景,外肢体机器人能够发挥其独特优势。这些任务场景通常不适宜多人同时作业且大型机械难以进入工作,而外肢体机器人具备轻便紧凑的穿戴形式,能够以并行工作的方式协助操作者[4],拓展单人独立作业能力,提高作业效率,具备广阔的应用前景。

外肢体机器人最早由 Asada 团队[5-7]提出,面向飞机制造过程中的舱内装配作业,设计了一种独立于人体工作的穿戴式机械手臂,用于在狭小空间内进行天花板安装、机身钻孔等辅助作业,此后,外肢体机器人得到了广泛研究。当前国内外研究团队已经面向不同的应用需求,研制出多种类型的外肢体机器人,构型上包括具备手臂[8-9]、腿部[10]、手指[11-12]、尾巴[13]等功能的机械外肢体,控制方式包括肢体映射控制[14]、面部表情控制[15]、肌电信号控制[16]、脑电信号控制[17]等。然而,目前针对外肢体机器人与操作者协同工作中相互影响问题的研究仍然较少。在工程应用中,外肢体机器人基座附着于人体的穿戴形式使得机械臂实际上是一种特殊的浮动基座系统,人体不自主小幅运动引入的干扰会直接影响外肢体机器人末端的工作精度。因此,为提高人机协作中机器人的工作精度,需要针对人体运动干扰进行补偿控制[18-21]。为此,意大利 HRI2 实验室[22]使用惯性测量单元(inertial measurement unit,IMU)采集人体运动反馈,并基于人体全身运动学模型建立了运动补偿控制框架,实现对人体运动干扰的有效补偿,但使用 IMU 数量较多,存在一定冗余。Tian 等[23]提出一种基于光学跟踪的机械臂定位误差补偿方法,但基于固定相机的方案通常需要提前布置,使用场景受限。Tu 等[24]提出一种对具有不同任务状态的人-外肢体协同过程进行建模的任务模型,使用滑动平均算法对外肢体基座的位姿数据进行误差处理。Zhang 等[25]针对外肢体机器人浮动基座系统进行模型建立,并使用基座、末端传感器结合的方案设计了运动补偿控制器。上述方法由于缺乏对人体运动干扰的预测,控制上存在一定的延迟问题。Du 等[26]针对外肢体机器人协作抓取问题,提出一种多模态学习和控制框架,使用神经网络在线估计用户手部的三维空间位置及抓取力。Zhang 等[27]提出了一种基于运动预测网络的人体动作预测方法,根据历史 IMU 数据预测关节位置和速度,并还原人体未来的三维姿势。但该方法需要提前训练模型,且用户个体差异性会导致预测结果产生偏差,因而在实际应用中仍存在优化空间。

针对上述问题,提出一种基于人体运动干扰建模预测的外肢体机器人补偿控制方法。首先针对人体运动干扰测量问题,使用了融合 IMU 和视觉估计的 T265 视觉惯性里程计传感方案,具有集成度高、测量精确的优势。使用了基于卡尔曼滤波器的人体运动干扰预测方法以达到克服控制延迟的目的。针对外肢体机器人运动干扰补偿问题,建立了人-外肢体系统运动学模型,并在此基础上提出一种基于比例-积分-微分(proportional-integral-derivative,PID)前馈控制的运动干扰补偿控制方法。最后设计实验验证了方法在实时补偿人体运动干扰的有效性和稳定性。

1　外肢体机器人系统及人体运动干扰补偿简介

1.1　外肢体机器人硬件框架

本方案使用贴合人体的肩部穿戴辅具将外肢体机器人固定穿戴于肩部,且承重集中于人体上斜方肌。这种穿戴形式可以确保在不影响人体肢体正常活动的前提下减少基座与人体之间的扰动。通过位于肩部穿戴辅具的传感系统实时采集人体运动干扰,同时控制外肢体机器人进行运动干扰补偿,最终实现在人体产生运动干扰时保持外肢体机器人末端稳定的效果。外肢体机器人硬件框架如图 1 所示。

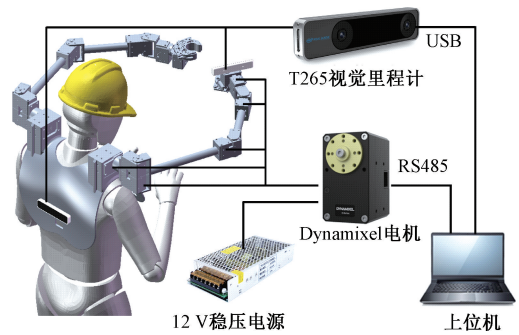

图 1　外肢体机器人硬件框架

Fig. 1　Hardware framework of the supernumerary robotic arms

所使用的外肢体机器人总重 3.96 kg,单个机械臂具有 5 自由度,单臂最大工作半径 527.5 mm,末端执行器采用夹爪形式。选用 Dynamixel 系列电机作为关节驱动电机,电机通过 RS485 协议与上位机通讯,通讯波特率为 3 Mbps。在外肢体机器人肩部穿戴辅具背部以及末端夹爪处安装 Intel RealSense T265 视觉惯性里程计,分别用于检测基座干扰和末端误差,视觉惯性里程计通过 USB

连接上位机,通讯频率为 200 Hz。外肢体机器人系统整体由 12 V 大功率稳压开关电源供电,能够确保关节电机在高负载时工作稳定。

1.2 人体运动干扰传感方案

为精确检测人体运动干扰,使用 Intel RealSense T265 视觉惯性里程计实时采集人体位置和姿态数据,人体运动干扰传感方案如图 2 所示。

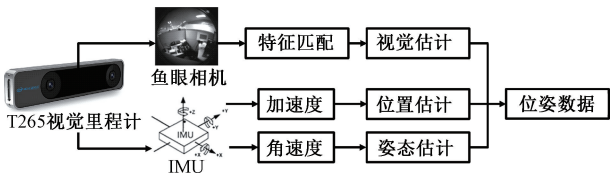

图 2 人体运动干扰传感方案

Fig. 2 Sensing scheme for human motion disturbances

由于仅使用 IMU 的传感方案在测量位移时存在漂移问题,仅使用视觉估计的传感方案测量精度不够,因而选用融合 IMU 和视觉估计的 T265 视觉惯性里程计以得到更加精确稳定的数据。T265 视觉惯性里程计内部包含一个 IMU 和一对鱼眼相机,通过嵌入式处理器运行视觉定位建图(visual simultaneous localization and mapping, V-SLAM)算法,将视觉和惯性传感信息融合到瞬时位置和映射中,在小范围精确位置追踪上具备优势,适用于对人体运动干扰的精确测量。

1.3 人体运动干扰补偿简介

针对工业装配、电力作业中外肢体机器人辅助平面钻孔、辅助稳定夹持等实际应用场景,为克服作业过程中人体运动对外肢体机器人末端的干扰,提出一种外肢体机器人补偿控制方法,能够实现工作平面内的运动干扰补偿。人体运动干扰补偿控制示意图如图 3 所示。

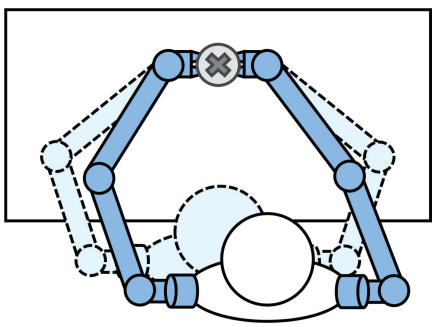

图 3 人体运动干扰补偿控制

Fig. 3 Diagram of human motion disturbance compensation control

在外肢体机器人辅助装配过程中,人体不自主的小幅运动会导致外肢体机器人末端同步受到干扰,降低了外肢体机器人的末端工作精度。图 1 中虚线表示人-外肢体前一时刻的位置,实线表示人-外肢体的当前位置,二者位置的偏移表示人体产生了运动干扰,外肢体机器人末端将会同步发生位置偏移。而此时外肢体机器人进行了补偿控制,通过关节运动控制抵消了干扰影响,使得末端仍然稳定在前一时刻位置,实现了对人体运动干扰的补偿。

2 人-外肢体系统运动学建模与分析

首先对人-外肢体系统建立坐标系,如图 4 所示。以世界坐标系 $\{O\}$ 为人-外肢体系统的参考坐标系,人体坐标系 $\{H\}$ 位于操作者人体躯干,基座坐标系 $\{B\}$ 附于外肢体机器人肩部穿戴辅具,末端坐标系 $\{E\}$ 附于外肢体机器人末端执行器。

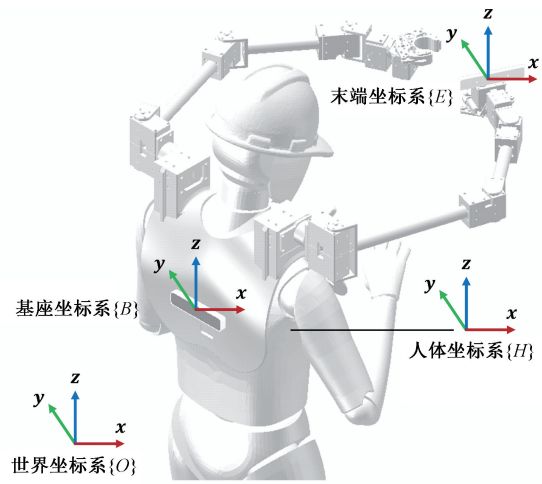

图 4 人-外肢体系统坐标系

Fig. 4 Human-supernumerary robotic arms system coordinate system

由于外肢体机器人通过肩部穿戴辅具固定于人体,可将人体坐标系 $\{H\}$ 与基座坐标系 $\{B\}$ 视为相对位姿保持不变。人体坐标系 $\{H\}$ 相对于世界坐标系 $\{O\}$ 的位姿由向量 ${}^{O}\boldsymbol{P}_{H} \in \Re^{3}$ 和旋转矩阵 ${}^{O}\boldsymbol{R}_{H} \in \Re^{3}$ 表示,经过坐标变换得到基座坐标系 $\{B\}$ 相对于世界坐标系 $\{O\}$ 的位姿,即:

$$\begin{bmatrix} {}^{O}\boldsymbol{P}_{B} \\ {}^{O}\boldsymbol{R}_{B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{O}\boldsymbol{P}_{H} + {}^{O}\boldsymbol{R}_{H} \cdot {}^{H}\boldsymbol{P}_{B} \\ {}^{O}\boldsymbol{R}_{H} \cdot {}^{H}\boldsymbol{R}_{B} \end{bmatrix} \tag{1}$$

由于人体与基座相对位姿保持不变,即 ${}^{H}\boldsymbol{P}_{B} = \boldsymbol{0}$, ${}^{H}\boldsymbol{R}_{B} = \boldsymbol{I}$, 其中 $\boldsymbol{0}$ 表示零向量,$\boldsymbol{I}$ 表示单位矩阵,则有:

$$\begin{bmatrix} {}^{O}\boldsymbol{P}_{B} \\ {}^{O}\boldsymbol{R}_{B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{O}\boldsymbol{P}_{H} \\ {}^{O}\boldsymbol{R}_{H} \end{bmatrix} \tag{2}$$

式(2)说明人体运动引起的位姿变化同步作用于外肢体机器人基座,因此,由安装于肩部穿戴辅具的视觉惯性里程计能够有效测量人体运动干扰。

根据位姿和速度的空间坐标变换,将末端坐标系$\{E\}$相对于基座坐标系$\{B\}$的位姿和速度映射至世界坐标系$\{O\}$中,得到末端坐标系$\{E\}$相对于世界坐标系$\{O\}$的位姿和速度。向量${}^{O}\boldsymbol{P}_{E}\in\Re^{3}$和旋转矩阵${}^{O}\boldsymbol{R}_{E}\in\Re^{3}$表示位姿,${}^{O}\boldsymbol{\nu}_{E}\in\Re^{3}$,${}^{O}\boldsymbol{\omega}_{E}\in\Re^{3}$表示线速度和角速度,则有:

$$\begin{bmatrix}{}^{O}\boldsymbol{P}_{E}\\ {}^{O}\boldsymbol{R}_{E}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}{}^{O}\boldsymbol{P}_{B}+{}^{O}\boldsymbol{R}_{B}\cdot{}^{B}\boldsymbol{P}_{E}\\ {}^{O}\boldsymbol{R}_{B}\cdot{}^{B}\boldsymbol{R}_{E}\end{bmatrix}\tag{3}$$

$$\begin{bmatrix}{}^{O}\boldsymbol{\nu}_{E}\\ {}^{O}\boldsymbol{\omega}_{E}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}{}^{O}\boldsymbol{\nu}_{B}+{}^{O}\boldsymbol{R}_{B}\cdot{}^{B}\boldsymbol{\nu}_{E}+{}^{O}\boldsymbol{\omega}_{B}\times{}^{O}\boldsymbol{R}_{B}\cdot{}^{B}\boldsymbol{P}_{E}\\ {}^{O}\boldsymbol{\omega}_{B}+{}^{O}\boldsymbol{R}_{B}\cdot{}^{B}\boldsymbol{\omega}_{E}\end{bmatrix}\tag{4}$$

式中:位姿$[{}^{O}\boldsymbol{P}_{E},{}^{O}\boldsymbol{R}_{E}]$和速度$[{}^{O}\boldsymbol{\nu}_{E},{}^{O}\boldsymbol{\omega}_{E}]$的表示均可分为末端分量和基座分量。具体包括末端分量的位姿部分$[{}^{B}\boldsymbol{P}_{E},{}^{B}\boldsymbol{R}_{E}]$和速度部分$[{}^{B}\boldsymbol{\nu}_{E},{}^{B}\boldsymbol{\omega}_{E}]$,基座分量的位姿部分$[{}^{O}\boldsymbol{P}_{B},{}^{O}\boldsymbol{R}_{B}]$和速度部分$[{}^{O}\boldsymbol{\nu}_{B},{}^{O}\boldsymbol{\omega}_{B}]$。

末端分量$[{}^{B}\boldsymbol{P}_{E},{}^{B}\boldsymbol{R}_{E}][{}^{B}\boldsymbol{\nu}_{E},{}^{B}\boldsymbol{\omega}_{E}]$由外肢体机器人关节位置和关节速度计算得到,通过机械臂正向运动学和雅可比(Jacobian)矩阵建立从关节空间到末端工作空间的映射关系,得到末端坐标系$\{E\}$相对于基座坐标系$\{B\}$的位姿和速度。$\boldsymbol{\theta}_{M}=[\theta_{1},\theta_{2},\cdots,\theta_{5}]^{\mathrm{T}}\in\Re^{5}$,$\dot{\boldsymbol{\theta}}_{M}\in\Re^{5}$分别表示外肢体机器人的关节位置和关节速度,根据机械臂正向运动学可将末端坐标系$\{E\}$相对于基座坐标系$\{B\}$的位姿写为:

$$\begin{bmatrix}{}^{B}\boldsymbol{P}_{E}\\ {}^{B}\boldsymbol{R}_{E}\end{bmatrix}={}^{B}FK_{E}(\boldsymbol{\theta}_{M})\tag{5}$$

通过 Jacobian 矩阵建立末端坐标系$\{E\}$相对于基座坐标系$\{B\}$的速度表达式,定义${}^{B}J_{M}(\boldsymbol{\theta}_{M})\in\Re^{6\times5}$为基座坐标系$\{B\}$中的 Jacobian 矩阵,则有:

$$\begin{bmatrix}{}^{B}\boldsymbol{\nu}_{E}\\ {}^{B}\boldsymbol{\omega}_{E}\end{bmatrix}={}^{B}J_{M}(\boldsymbol{\theta}_{M})\cdot\dot{\boldsymbol{\theta}}_{M}\tag{6}$$

基座分量$[{}^{O}\boldsymbol{P}_{B},{}^{O}\boldsymbol{R}_{B}][{}^{O}\boldsymbol{\nu}_{B},{}^{O}\boldsymbol{\omega}_{B}]$由位于基座的视觉惯性里程计采集位姿速度数据并计算得到。$\boldsymbol{x}_{B}=[\boldsymbol{p},\boldsymbol{r}]^{\mathrm{T}}$表示基座坐标系$\{B\}$相对于世界坐标系$\{O\}$的位姿。其中,$\boldsymbol{p}=[p_{x},p_{y},p_{z}]^{\mathrm{T}}\in\Re^{3}$表示三维空间坐标,$\boldsymbol{r}=[\alpha,\beta,\gamma]^{\mathrm{T}}\in\Re^{3}$表示 Z-Y-X 三轴欧拉角。$\dot{\boldsymbol{x}}_{B}=[{}^{O}\boldsymbol{\nu}_{B},{}^{O}\boldsymbol{\omega}_{B}]^{\mathrm{T}}$表示基座坐标系$\{B\}$相对于世界坐标系$\{O\}$的速度。$\boldsymbol{x}_{B}$和$\dot{\boldsymbol{x}}_{B}$直接由传感器获取,并表示为位姿部分$[{}^{O}\boldsymbol{P}_{B},{}^{O}\boldsymbol{R}_{B}]$和速度部分$[{}^{O}\boldsymbol{\nu}_{B},{}^{O}\boldsymbol{\omega}_{B}]$的形式。

由上述分析可知,末端分量由关节位置$\boldsymbol{\theta}_{M}$和关节速度$\dot{\boldsymbol{\theta}}_{M}$得到,基座分量由基座位姿$\boldsymbol{x}_{B}$和基座速度$\dot{\boldsymbol{x}}_{B}$得到,可将式(3)写为关于基座位姿$\boldsymbol{x}_{B}$和关节位置$\boldsymbol{\theta}_{M}$的函数,将式(4)写为关于基座速度$\dot{\boldsymbol{x}}_{B}$和关节速度$\dot{\boldsymbol{\theta}}_{M}$的函数,即:

$$\boldsymbol{x}_{E}=f_{p}(\boldsymbol{x}_{B},\boldsymbol{\theta}_{M})\tag{7}$$

$$\dot{\boldsymbol{x}}_{E}=f_{v}(\dot{\boldsymbol{x}}_{B},\dot{\boldsymbol{\theta}}_{M})\tag{8}$$

式中:$\boldsymbol{x}_{E}=[\boldsymbol{p},\boldsymbol{r}]^{\mathrm{T}}\in\Re^{6}$和$\dot{\boldsymbol{x}}_{E}=[{}^{O}\boldsymbol{\nu}_{E},{}^{O}\boldsymbol{\omega}_{E}]^{\mathrm{T}}\in\Re^{6}$分别表示末端坐标系$\{E\}$相对于世界坐标系$\{O\}$的位姿和速度。该式描述人-外肢体系统位姿和速度的运动学模型,由人体运动引起的干扰作用于基座位姿$\boldsymbol{x}_{B}$和基座速度$\dot{\boldsymbol{x}}_{B}$,而通过控制外肢体机器人关节位置$\boldsymbol{\theta}_{M}$和关节速度$\dot{\boldsymbol{\theta}}_{M}$,可对末端位姿$\boldsymbol{x}_{E}$和末端速度$\dot{\boldsymbol{x}}_{E}$进行干扰补偿,即实现在人体运动干扰下外肢体机器人末端的稳定工作。

3　运动干扰建模预测和补偿控制

3.1　人-外肢体系统运动干扰补偿控制框架

由于人-外肢体系统运动干扰补偿控制需要经过干扰测量,运动规划,指令执行的过程,通常难以实现对干扰的及时补偿。为克服控制延时问题,使用人体运动轨迹预测算法提前感知干扰。将人体运动构建为线性系统状态方程,使用视觉惯性里程计的观测数据对系统状态进行最优估计,该模型适用于线性卡尔曼滤波算法,能够实现对运动干扰的预测。

而人体运动干扰补偿控制的最终目标是在外肢体机器人基座受到运动干扰的情况下保持末端的稳定,即令末端坐标系$\{E\}$在世界坐标系$\{O\}$中的位姿变化量$\Delta\boldsymbol{x}_{E}=\boldsymbol{0}$。因而可将问题转化为求解关节位置$\boldsymbol{\theta}_{M}$的最优值,使得在基座位姿$\boldsymbol{x}_{B}$受到干扰浮动时保持末端位姿$\boldsymbol{x}_{E}$不变。

人-外肢体系统运动干扰补偿控制框架如图 5 所示,包括人-外肢体系统、卡尔曼滤波器、控制系统。人-外肢体系统中,外肢体机器人通过关节驱动器执行末端的运动控制,安装于末端的视觉惯性里程计获取末端的实际位姿,人体运动干扰作用于外肢体基座,由安装在肩部穿戴辅具的视觉惯性里程计获取基座位姿测量值。基座位姿测量值经过卡尔曼滤波状态预测和状态更新过程,得到基座位姿预测值。控制系统中,将末端传感器检测到的末端位姿偏差作为反馈,将基座位姿预测值(即对运动干扰的预测)作为前馈,计算出末端位姿所需的补偿量,经过机械臂逆运动学求解得到各关节需执行的控制量。

3.2　基于卡尔曼滤波的运动干扰预测

首先,基于人-外肢体系统运动学模型,使用线性卡尔曼滤波器对人体在世界坐标系中的运动干扰进行预测。定义系统状态变量$\boldsymbol{X}=[\boldsymbol{p}_{B},\boldsymbol{v}_{B}]^{\mathrm{T}}\in\Re^{6}$,其中$\boldsymbol{p}_{B}\in\Re^{3}$为基座坐标系$\{B\}$相对于世界坐标系$\{O\}$的位置,$\boldsymbol{v}_{B}\in\Re^{3}$为基座坐标系$\{B\}$相对于世界坐标系$\{O\}$的速度。构建系统状态空间方程和观测方程,即:

$$\boldsymbol{X}_{k}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{X}_{k-1}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_{k-1}+\boldsymbol{w}_{k-1}\tag{9}$$

$$\boldsymbol{z}_{k}=\boldsymbol{H}\boldsymbol{X}_{k}+\boldsymbol{v}_{k}\tag{10}$$

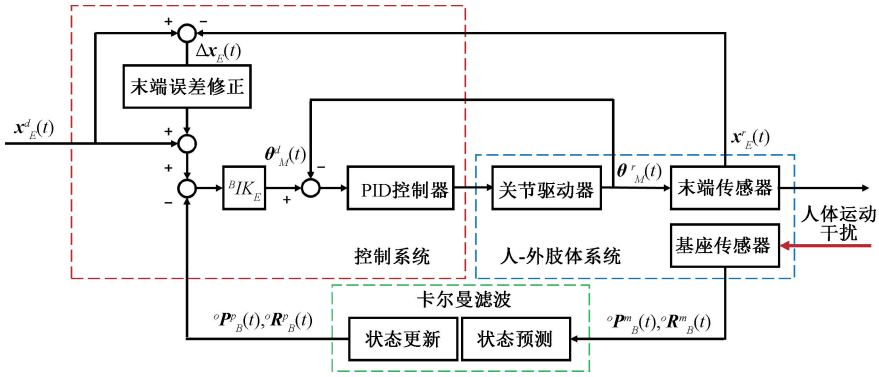

图 5 人-外肢体系统运动干扰补偿控制框架

Fig. 5 Motion disturbance compensation control framework for the human-supernumerary robotic arms system

式中:状态转移矩阵 $\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{I}_3 & \Delta t\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{I}_3\end{bmatrix}$;状态观测矩阵 $\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{I}_3 & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{I}_3\end{bmatrix}$;控制输入矩阵 $\boldsymbol{B}$ 和控制向量 $\boldsymbol{u}_{k-1}$ 在本模型设置为 0;$\boldsymbol{z}_k$ 为观测量;$\boldsymbol{w}_{k-1}$ 为过程噪声,满足 $p(\boldsymbol{w})=N(0,\boldsymbol{Q})$ 的高斯分布;$\boldsymbol{v}_k$ 为测量噪声,满足 $p(\boldsymbol{v})=N(0,\boldsymbol{R})$ 的高斯分布;$\boldsymbol{Q}$ 为测量噪声矩阵;$\boldsymbol{R}$ 为过程噪声协方差矩阵。由此,得到卡尔曼滤波状态预测步骤,即:

$$\hat{\boldsymbol{X}}_k^- = \boldsymbol{A}\hat{\boldsymbol{X}}_{k-1} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_{k-1} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{P}_k^- = \boldsymbol{A}\boldsymbol{P}_{k-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{Q} \tag{12}$$

式中:$\boldsymbol{K}_k=\dfrac{\boldsymbol{P}_k^-\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}}{\boldsymbol{H}\boldsymbol{P}_k^-\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{R}}$ 为 k 时刻先验状态估计值;$\hat{\boldsymbol{X}}_{k-1}$ 为 $k-1$ 时刻后验状态估计值;$\boldsymbol{P}_k^-$ 为 k 时刻先验估计协方差;$\boldsymbol{P}_{k-1}$ 为 $k-1$ 时刻后验估计协方差。进一步,得到卡尔曼滤波状态更新步骤,即:

$$\boldsymbol{K}_k=\frac{\boldsymbol{P}_k^-\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}}{\boldsymbol{H}\boldsymbol{P}_k^-\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{R}} \tag{13}$$

$$\hat{\boldsymbol{X}}_k=\hat{\boldsymbol{X}}_k^- + \boldsymbol{K}_k(\boldsymbol{z}_k - \boldsymbol{H}\hat{\boldsymbol{X}}_k^-) \tag{14}$$

$$\boldsymbol{P}_k=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{K}_k\boldsymbol{H})\boldsymbol{P}_k^- \tag{15}$$

式中:$\boldsymbol{K}_k$ 为卡尔曼增益;$\boldsymbol{z}_k-\boldsymbol{H}\hat{\boldsymbol{X}}_k^-$ 为观测值和预测值的残差;计算得到预测更新后系统状态向量的最优估计值 $\hat{\boldsymbol{X}}_k$ 和最优协方差矩阵 $\boldsymbol{P}_k$。

通过传感系统获取到在 $k-1$ 时刻基座坐标系 $\{B\}$ 相对于世界坐标系 $\{O\}$ 的位姿测量值 $[{}^{O}\boldsymbol{P}_B^m(k-1),{}^{O}\boldsymbol{R}_B^m(k-1)]$,以此作为系统状态变量参数代入卡尔曼滤波器,得到 k 时刻的预测值 $[{}^{O}\boldsymbol{P}_B^p(k),{}^{O}\boldsymbol{R}_B^p(k)]$,完成对人体运动干扰的预测。该预测值可作为 k 时刻的人体运动干扰输入控制系统,以提高控制系统的实时性。

3.3 基于 PID 前馈控制的运动干扰补偿控制

以人-外肢体系统在 t 时刻的状态变量构建控制框架,$\boldsymbol{x}_E^d(t)=[{}^{O}\boldsymbol{P}_E^d(t),{}^{O}\boldsymbol{R}_E^d(t)]^{\mathrm{T}}$ 表示末端坐标系 $\{E\}$ 相对于世界坐标系 $\{O\}$ 的期望位姿,位于末端的 T265 视觉惯性里程计测量末端坐标系 $\{E\}$ 相对于世界坐标系 $\{O\}$ 的实际位姿 $\boldsymbol{x}_E^r(t)=[{}^{O}\boldsymbol{P}_E^r(t),{}^{O}\boldsymbol{R}_E^r(t)]^{\mathrm{T}}$,将末端位姿 $\boldsymbol{x}_E^d(t)$ 与实际位姿 $\boldsymbol{x}_E^r(t)$ 的差值 $\Delta\boldsymbol{x}_E(t)$ 作为末端误差修正量输入控制系统,以此作为控制的反馈环节,即:

$$\Delta\boldsymbol{x}_E(t)=\boldsymbol{x}_E^d(t)-\boldsymbol{x}_E^r(t) \tag{16}$$

设 K 为末端误差校正系数,以末端期望位姿作为控制对象,加入修正量得到:

$$\boldsymbol{x}_E^d(t)=\boldsymbol{x}_E^d(t)+K\Delta\boldsymbol{x}_E(t) \tag{17}$$

以卡尔曼滤波预测和更新过程得到的基座位姿预测值 $\boldsymbol{x}_B^p(t)=[{}^{O}\boldsymbol{P}_B^p(t),{}^{O}\boldsymbol{R}_B^p(t)]^{\mathrm{T}}$ 作为控制的前馈量,即在检测到基座干扰时立刻进行补偿控制,以达到及时精确控制的目的。根据末端期望位姿 $\boldsymbol{x}_E^d(t)$ 与基座位姿预测值 $\boldsymbol{x}_B^p(t)$ 的偏差计算末端坐标系 $\{E\}$ 相对于基座坐标系 $\{B\}$ 的期望位姿,即:

$$\begin{bmatrix}{}^{B}\boldsymbol{P}_E^d(t)\\ {}^{B}\boldsymbol{R}_E^d(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}{}^{O}\boldsymbol{R}_B^{p\,-1}(t)\cdot({}^{O}\boldsymbol{P}_E^d(t)-{}^{O}\boldsymbol{P}_B^p(t))\\ {}^{O}\boldsymbol{R}_B^{p\,-1}(t)\cdot{}^{O}\boldsymbol{R}_E^d(t)\end{bmatrix} \tag{18}$$

根据机械臂逆运动学建立末端工作空间至关节空间的映射关系,得到外肢体机器人的期望关节位置为:

$$\boldsymbol{\theta}_M^d(t)={}^{B}IK_E({}^{B}\boldsymbol{P}_E^d(t),{}^{B}\boldsymbol{R}_E^d(t)) \tag{19}$$

最后,由关节电机的编码器反馈实际关节位置 $\boldsymbol{\theta}_M^r(t)$,将期望关节位置 $\boldsymbol{\theta}_M^d(t)$ 与实际关节位置 $\boldsymbol{\theta}_M^r(t)$ 的偏差输入关节驱动单元的 PID 控制器,实现对干扰量的补偿控制。

4 实验与分析

4.1 实验平台及实验设计

针对人体运动干扰预测方法和外肢体机器人补偿控制方法的有效性验证,分别开展人体运动干扰预测实验和人体运动干扰补偿控制实验,实验平台如图 6 所示。

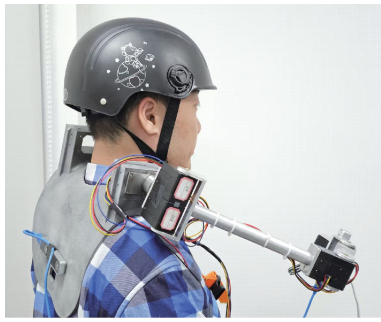

图 6　人体运动干扰补偿控制实验

Fig. 6　Human motion disturbance compensation control experiment

实验使用位于外肢体机器人肩部穿戴辅具的视觉惯性里程计测量三维空间中的人体运动位姿,使用位于外肢体机器人末端的视觉惯性里程计测量末端实际位姿。实验以水平工作面作为末端定点稳定控制的工作空间,要求佩戴者在 X 和 Y 轴方向进行小幅身体运动,同时令外肢体机器人进入补偿控制的工作状态,控制机械臂末端稳定于给定位置,以此验证人体运动干扰预测效果以及在工作平面内的运动干扰补偿控制性能。其中,人体运动干扰预测实验将人体在工作空间中运动干扰的实际值与基于卡尔曼滤波的运动干扰预测值进行了对比。人体运动干扰补偿控制实验对比了有无预测算法时对人体运动干扰的补偿控制效果。

4.2　人体运动干扰预测实验

实验采集佩戴者在 10 s 内小幅运动过程中实际的人体运动干扰,并记录身体在 X 和 Y 轴方向的位移。使用卡尔曼滤波器计算下一时刻运动干扰的预测值,预测值与实际值的对比如图 7 所示,表 1 列出了预测值与实际值的误差。

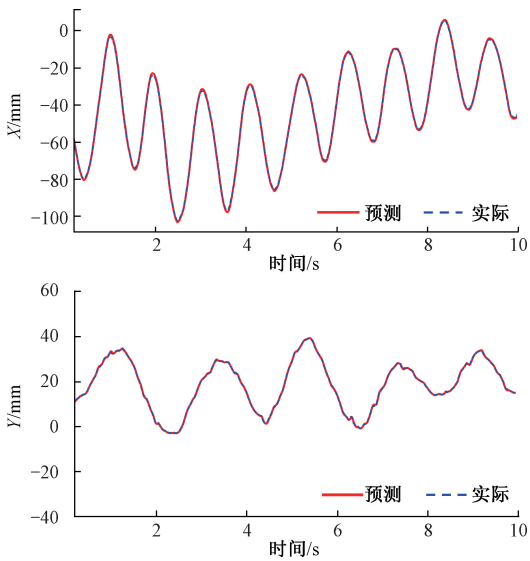

图 7　人体运动干扰预测效果

Fig. 7　Prediction performance of human motion disturbance

表 1　人体运动干扰预测实验结果

Table 1　Experimental results of human motion disturbance prediction　(mm)

误差类型	X 轴预测误差	Y 轴预测误差
平均误差	0.41	0.54
标准差	0.32	0.32
最大误差	2.16	2.41

图 7 中虚线表示人体运动干扰的实际测量值,实线表示卡尔曼滤波器计算得出的预测值。由于人体运动干扰在总体上具有幅度较小频率较低的特点,在 10 s 内的运动曲线较为平滑,抖动与突变较少,因此基于卡尔曼滤波的运动干扰预测效果明显,预测值对实际值的跟踪情况良好。预测值与实际值在 x 轴的绝对误差为 0.41±0.32 mm,最大误差为 2.16 mm,在 y 轴的绝对误差为 0.54±0.32 mm,最大误差为 2.41 mm。工作平面内的平均预测误差为 0.48±0.32 mm。预测误差在 x 和 y 轴有一定偏差的原因是人体运动干扰的不规律性使得卡尔曼滤波器的结果具有波动性,但波动幅度不大,对实验结果影响较小。根据实验结果,预测效果在总体上较为理想,针对提出的人-外肢体系统运动干扰模型,实验验证了基于卡尔曼滤波的运动干扰预测方法具备有效性。

4.3　人体运动干扰补偿控制实验

实验通过位于基座的视觉惯性里程计测量人体运动干扰,并与末端视觉惯性里程计所测量的实际末端位移相比较。实验按照有无预测算法分为 2 组,以此验证基于卡尔曼滤波的运动干扰预测方法是否能够有效提高补偿控制的实时性和精确性。在无预测实验中,使用人体运动干扰的测量值输入补偿控制系统。而在有预测实验中,将人体运动干扰的预测值输入补偿控制系统。比较人体运动干扰补偿控制方法中基座和末端的运动曲线,实验结果如图 8 所示。

图 8 中实线为外肢体机器人末端位移,虚线为外肢体机器人基座位移,Ⅰ、Ⅱ表示无预测算法时人体运动干扰补偿效果,Ⅲ、Ⅳ表示有预测算法时人体运动干扰补偿效果。由于人体运动干扰直接作用于基座,基座运动曲线变化幅度较大,而外肢体机器人补偿控制方法抑制了末端受到的运动干扰,末端运动曲线维持在初始位置。由此,所提出的人体运动干扰补偿控制方法能够实现在基座受到较大幅度干扰时,末端仍然保持稳定的控制效果,有效提高了人机协作时外肢体机器人末端工作稳定性。

为了量化控制延迟,实验测量了从采集人体运动干扰到外肢体机器人开始执行控制指令的时间差。以读取

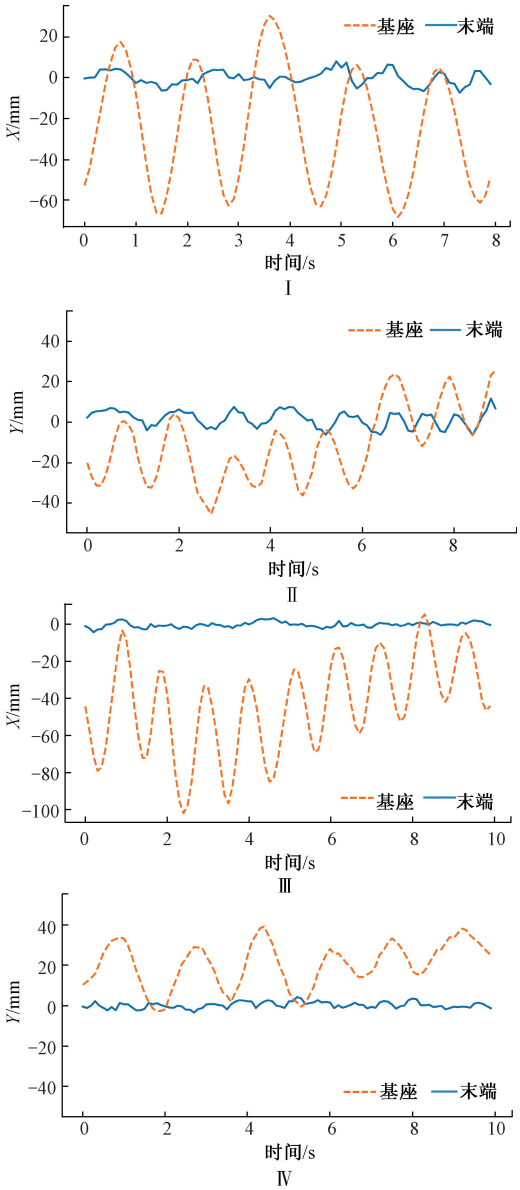

图 8 有、无预测算法时人体运动干扰补偿控制效果

Fig. 8 Result of human motion disturbance compensation control, with and without prediction algorithms

视觉惯性里程计数据的时间作为初始时刻,以系统完成控制指令发送作为结束时刻,经过 1 000 次测算得到平均控制延迟为 16.45 ms。控制延迟导致了对人体运动干扰的实际补偿不够及时,末端绝对误差偏大的情况。由于在通讯、计算速度等方面直接减小控制延迟的方法较难实现,实验通过预测人体运动干扰,间接减少从干扰测量到控制响应的时间,以提高补偿控制效果。

为了验证预测算法在提高补偿控制性能方面的有效性,实验对比了有无预测算法时人体运动干扰补偿控制的效果,实验结果如图 8 和表 2 所示。在无预测算法时,末端实际位置与初始位置在 X 轴的绝对误差为 2.73±2.07 mm,最大误差为 8.19 mm,在 Y 轴的绝对误差为 3.62±2.20 mm,最大误差为 11.53 mm。而在有预测算法时,末端实际位置与初始位置在 X 轴的绝对误差为 1.20±0.91 mm,最大误差为 4.53 mm,在 Y 轴的绝对误差为 1.26±0.91 mm,最大误差为 4.20 mm。基于卡尔曼滤波的运动干扰预测方法将外肢体机器人末端在工作平面内的绝对误差由 3.18±2.17 mm 降低至 1.23±0.91 mm,其原因在于预测方法是对人体运动干扰的提前测量,减少从干扰测量到控制响应的时间,使得对人体运动干扰的补偿控制更加准确、及时。实验结果表明,基于卡尔曼滤波的运动干扰预测方法在克服控制延迟,提高补偿控制精度上效果显著。

表 2 人体运动干扰补偿控制实验结果

Table 2 Experimental results of human motion disturbance compensation control (mm)

误差类型	$\lvert\Delta x\rvert_{无预测}$	$\lvert\Delta y\rvert_{无预测}$	$\lvert\Delta x\rvert_{有预测}$	$\lvert\Delta y\rvert_{有预测}$
平均误差	2.73	3.62	1.20	1.26
标准差	2.07	2.20	0.91	0.91
最大误差	8.19	11.53	4.53	4.20

5 结 论

本研究提出一种基于人体运动干扰建模预测的外肢体机器人补偿控制方法。使用融合 IMU 和视觉估计的视觉惯性里程计传感方案精确测量了人体运动干扰,通过建立人-外肢体系统运动学模型,将人体运动干扰和外肢体机器人补偿控制的作用映射到末端工作空间中。提出基于卡尔曼滤波的运动干扰预测方法,运动轨迹预测值与实际值的绝对误差为 0.48±0.32 mm。提出一种基于 PID 前馈控制的运动干扰补偿控制方法,通过预测算法将人体运动干扰补偿控制的绝对误差由 3.18±2.17 mm 降低至 1.23±0.91 mm,验证了该方法在克服控制延迟以及提高补偿控制精度上的有效性。

本研究实现了在人机协作中外肢体机器人对人体运动干扰的补偿控制,未来将针对实际辅助装配应用场景中更为复杂的人机协作任务,结合所提出的人体运动干扰补偿控制方法,为工作精度和稳定性要求较高的外肢体机器人辅助作业问题提供解决方法。

参考文献

[1] 荆泓玮,朱延河,赵思恺, 等. 外肢体机器人研究现状及发展趋势[J]. 机械工程学报, 2020, 56(7): 1-9.
JING H W, ZHU Y H, ZHAO S K, et al. Research status and development trend of supernumerary robotic

limbs[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(7): 1-9.

[2] 赵思恺,李长乐,张宗伟, 等. 模块化可重构外肢体机器人[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4): 218-227.
ZHAO S K, LI CH L, ZHANG Z W, et al. Modular and reconfigurable supernumerary robotic limbs[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(4): 218-227.

[3] TONG Y CH, LIU J G. Review of research and development of supernumerary robotic limbs[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2021, 8(5): 929-952.

[4] 齐飞,张恒,孙杰, 等. 考虑驱动耦合的绳驱动外肢体机器人运动建模及控制研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(6): 21-34.
QI F, ZHANG H, SUN J, et al. Modeling and control of cable-driven supernumerary robotic limbs motion considering drive coupling[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(6): 21-34.

[5] PARIETTI F, ASADA H H. Supernumerary robotic limbs for aircraft fuselage assembly: Body stabilization and guidance by bracing[C]. 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2014: 1176-1183.

[6] BONILLA B L, ASADA H H. A robot on the shoulder: Coordinated human-wearable robot control using coloured petri nets and partial least squares predictions[C]. 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2014: 119-125.

[7] PARIETTI F, ASADA H. Supernumerary robotic limbs for human body support[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2016, 32(2): 301-311.

[8] LUO J W, GONG Z L, SU Y, et al. Modeling and balance control of supernumerary robotic limb for overhead tasks[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6(2): 4125-4132.

[9] XU J J, ZHAO M CH, ZHANG T Y, et al. A rigid-flexible supernumerary robotic arm/leg: Design, modeling, and control[J]. Electronics, 2024, 13(20): 4106.

[10] PARIETTI F, CHAN K C, HUNTER B, et al. Design and control of supernumerary robotic limbs for balance augmentation[C]. 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2015: 5010-5017.

[11] WU F Y, ASADA H H. Decoupled motion control of wearable robot for rejecting human induced disturbances[C]. 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2018: 4103-4110.

[12] YANG J M, KIM Y, KIM J, et al. Development of flexure-based supernumerary robotic finger for hand function augmentation[J]. Advanced Intelligent Systems, 2024: 2400131.

[13] ABEYWARDENA S, FARKHATDINOV I. Towards enhanced stability of human stance with a supernumerary robotic tail[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2023, 8(9): 5743-5750.

[14] SASAKI T, SARAIJI M Y, FERNANDO C L, et al. MetaLimbs: Multiple arms interaction metamorphism[J]. ACM,2017: 3084822.

[15] FUKUOKA M, VERHULST A, NAKAMURA F, et al. Facedrive: Facial expression driven operation to control virtual supernumerary robotic arms[C]. International Conference in Computer Graphics and Interactive Techniques, the Eurographics Association, 2019: 3361888.

[16] PARIETTI F, ASADA H H. Independent, voluntary control of extra robotic limbs[C]. 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2017: 5954-5961.

[17] PENALOZA C I, NISHIO S. BMI control of a third arm for multitasking[J]. Science Robotics, 2018, 3(20): eaat1228.

[18] GIAMMARINO A, GANDARIAS J M, BALATTI P, et al. SUPER-MAN: Supernumerary robotic bodies for physical assistance in human-robot conjoined actions[J]. Mechatronics, 2024, 103: 103240.

[19] 常洪彬,谷影冬,孙平, 等. 基于 IMU 的 PSR-MPC 人机速度协调防跌倒方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(12): 218-227.
CHANG H B, GU Y D, SUN P, et al. PSR-MPC human-robot speed coordination fall prevention method based on IMU[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(12): 218-227.

[20] 乔贵方,蒋欣怡,高春晖, 等. 基于多目标优化的工业机器人位置与姿态精度提升方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(12): 217-224.
QIAO G F, JIANG X Y, GAO CH H, et al. Method for improving position and attitude accuracy of industrial robots based on multi-objective optimization[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(12): 217-224.

[21] LUO J, LIU SH Y, SI W Y, et al. Enhancing human-

robot collaboration: Supernumerary robotic limbs for object balance[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2024, 55(2): 1334-1347.

[22] ZHANG X, BALATTI P, LEONORI M, et al. A human motion compensation framework for a supernumerary robotic arm[C]. 2023 IEEE-RAS 22nd International Conference on Humanoid Robots, 2023: 1-8.

[23] TIAN Y, FENG W, OUYANG M, et al. A positioning error compensation method for multiple degrees of freedom robot arm based on the measured and target position error[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2022, 14(5): 16878132221090094.

[24] TU ZH X, FANG Y J, LENG Y Q, et al. Task-based human-robot collaboration control of supernumerary robotic limbs for overhead tasks[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2023, 8(8): 4505-4512.

[25] ZHANG Q H, SUI D B, JING H W, et al. Motion-compensation control of supernumerary robotic arms subject to human-induced disturbances[J]. Advanced Intelligent Systems, 2024,6(5): 2300448.

[26] DU Y W, AMOR H B, JIN J, et al. Learning-based multimodal control for a supernumerary robotic system in human-robot collaborative sorting[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2024, 9(4): 3435-3442.

[27] ZHANG X X, ZHANG H J, HU J H, et al. Motion forecasting network (MoFCNet): IMU-based human motion forecasting for hip assistive exoskeleton[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2023, 8(9): 5783-5790.

作者简介

戴欢,2018 年于扬州大学获得学士学位,现为东南大学硕士研究生,主要研究方向为外肢体机器人。

E-mail:mc1982484835@163.com

Dai Huan received his B. Sc. degree from Yangzhou university in 2018. Now he is a M. Sc. student at Southeast university. His main research interest is supernumerary robotic arms.

曾洪(通信作者),2003 年于南京理工大学获得学士学位,2006 年于东南大学获得硕士学位,2009 年于香港浸会大学获得博士学位,现为东南大学教授,主要研究方向为智能康复机器人、外肢体机器人、巡检机器人。

E-mail:hzeng@seu.edu.cn

Zeng Hong(Corresponding author) received his B. Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2003, received his M. Sc. degree from Southeast university in 2006, received his Ph. D. degree from Hong Kong Baptist University in 2009. Now he is a professor at Southeast university. His main research interests include intelligent rehabilitation robot, supernumerary robotic arms and inspection robot.