

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210142

基于力估计与切换控制的六足机器人三边遥操作^{*}

李佳钰^{1,2}, 黄启霖¹, 尤波¹, 张喜洋¹, 丁亮³

(1. 哈尔滨理工大学黑龙江省复杂智能系统与集成重点实验室 哈尔滨 150080; 2. 哈尔滨理工大学先进制造智能化技术教育部重点实验室 哈尔滨 150080; 3. 哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室 哈尔滨 150080)

摘要:传统三边遥操作系统的力传感器对主从端交互力进行测量时局限性较大,且在共享权重切换时易导致系统不稳定,本文设计基于力估计与权重切换控制的六足机器人三边遥操作控制架构。针对系统各端口交互力信息缺失的问题,设计一种非线性交互力估计器,实现对各端口间交互力的实时估计。聚焦双操作者控制权重动态调整过整中的柔顺切换问题,本文基于共享控制策略,设计权重因子自适应切换算法。为保证所提出系统的稳定性及透明度,融合力估计器及权重切换算法,设计遥操作系统的控制器。通过力反馈设备分别和 Vortex 与 ElSpider 六足机器人搭建半物理仿真平台与实物实验平台,对本文提出控制方法进行验证。相对于传统三边遥操作,实验表明在平坦地形下速度跟踪性提高了 45.12%,力跟踪提高了 64.71%;在崎岖地形下速度跟踪提高了 39.02%,力跟踪提高了 29.41%。

关键词: 六足机器人; 三边遥操作; 交互力估计; 共享控制; 权重因子动态调节

中图分类号: TP24 TH-39 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.30

Trilateral teleoperation of hexapod robot based on force estimation and switching control

Li Jiayu^{1,2}, Huang Qilin¹, You Bo¹, Zhang Xiyang¹, Ding Liang³

(1. Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Complex Intelligent System and Integration, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of advanced manufacturing intelligent technology, Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 3. State Key Laboratory of Robotics and Systems, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: The force sensor of the traditional trilateral teleoperation system has large limitation in measuring the interaction force of the master and slave. It is easy to cause system instability when the shared weight is switched. In this article, a trilateral teleoperation control architecture of the hexapod robot is designed, which is based on force estimation and weight switching control. A nonlinear interaction force estimator is designed to estimate the interaction force between ports in real time. An adaptive switching algorithm for the weight factors is designed, which is based on the shared control strategy to focus on the compliant switching problem in the dynamic adjustment of the weight of two operators. To ensure the stability and transparency of the proposed system, the controller of the teleoperation system is designed by combining the force estimator and the weight switching algorithm. The force feedback device and Vortex and ElSpider hexapod robots are respectively used to establish a semi-physical simulation platform and a physical experiment platform to evaluate the proposed control method. Compared with the traditional trilateral teleoperation, experimental results show that the speed tracking performance is improved by 45.12% and the force tracking performance is improved by 64.71% on flat terrain. In rugged terrain, the speed tracking is improved by 39.02% and the force tracking is improved by 29.41%.

Keywords: hexapod robot; trilateral teleoperation; interaction force estimation; shared control; dominance factor adjustment

收稿日期: 2022-07-16 Received Date: 2022-07-16

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51905136)、黑龙江省自然科学基金项目(LH2020E088)、机器人技术与系统国家重点实验室开放基金(SKLR-2022-KF-18)项目资助

0 引言

机器人被广泛推广的主要原因在于其能代替人类完成具有潜在危险或人力难以完成的任务,进而降低人类在任务中可能受到的危害^[1-2]。机器人按移动方式的不同一般分为:足式、轮式、履带式机器人等^[3]。由于足式机器人其腿部结构的特殊性,与轮式/履带式机器人相比有更强的地形适应能力^[4]。足式机器人的行走轨迹由一系列离散的脚步组成^[5-6],这使其能够更适应未经改善的地形,而且对环境的破坏也更小^[7]。因此足式机器人已经成为现阶段移动机器人领域的研究热点。现阶段足式机器人智能算法仍难以满足机器人在复杂环境下自主行走任务的需求,因此现阶段常在机器人控制系统中加入遥操作技术,以此提升足式机器人的任务执行能力。

遥操作技术的实质是通过操作者操作主端机器人,由此将操作者的操控意图融入到从端机器人控制系统中,从而实现机器人的远程控制^[8]。通常遥操作系统分为双边控制架构^[9]和多边控制架构^[10]。然而,面向六足机器人的复杂构型,且多输入多输出的控制通道,若采用常规的单操作者双边遥操作控制方式,易受到多方因素的干扰,导致误操作的发生。因此,选择基于双操作者的多边协同遥操作方式,将会很大程度的减轻单个操作者的操控负担,从而提升六足机器人遥操作过程的可靠性^[11]。

交互力的反馈信息在机器人遥操作的闭环控制中起到至关重要的作用,尤其是在保证系统指令跟踪性及透明性方面^[12-13]。若要充分发挥多边遥操作技术在足式机器人控制体系中的应用,则需要实时监控操作者与主端机器人以及环境端与从端机器人的交互力信息,由此进行系统各通道间力信号的传输与反馈,提升足式机器人多边协同遥操作系统较好的临场感以及稳定的闭环控制^[14-15]。由于六足机器人机构的复杂性,安装传感器难以确保测量的准确性,因此对六足机器人遥操作系统中设计交互力估计器是解决上述问题的重要方法。

多边遥操作系统多采用共享控制架构^[16-17],基于权重因子分配各通道间的控制主导权。由于常规多边遥操作系统往往考虑其控制框架设计的复杂程度,常将共享控制权重因子设置成定值,由此固化各通道的控制权重^[18]。然而,六足机器人行走复杂环境下,由于各操作者操控技术水平的差别,因此,需要通过动态调节各操作者的控制主导权,利用变权重的方式,在线更新权重因子,进而设计一种共享权重因子自适应柔顺调控策略,以实现六足机器人更好的多边协同性与交互性。

本文提出了基于双操作者的六足机器人三边遥操作系统,该系统由2个主端机器人和1个从端六足机器人

构成。在遥操作系统中需要主从端机器人的交互力信息,采用力传感器测量时很难保证长时间测量的准确性。本文针对前述问题将交互力估计算法融入到主从端子系统中,基于非线性干扰观测器设计交互力估计器,以此减少交互力控制的遥操作系统对于力传感器测量的依赖性。引入变权重因子对主从端多通道内的控制主导权进行分配,并设计权重因子的动态切换算法。采用一种柔性过渡的方式实现多操作者间操控模式的平滑切换。综上所述,融合了交互力估计器和权重因子自适应切换算法,设计双主端单从端的控制器,同时兼顾六足机器人三边遥操作系统的稳定性及透明性。

1 六足机器人遥操作系统

1.1 六足机器人构型

所述的遥操作从端系统由仿生六足机器人本体及其控制器组成,机器人构型如图1所示。六足机器人由机体部分和六条腿组成,机体为六边形结构,六条腿均匀分布在机体每侧。每条腿包含3个自由度,分别为踝关节、踝关节和膝关节,且每条腿的结构相同,其中踝关节为旋转关节,用来连接机体与基关节;髋关节为一级俯仰关节,连接机体与大腿;膝关节为二级俯仰关节,连接大腿与小腿。

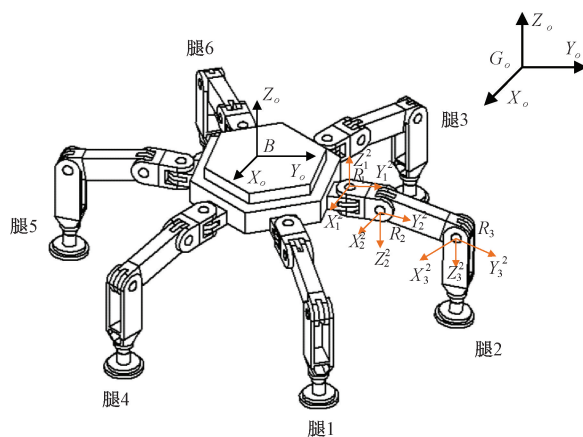


图1 六足机器人构型

Fig. 1 Hexapod robot structure

1.2 遥操作系统整体方案

本文提出三端口网络模型以此量化双操作者的三边遥操作系统,三边遥操作系统架构示意图如图2所示,当2个主端机器人共同控制单个从端机器人,控制信号的冲突不可避免,所以要针对不同主端机器人的控制信号进行权限的分配。若使用固定的权重因子,则无法根据从端机器人在任务中的实际情况灵活控制,因此本文采用变权重因子,对主端控制权限进行分配。另外,为获取主

从端的交互力信息,改善系统的闭环控制效果,提升遥操作系统的透明性,通常在遥操作系统中引入力的反馈信号,主从端的力信号由传感器测量,但为准确获取六足机器人与环境端接触的交互力,需要将力传感器安装在足端,又由于传感器在六足机器人行走过程中易损坏,因此设计交互力估计器来代替传感器则可解决上述问题。

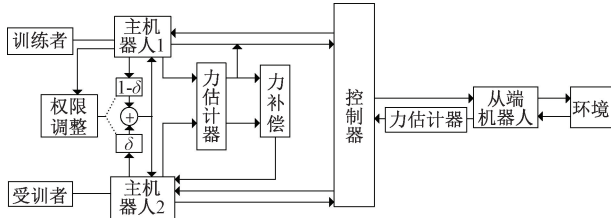


图2 三边遥操作系统架构图

Fig. 2 Trilateral teleoperation system architecture diagram

本文设计了基于非线性交互力估计器的六足机器人三边遥操作控制架构,以常规四通道控制结构为基础,在所述遥操作系统中,两个主端机器人对从端六足机器人的机体速度进行跟踪控制。操作者与主端机器人以及环境端与从端机器人的力信息则通过非线性交互力估计器进行在线估计。

1.3 主从端机器人建模

1) 主端机器人建模

双主端机器人动力学模型如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{m1} \ddot{\mathbf{q}}_{m1} + \mathbf{C}_{m1} \dot{\mathbf{q}}_{m1} + \mathbf{G}_{m1}(\mathbf{q}_{m1}) + \mathbf{F}_{m1} &= \boldsymbol{\tau}_{m1} + \boldsymbol{\tau}_{h1} \\ \mathbf{M}_{m2} \ddot{\mathbf{q}}_{m2} + \mathbf{C}_{m2} \dot{\mathbf{q}}_{m2} + \mathbf{G}_{m2}(\mathbf{q}_{m2}) + \mathbf{F}_{m2} &= \boldsymbol{\tau}_{m2} + \boldsymbol{\tau}_{h2} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M}_{m1}, \mathbf{M}_{m2}$ 为主端机器人的惯量矩阵; $\mathbf{C}_{m1}, \mathbf{C}_{m2}$ 是科氏力和离心力项; $\mathbf{G}_{m1}, \mathbf{G}_{m2}$ 是的重力矢量; $\mathbf{F}_{m1}, \mathbf{F}_{m2}$ 表示关节摩擦力项; $\boldsymbol{\tau}_{h1}, \boldsymbol{\tau}_{h2}$ 表示操作者作用在主端机器人上引起的关节力矩; $\boldsymbol{\tau}_{m1}, \boldsymbol{\tau}_{m2}$ 表示系统输入力矩; $\ddot{\mathbf{q}}_{m1}, \ddot{\mathbf{q}}_{m2}$ 为主端机器人的关节角加速度; $\dot{\mathbf{q}}_{m1}, \dot{\mathbf{q}}_{m2}$ 为主端机器人的关节角速度; $\mathbf{q}_{m1}, \mathbf{q}_{m2}$ 为主端机器人的角位移量。

在对六足机器人机身速度进行跟踪时,为保证主端子系统的可操作性及无源性,在主端机器人原动态方程中引入新的控制变量 $\mathbf{r}_m = \mathbf{q}_m + \lambda \dot{\mathbf{q}}_m$ ($0 < \lambda < 1$),通过在原始位置变量中加入阻尼项,以保证主端子系统的绝对无源,修正后的主端控制律为 $\mathbf{u}_m = \mathbf{u}_m^* + \bar{\mathbf{u}}_m$,式中 $\mathbf{u}_m^*, \bar{\mathbf{u}}_m$ 分别为局部控制律和全局控制律,且 $\mathbf{u}_m^* = -\bar{\mathbf{M}}_m \dot{\mathbf{q}}_m - \bar{\mathbf{B}}_m \mathbf{q}_m$,式中 $\bar{\mathbf{M}}_m = \mathbf{M}_m / \lambda, \bar{\mathbf{B}}_m = \mathbf{B}_m / \lambda$,修正后的主端机器人动力学模型为:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{M}}_{m1} \dot{\mathbf{r}}_{m1} + \bar{\mathbf{C}}_{m1} \mathbf{r}_{m1} + \mathbf{G}_{m1} + \mathbf{F}_{m1} &= \bar{\boldsymbol{\tau}}_{m1} + \boldsymbol{\tau}_{h1} \\ \bar{\mathbf{M}}_{m2} \dot{\mathbf{r}}_{m2} + \bar{\mathbf{C}}_{m2} \mathbf{r}_{m2} + \mathbf{G}_{m2} + \mathbf{F}_{m2} &= \bar{\boldsymbol{\tau}}_{m2} + \boldsymbol{\tau}_{h2} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\bar{\mathbf{M}}_{mi} = \mathbf{M}_{mi} / \lambda, \hat{\mathbf{M}}_{mi} = \mathbf{M}_{mi} / \lambda + \lambda \hat{\mathbf{C}}_{mi} - \mathbf{C}_{mi}, \bar{\mathbf{C}}_{mi} = \hat{\mathbf{C}}_{mi} \circ$

2) 从端机器人建模

由于六足机器人自由度过多,无法使用多个主端机器人对从端六足机器人的每个自由度进行控制。因此,在从端系统中采用半自主控制策略,其实质为主端机器人只控制从端机器人的机体速度,再通过运动学的映射,将六足机器人机体速度指令分配到每条腿的每个运动关节。假设六足机器人单腿线速度为 $\mathbf{v}_s$,从端机器人单腿的关节速度为 $\dot{\mathbf{q}}_l$,关节速度和腿部的速度关系为 $\mathbf{v}_s = \mathbf{j}_s \dot{\mathbf{q}}_l$ 则 $\dot{\mathbf{q}}_l = \mathbf{j}_s^{-1} \mathbf{v}_s, \ddot{\mathbf{q}}_l = \dot{\mathbf{j}}_s^{-1} \mathbf{v}_s - \mathbf{j}_s^{-1} \dot{\mathbf{v}}_s$ 由此可以得到从端机器人腿部线速度动力学方程为:

$$\mathbf{M}_l \mathbf{j}_s^{-1} \dot{\mathbf{v}}_s + (\mathbf{M}_l \dot{\mathbf{j}}_s^{-1} + \mathbf{C}_l \mathbf{j}_s^{-1}) \mathbf{v}_s + \mathbf{G}_l + \mathbf{F}_{sl} = \boldsymbol{\tau}_l - \boldsymbol{\tau}_e \quad (3)$$

由式(3)可知足端速度与机体速度的变换关系,进而,从端机器人的机体动力学方程可表示为:

$$\mathbf{M}_s \mathbf{j}_s^{-1} \dot{\mathbf{v}}_e + (\mathbf{M}_s \dot{\mathbf{j}}_s^{-1} + \mathbf{C}_s \mathbf{j}_s^{-1}) \mathbf{v}_e + \mathbf{G} + \mathbf{F}_s = \boldsymbol{\tau}_s - \boldsymbol{\tau}_e \quad (4)$$

式中: $\mathbf{M}_s$ 为从端机器人惯性矩阵, $\mathbf{C}_s$ 为科氏力和离心力项, $\mathbf{F}_{se}$ 为从端摩擦力项, $\boldsymbol{\tau}_s$ 为从端关节力矩, $\boldsymbol{\tau}_e$ 为从端的输入力矩, $\mathbf{v}_e$ 为从端六足机器人机体速度。

2 交互力估计器设计

2.1 系统环境端建模

由于足-地作用的复杂性造成了足式机器人在行走过程中足力分布的不确定性,增加了控制的难度,因而有必要分析六足机器人足端与地面之间的相互作用模型。本节首先考虑六足机器人在硬质地面行走时,柔性足与刚性地面接触的力学模型。六足机器人足端与地面之间的相互作用如图3所示,接触过程中产生3个相互解耦的作用力, $\mathbf{F}_N$ 为垂直于地面的法向力, $\mathbf{F}_x, \mathbf{F}_y$ 为足与地面间的切向作用力。

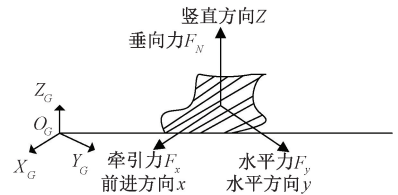


图3 硬质地面足端受力示意图

Fig. 3 Stress diagram of foot end of hard ground

针对柔性足端与地面的接触问题, Hunt 等提出了一种基于非线性的弹簧-阻尼接触碰撞模型:

$$\mathbf{F}_N = k \delta^n + b \delta^p \dot{\delta}^q \quad (5)$$

式中: k 为刚度系数; b 为阻尼系数; δ 为法向伸缩位移; $\dot{\delta}$ 为法向移动速度, n, p, q 为非线性指数项。

从端六足机器人在行走时,足端与地面的接触力包括存法向的支撑力,以及切向摩擦力,其切向摩擦力模型可表示为:

$$F_x = -\mu \cdot \text{sgn}(v_x(t)) F_n(t) \quad (6)$$

式中: μ 为足端与地面接触时的摩擦系数; F_n 为足端与地面接触时法向力的大小。

由式(6)可看出,如果足端运动速度方向改变, F_x 则会发生突变,其现象不满足摩擦过程的物理边界条件。通过对切向摩擦力进行分析,考虑引入一个正切函数来修正切向的足-地力接触模型。由此推导出的足-地切向力模型可表示为:

$$\begin{cases} F_x(t) = -\mu \cdot \text{sgn}(v_x(t)) \cdot \text{th}\left(\frac{\phi_x(t)}{\Delta\phi_x}\right) \cdot F_n(t) \\ \phi_x(t) = x(t) - x(0) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\phi_x(t)$ 为 x 方向的实际位移; $\Delta\phi_x$ 定义为特征位移。

2.2 环境端有源性分析

基于足-地作用机理分析六足机器人在法向接触维度上的环境端无源性,环境端的能量函数可表示为:

$$E_N = \int_0^T F_N(t) \dot{\delta}(t) dt = \int_0^T (k\delta^n(t) + b\delta^p(t)\dot{q}(t)\dot{\delta}(t)) dt \quad (8)$$

针对六足机器人腿部的弹簧-阻尼量化模型,将腿部的自由状态规定为弹簧原始长度,取压缩方向为正,同时规定当足端离开地面进入摆动相周期时,弹簧的等效伸长量不会超过它的原始长度。由此可知,参数 δ 始终为正, k, b 也为正。由此,式(8)可推到为:

$$E_N = \int_0^T (k\delta^n(t) + b\delta^p(t)\dot{q}(t)\dot{\delta}(t)) dt = \int_0^T k\delta^n(t)\dot{\delta}(t) dt + \int_0^T b\delta^p(t)\dot{q}(t)\dot{\delta}(t) dt \geq \int_0^T k\delta^n(t)\dot{\delta}(t) dt \geq \frac{k}{n+1} [\delta^{n+1}(T) - \delta^{n+1}(0)] \geq 0 \quad (9)$$

由上述分析可得,六足机器人足端在与地面的接触过程中,在环境端法向维度内,从端系统流入的能量满足时刻无源状态。在切向接触过程中同理满足。

2.3 交互力估计器的设计

考虑传感器造价及环境干扰问题,本文在主从端设计一种交互力估计器来估计双主端和从端的交互力信息,作为一种辅助的力测量方式。

首先将主端机器人与操作者,从端机器人与环境端的交互力,考虑成系统的不确定干扰项;基于式(2)、(4),在两个主端子系统和单个从端子系统内设计交互力估计

器,其具体表示形式如下:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{F}}_{h1} &= -L(r_{m1}, \dot{r}_{m1}) \hat{F}_{h1} + L(r_{m1}, \dot{r}_{m1}) \{j_{h1}^{-T} \bar{M}_{m1} \dot{r}_{m1} + \\ &j_{h1}^{-T} \bar{C}_{m1} r_{m1} + j_{h1}^{-T} G_{m1} + j_{h1}^{-T} F_{s1} - j_{h1}^{-T} \tau_{m1}\} \\ \dot{\hat{F}}_{h2} &= -L(r_{m2}, \dot{r}_{m2}) \hat{F}_{h2} + L(r_{m2}, \dot{r}_{m2}) \{j_{h2}^{-T} \bar{M}_{m2} \dot{r}_{m2} + \\ &j_{h2}^{-T} \bar{C}_{m2} r_{m2} + j_{h2}^{-T} G_{m2} + j_{h2}^{-T} F_{s2} - j_{h2}^{-T} \tau_{m2}\} \\ \dot{\hat{F}}_e &= -L(v_e, \dot{v}_e) \hat{F}_e + L(v_e, \dot{v}_e) \{j_e^{-T} \tau_s - \\ &[j_e^{-T} M j_s^{-1} \dot{v}_e + j_e^{-T} (M j_s^{-1} + C j_s^{-1}) v_e + j_e^{-T} G_s + j_e^{-T} F_{se}]\} \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $\hat{F}_{h1}, \hat{F}_{h2}$ 分别为主端机器人 1 和主端机器人 2 与操作者之间交互力的估计值。 $L(r_{m1}, \dot{r}_{m1}), L(r_{m2}, \dot{r}_{m2}), L(v_e, \dot{v}_e)$ 为主/从端机器人的观测器增益矩阵。

在所设计非线性干扰观测器中,需要获取主端机器人关节加速度和从端六足机器人机体加速度信息。但在实际应用中,测量加速度信息较困难。因此在主/从端系统中分别定义一个辅助函数 Z ,该函数为 Z :

$$\begin{cases} Z_{h1} = \hat{F}_{h1} - P_1(r_{m1}) \\ Z_{h2} = \hat{F}_{h2} - P_2(r_{m2}) \\ Z_e = \hat{F}_e + p(v_e) \end{cases} \quad (11)$$

对两主端模型进行求导,整理可得主端子系统内的交互力估计器模型为:

$$\begin{cases} Z_{mr} = \hat{F}_{mr} + p(r_{mr}) \\ \dot{Z}_{mr} = -L(r_{mr}, \dot{r}_{mr}) Z_{mr} + L(r_{mr}, \dot{r}_{mr}) \times \\ \{j_h^{-T} C_{mr} r_{mr} + j_h^{-T} G_{mr} + j_h^{-T} F_{sr} - \\ j_h^{-T} \tau_{mr} - p(r_{mr})\} \end{cases} \quad (12)$$

同理,从端子系统内的交互力估计器模型为:

$$\begin{cases} Z_e = \hat{F}_e + p(v_e) \\ \dot{Z}_e = -L(v_e, \dot{v}_e) Z_e + L(v_e, \dot{v}_e) \{j_e^{-T} \tau_s - \\ [j_e^{-T} (M j_s^{-1} + C j_s^{-1}) v_e + j_e^{-T} G_s + \\ j_e^{-T} F_{se} + p(v_e)]\} \end{cases} \quad (13)$$

式中: s 表示从端机器人, m 表示主端机器人, r 为 1 或 2,当 $r=1$ 时代表主端机器人 1,当 $r=2$ 时代表主端机器人 2。

进而,非线性扰动观测器的增益矩阵表示如下:

$$\begin{aligned} L(r_{m1}, \dot{r}_{m1}) &= X_{m1}^{-1} j_{h1}^{-T} \bar{M}_{m1}^{-1} \\ L(r_{m2}, \dot{r}_{m2}) &= X_{m2}^{-1} j_{h2}^{-T} \bar{M}_{m2}^{-1} \\ L(v_e, \dot{v}_e) &= X_e^{-1} j_e^{-T} M_s^{-1} j_s^{-1} \end{aligned} \quad (14)$$

式中: X_{m1}, X_{m2}, X_s 为可逆常数矩阵, $L(r_{m1}, \dot{r}_{m1}), L(r_{m1}, \dot{r}_{m1}), L(r_{m1}, \dot{r}_{m1})$ 为正定矩阵。

3 遥操作控制算法设计

3.1 权重因子切换算法设计

本文所提出的基于共享控制的双操作者六足机器人遥操作系统,通过设计基于共享权重因子(δ ,其中 $0 \leq \delta \leq 1$)的切换规则,确定系统的 3 种操控模式。当权重因子 $\delta = 0$ 时,为训练模式,由主端机器人 1(训练者)完全独立控制从端机器人,同时主端机器人 2(受训者)将从主端机器人 1 接收到其全部的速度和力反馈信息。当权重因子 $\delta = 1$ 时,设定系统状态为评估模式,此时受训者完全独立控制从端机器人,同时主端机器人 1 将从主端机器人 2 处接收到全部的力和速度反馈。当 $0 \leq \delta \leq 1$ 时,设定系统状态为协同模式,此时训练者和受训者共同操控从端机器人的速度,根据权重因子的变化受训者和训练者均会获得从端机器人的速度和力反馈信息,以及获得对方的速度和力信息。

确保权重因子从 0~1 的切换过程更加平滑,本文采用正弦函数形式设计权重因子的切换策略保证切换的平滑性,权重因子的选择由训练者和受训者指令与从端速度跟踪误差比 e 来确定,速度误差比 e 定义为:

$$e = \frac{|v_{m2} - v_s|}{|v_{m1} - v_s|} \quad (15)$$

当训练者控制指令与从端机器人速度响应的跟踪误差之比小于所设定的下限阈值 β_1 时,从端机器人由训练者完全控制,当两者跟踪误差之比在 β_1 和 β_2 之间时,从端机器人则由训练者和受训者协同控制,当两者跟踪误差大于所设定的上限阈值 β_2 时,从端机器人则交由受训者完全控制。综上所述,权重因子的切换函数可表述为:

$$\delta = \begin{cases} 0, & e \leq \beta_1 \\ \sin \frac{\pi}{2} \left(\frac{e - \beta_1}{\Delta\beta} \right), & \beta_1 \leq e \leq \beta_2 \\ 1, & e \geq \beta_2 \end{cases} \quad (16)$$

式中: β_1 和 β_2 是定值,并且 $\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1$ 。

3.2 主从端控制器设计

双主端/单从端机器人各自系统内指令跟踪的误差模型可表示为:

$$\begin{aligned} \Delta r_{m1} &= \delta r_{m1} - \delta v_e \\ \Delta r_{m2} &= (1 - \delta) r_{m2} - (1 - \delta) v_e \end{aligned} \quad (17)$$

$$\Delta v_e = v_e - \delta r_{m1} - (1 - \delta) r_{m2}$$

根据式(17)所示,可重新定义 3 个新变量:

$$\begin{aligned} x_{m1} &= \Delta \dot{r}_{m1} + \lambda \Delta r_{m1} = \dot{r}_{m1} - r_{m1r} \\ x_{m2} &= \Delta \dot{r}_{m2} + \lambda \Delta r_{m2} = \dot{r}_{m2} - r_{m2r} \\ x_s &= \Delta \dot{v}_e + \lambda \Delta v_e = \dot{v}_e - v_{er} \end{aligned} \quad (18)$$

式中: Δr_{m1} 为主端 1 与从端机体的指令跟踪误差, Δr_{m2} 为主端 2 与从端机体指令跟踪误差, Δv_e 为从端机体与两个主端指令跟误差,而 $\dot{r}_{m1r}$, $\dot{r}_{m2r}$, $\dot{v}_{er}$, λ 为对角正定矩阵。根据式(18)可以得到:

$$\begin{aligned} r_{m1} &= x_{m1} + r_{m1r}, \dot{r}_{m1} = \dot{x}_{m1} + \dot{r}_{m1r} \\ r_{m2} &= x_{m2} + r_{m2r}, \dot{r}_{m2} = \dot{x}_{m2} + \dot{r}_{m2r} \end{aligned} \quad (19)$$

$$v_e = x_s + v_{er}, \dot{v}_e = \dot{x}_s + \dot{v}_{er}$$

将式(19)式带入到式(2)中,则主/从端机器人的开环动力学模型则可修正为:

$$\begin{aligned} \bar{M}_{m1} \dot{x}_{m1} + \bar{C}_{m1} x_{m1} &= \bar{j}_{h1}^T \tau_{m1} + F_{h1} - \phi_{h1}(r_{m1}, \dot{r}_{m1}) \theta_{m1} \\ \bar{M}_{m2} \dot{x}_{m2} + \bar{C}_{m2} x_{m2} &= \bar{j}_{h2}^T \tau_{m2} + F_{h2} - \phi_{h2}(r_{m2}, \dot{r}_{m2}) \theta_{m2} \end{aligned} \quad (20)$$

$$M_{sd} \dot{x}_s + C_{sd} x_s = j_e^T \tau_s - F_e + \phi_s(v_e, \dot{v}_e) \theta_s$$

其中:

$$\begin{aligned} \phi_{m1}(r_{m1}, \dot{r}_{m1}) \theta_{m1} &= \bar{M}_{m1} \dot{r}_{m1} + \bar{C}_{m1} r_{m1} + G_{m1} \\ \phi_{m2}(r_{m2}, \dot{r}_{m2}) \theta_{m2} &= \bar{M}_{m2} \dot{r}_{m2} + \bar{C}_{m2} r_{m2} + G_{m2} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\phi_s(v_e, \dot{v}_e) \theta_s = M_s \dot{v}_e + C_s v_e + G_s$$

基于自适应控制设计双主端及单从端子系统内部的控制器,所设计主从端控制律可表示为:

$$\begin{aligned} \tau_{m1} &= -k_{m1} x_{m1} + \phi_{m1} \hat{\theta}_{m1} + C_2(\hat{F}_{h1} - \delta \hat{F}_e) - \hat{F}_{h1} \\ \tau_{m2} &= -k_{m2} x_{m2} + \phi_{m2} \hat{\theta}_{m2} + \\ C_2(\hat{F}_{h2} - (1 - \delta) \hat{F}_e) - \hat{F}_{h2} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\tau_s = -k_s x_s + \phi_s \hat{\theta}_s + C_3(\hat{F}_e - \delta \hat{F}_{h1} -$$

$$(1 - \delta) \hat{F}_{h2}) + \hat{F}_e$$

式中: k_{m1} , k_{m2} , k_s , C_2 , C_3 为对角正定常数矩阵, δ 为权重因子。

系统自适应律为:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\theta}}_{m1} &= -\Gamma_{m1} Y_{m1r}^T x_{m1} \\ \dot{\hat{\theta}}_{m2} &= -\Gamma_{m2} Y_{m2r}^T x_{m2} \\ \dot{\hat{\theta}}_s &= -\Gamma_s Y_s^T x_s \end{aligned} \quad (23)$$

式中: $-\Gamma_{m1}$, $-\Gamma_{m2}$, $-\Gamma_s$ 为对角正定常数矩阵。

3.3 稳定性分析

将式(22)代入(20),得主从端系统闭环动力学为:

$$\begin{aligned} \bar{M}_{m1} \dot{x}_{m1} + \bar{C}_{m1} x_{m1} &= -k_{m1} x_{m1} + \phi_{m1} \Delta \theta_{m1} + \\ C_2(\hat{F}_{h1} - \delta \hat{F}_e) \\ \bar{M}_{m2} \dot{x}_{m2} + \bar{C}_{m2} x_{m2} &= -k_{m2} x_{m2} + \phi_{m2} \Delta \theta_{m2} + \\ C_2[\hat{F}_{h2} - (1 - \delta) \hat{F}_e] \\ M_s \dot{x}_s + C_s x_s &= -k_s x_s + \phi_s \Delta \theta_s + \\ C_3(\hat{F}_e - \delta \hat{F}_{h1} - (1 - \delta) \hat{F}_{h2}) \end{aligned} \quad (24)$$

式中: $\Delta\theta_{m1} = \hat{\theta}_{m1} - \theta_{m1}$, $\Delta\theta_{m2} = \hat{\theta}_{m2} - \theta_{m2}$, $\Delta\theta_s = \hat{\theta}_s - \theta_s$ 。

考虑模型动力学参数的不确定性扰动对于非线性遥操作系统控制器的影响,融合前文所设计的交互力估计器式(12)、(13)、主从端的自适应控制律式(22)以及自适应更新律式(23)。假定式(24)中力控制增益矩阵 C_2 , C_3 为可逆矩阵,则信号 $x_s, \Delta\alpha_m, \Delta\alpha_s$ 有界,且当 $t \rightarrow \infty$ 时,主从端速度跟踪误差趋向于 0,且力跟踪误差有界。

基于 Lyapunov 函数,判定所设计系统的稳定性:

$$v = \frac{1}{2} [C_2^{-1} x_{m1}^T \bar{M}_{m1} x_{m1} + C_2^{-1} x_{m2}^T \bar{M}_{m2} x_{m2} + C_3^{-1} x_s^T M_s x_s + C_2^{-1} \Delta\theta_{m2}^T \Gamma_{m2}^{-1} \Delta\theta_{m2} + C_3^{-1} \Delta\theta_s^T \Gamma_s^{-1} \Delta\theta_s] \quad (25)$$

对函数 v 求导得:

$$\begin{aligned} \dot{v} = & -x_{m1}^T C_2^{-1} k_{m1} x_{m1} - x_{m2}^T C_2^{-1} k_{m2} x_{m2} - x_s^T C_3^{-1} k_s x_s + \\ & x_{m2}^T C_2^{-1} \phi_{m2} \Delta\theta_{m2} + x_s^T C_3^{-1} \phi_s \Delta\theta_s + C_2^{-1} \Delta\theta_{m1}^T \Gamma + \\ & C_2^{-1} \Delta\theta_{m2}^T \Gamma_{m2}^{-1} \dot{\Delta\theta}_{m2} + C_3^{-1} \Delta\theta_s^T \Gamma_s^{-1} \dot{\Delta\theta}_s \end{aligned} \quad (26)$$

将自适应律式(23)带入到式(26)中,可得到

$$\dot{v} \leq - (x_{m1}^T C_2^{-1} k_{m1} x_{m1} + x_{m2}^T C_2^{-1} k_{m2} x_{m2} + x_s^T C_3^{-1} k_s x_s) \leq 0 \quad (27)$$

在式(25)中,由于参数 $C_2, C_3, \Gamma_m, \Gamma_s$ 都是对角正定常数矩阵且 $\bar{M}_{m1}, \bar{M}_{m2}, M_s$ 为对称的正定矩阵,由此可以得到 Lyapunov 函数 v 是正定的。而由式(27)可知, $\dot{v}$ 是半负定,所以 $\dot{v}$ 是有界且是递减的,从而信号是有界的。

针对系统的指令跟踪性能,根据式(18)中所定义的 $x_{m1} = \Delta\dot{r}_{m1} + \lambda \Delta r_{m1}$ 形式,可以得到一个关于 $\Delta r_{m1}, \Delta r_{m2}$ 且以 r_{m1}, r_{m2} 作为输入的一阶稳定系统。由于 λ 是正定的,因此该系统的极点在左半平面内的 $-\lambda$ 处,进而 r_{m1} 的有界则意味着 $\Delta\dot{r}_{m1}, \Delta\dot{r}_{m2}, \Delta r_{m1}, \Delta r_{m2}$ 有界。

4 实 验

4.1 实验平台

本文所搭建的六足机器人三边遥操作系统的实验平台,采用触觉力反馈设备 Novint Falcon 作为主端机器人 1,采用 Geomagic Touch 触觉力反馈设备作为主端机器人 2。从端六足机器人是基于 Vortex (CMLabs, Montreal, Canada) 多体力学实时虚拟仿真引擎对其进行开发如图 4 所示以及哈尔滨工业大学研制六足机器人 ElSpider,如图 5 所示。其中视觉捕捉系统 Optitrack 负责捕捉六足机器人的机体速度,机器人运动信息获取则通过 Motive 软件进行采集和处理。

系统中,双主端机器人用于将双操作者的控制指令输出,并发送至从端机器人,使从端机器人按照操作者的意图执行行走任务。系统实验框图如图 6 所示。

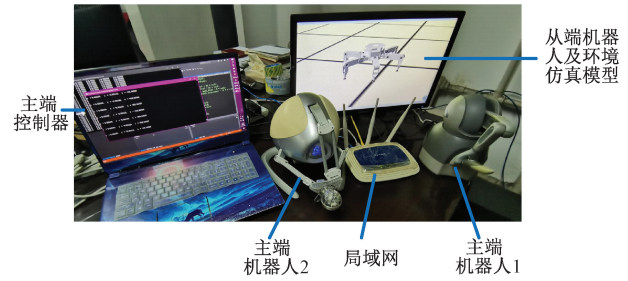


图 4 半物理实验平台

Fig. 4 Semi-physical experimental platform

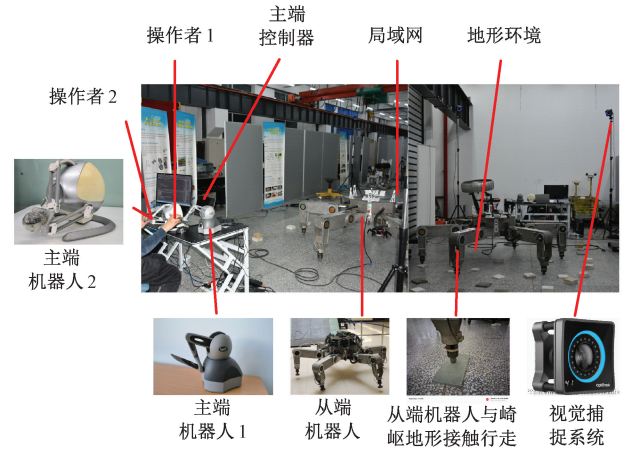


图 5 实物实验平台

Fig. 5 Physical experimental platform

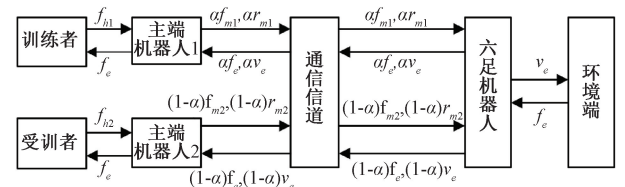


图 6 系统实验框图

Fig. 6 System experiment block diagram

4.2 实验设计

本节针对所提出基于双操作者的六足机器人三边遥操作系统,设计不同的实验条件对其进行分析,相应的参数设定如表 1 所示。

Case I: 对主端机器人与操作者,从端机器人与环境端的交互力进行在线估计,验证所设计交互力估计器的有效性。另外,对两个操作者在常规共享控制方式下的三边遥操作系统进行实验分析。

Case II: 针对所提出变权重因子的六足机器人三边遥操作系统,设计相应的对比实验,对系统主从端的速度跟踪和力跟踪性能进行比对。

Case III:其他条件不变,将地形环境模块设置为崎岖地形,重新进行上述比对实验并分析实验结果。

Case IV:基于实物平台验证本文提出的控制算法。

表 1 操控系统控制律参数

参数	Case I	Case II	Case III	Case IV
C_{m1}	15	10	18	22
C_{m2}	15	10	18	22
C_s	8	7	9	10
K_{m1}	4	3.5	4	5.5
K_{m2}	4	3.5	4	5.5
K_s	3	2	4	5
Γ_{m1}	0	0.7	0.6	0.6
Γ_{m2}	0	0.7	0.6	0.6
Γ_s	0	0.7	0.6	0.6
L_{m1}	0	15	15	15
L_{m2}	0	15	15	15
L_s	0	15	15	15

考虑六足机器人的实际重量和足-地交互力突变,则三边遥操作系统中加入力的缩放因子 $n_s = 100$ 。

4.3 实验结果与分析

通过 Case I 的实验结果,分析所设计交互力估计器的性能,如图 7 所示。

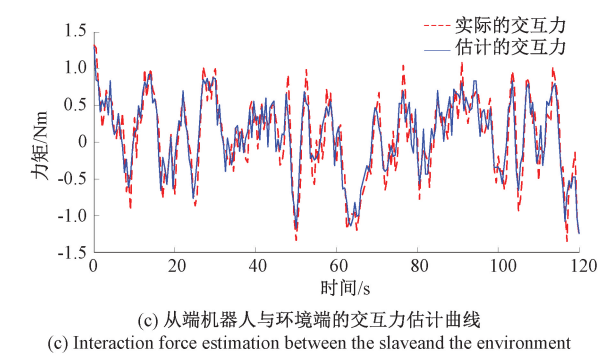
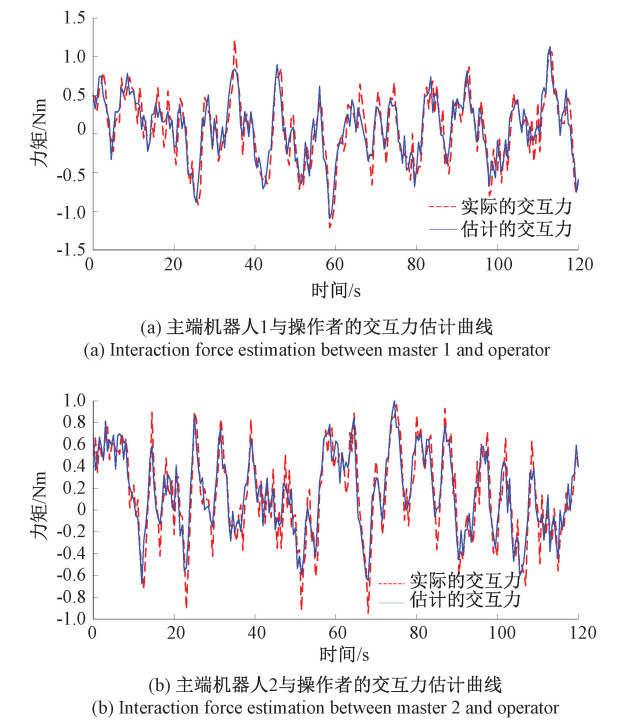
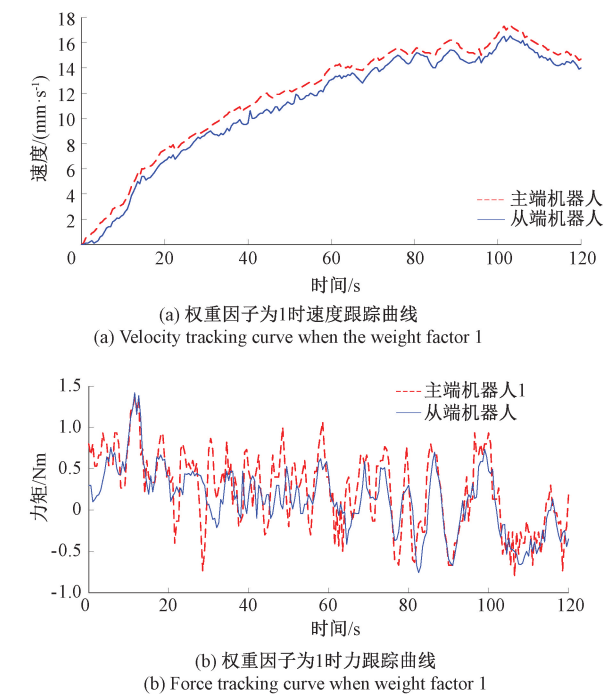
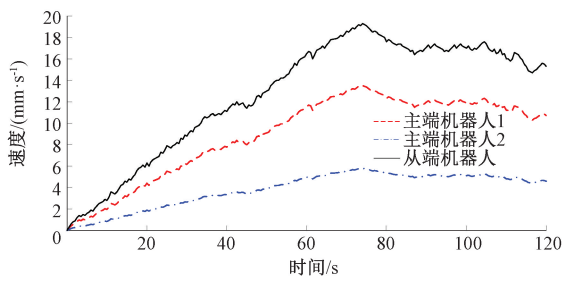


图 7 平坦地形下主从端交互力估计曲线
Fig. 7 Interaction force between master-slave on flat terrain

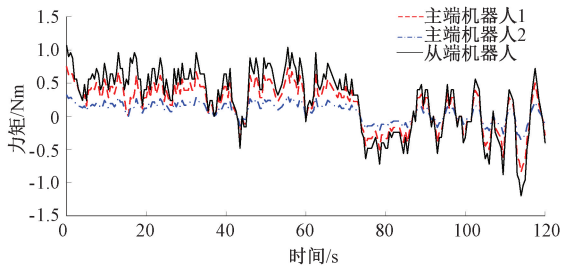
图 7(a) 为平坦地形下主端机器人 1 的交互力估计曲线,可以观察到估计器跟踪实际力的效果较好,即使在实际交互力有明显抖动的情况下,估计力也能保持良好跟踪效果。图 7(b) 为平坦地形下主端机器人 2 的实际交互力与估计力的跟踪曲线,其效果与主端机器人 1 近似。图 7(c) 为从端机器人与环境端的实际交互力与估计力的跟踪曲线。综上所述,所设计基于非线性干扰观测器的交互力估计方法满足本系统需求。

传统三边遥操作控制实验结果,如图 8 所示。图 8(a) 为 $\delta = 1$ 时,主从端速度跟踪曲线,可以得出从端的速度与主端的指令有近似的趋势,但是跟踪误差较大。图 8(b) 为 $\delta = 1$ 时,主从端力跟踪曲线,可以得出力跟踪误差同样较大。





(c) 权重因子为0.3时的速度跟踪曲线
(c) Speed tracking curve when the weight factor 0.3



(d) 权重因子为0.3时的力跟踪曲线
(d) Force tracking curve when the weight factor 0.3

图8 传统三边遥操作控制实验结果

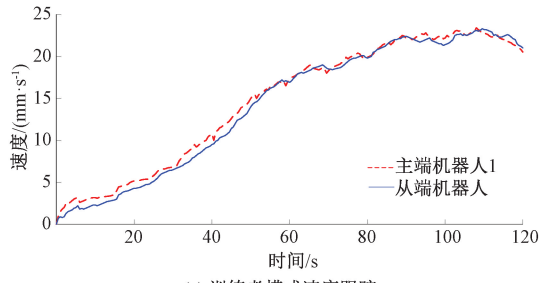
Fig. 8 Experimental results of traditional trilateral teleoperation control

图8(c)为 $\delta = 0.3$ 时,主从端速度跟踪曲线,可以得出主控端对从端的速度控制有很大的权重影响,即使当主控端有较大失误时,次控端也不能增大对从端机器人的控制权限,限制了三边遥操作控制的优势。图8(d)为 $\delta = 0.3$ 时,主从端力跟踪曲线,跟踪效果与速度跟踪近似。

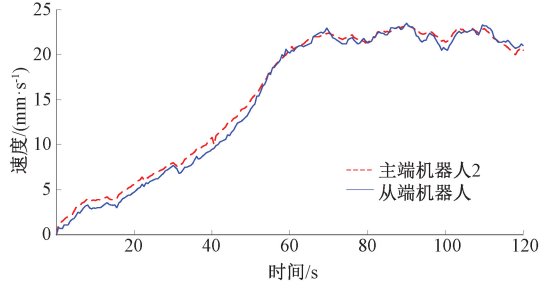
CaseII 条件下,分析主从端机器人速度和力的跟踪情况。实验结果如图9所示。针对训练模式,其速度跟踪曲线如图9(a)所示,训练模式相较传统遥操作方法(图8(a),(c))相比,速度跟踪性能有明显的提升。

图9(b)为评估模式下的速度跟踪曲线,该模式下主从端同样具有较好的跟踪性,由此反映如果受训者的操控技术训练熟练,基于该系统也可实现较好的主从端跟踪性能。

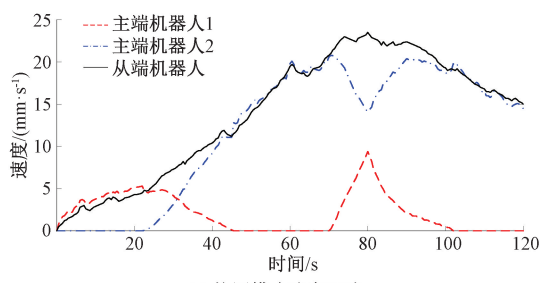
图9(c)为协同模式下主从端速度跟踪曲线。通过该曲线可以看出,在0~23 s阶段,此过程从端机器人由训练者完全控制。在23~45 s阶段,训练者的控制权限慢慢降低,此时训练者和受训者共同控制从端机器人。在45~70 s阶段,此时受训者完全控制从端机器人。在70~100 s阶段,训练者发现受训者在控制过程中的跟踪误差较大,此时训练者介入,增加其端口内的控制权重,进而对训练者的指令进行修正,并在100 s后,将系统控制权权重倾向于受训者。与传统方法相比,主控端对从端机器人的速度控制有很大影响,即使主控端存在较大失



(a) 训练者模式速度跟踪
(a) Trainer mode speed tracking



(b) 受训者模式速度跟踪
(b) Trainee mode speed tracking



(c) 协同模式速度跟踪
(c) Collaborative mode speed tracking

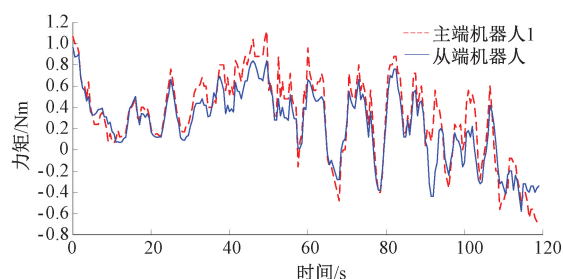
图9 平坦地形下速度跟踪曲线

Fig. 9 Flat terrain velocity tracking curves

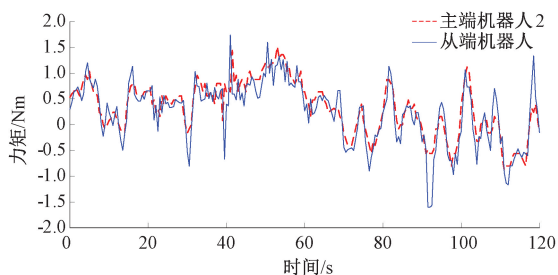
误时,次控端也不会增大对从端机器人的控制权限,由此发生误操作的可能性增大。

同条件下,平坦地形主从端力跟踪曲线如图10所示。图10(a)为训练模式下主从端的力跟踪曲线,图10(b)为评估模式下主从端的力跟踪曲线,图10(c)为协同模式下的主从端力跟踪曲线。从图中可以看出,交互力跟踪性能较传统遥操作方法相比有较大提升。协同模式下共享权重因子的变化曲线如图10(d)所示。

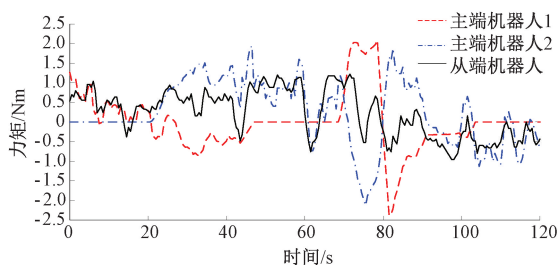
CaseIII 条件下,分析主从端机器人速度和力的跟踪情况。实验结果如图11所示。图11(a)为训练模式主从端的速度跟踪曲线。图11(b)为评估模式的速度跟踪曲线。图11(c)为协同模式的速度跟踪曲线。整个过程反应出,开始时由训练者完全控制从端机器人,后段训练者将权限交给受训者,当训练者发现受训者操作误差过大时,对受训者的操作进行修改,修正后将权限交还给受训者。



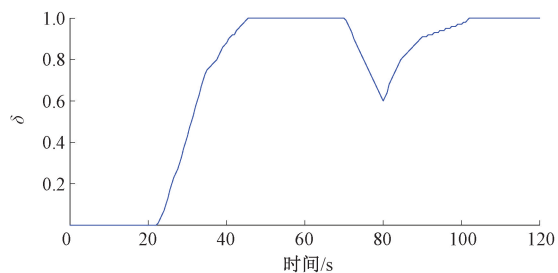
(a) 训练者模式的力跟踪曲线
(a) Force tracking curve in trainer mode



(b) 受训者模式的力跟踪曲线
(b) Force tracking curve in trainee mode



(c) 协同模式力跟踪曲线
(c) Force tracking curve in collaborative mode

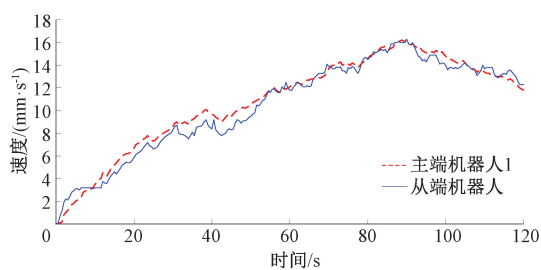


(d) 平坦地形协同模式权重因子
(d) Weight factor of flat terrain collaborative model

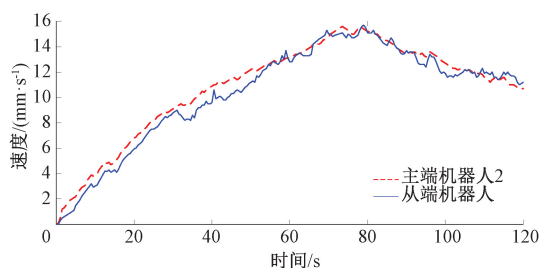
图 10 平坦地形下力跟踪曲线

Fig. 10 Force tracking curves on flat terrain

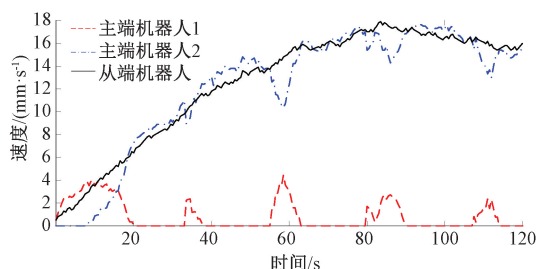
图 12 为崎岖地形下系统的力跟踪,验证本文所设计的自适应控制在崎岖地形下的准确性。图 12(a) 为训练模式的力跟踪曲线,图 12(b) 为评估模式的力跟踪曲线,图 12(c) 为协同模式的力跟踪曲线。图 12(d) 为崎岖地形下协同模式权重因子的曲线,可以得出,在所提出算法及系统作用下,主从端面向崎岖地形同样具有良好的力跟踪。



(a) 训练者模式的速度跟踪曲线
(a) Speed tracking curve in trainer mode



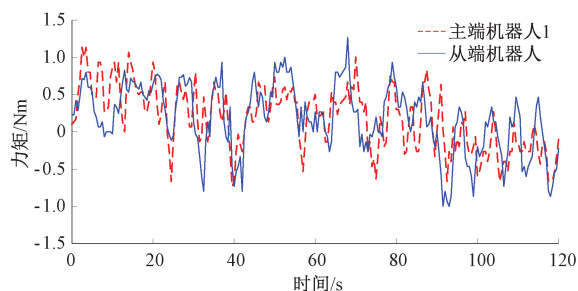
(b) 受训者模式的速度跟踪曲线
(b) Speed tracking curve in trainee mode



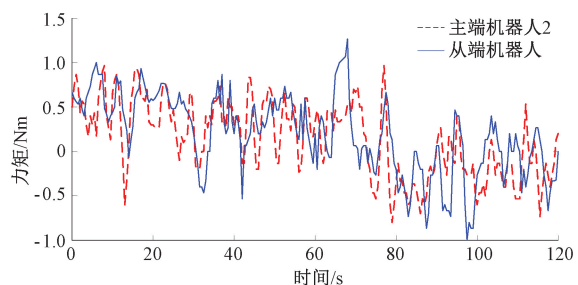
(c) 协同模式速度跟踪曲线
(c) Speed tracking curve in collaborative mode

图 11 崎岖地形下主从端速度跟踪曲线

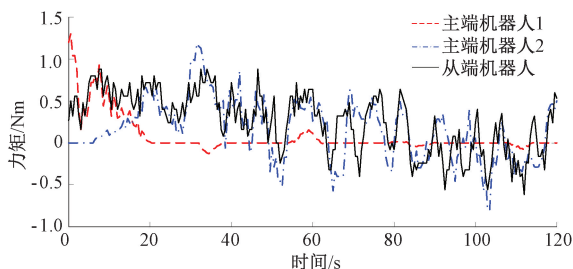
Fig. 11 Speed tracking curves between master-slave in rough terrain



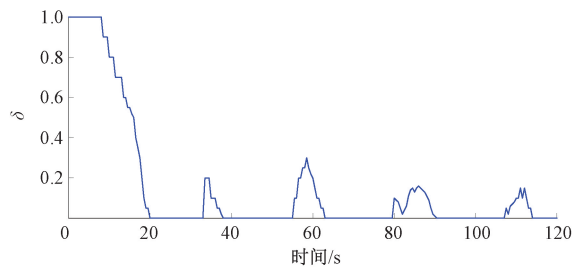
(a) 训练者模式力跟踪曲线
(a) Force tracking curve in trainer mode



(b) 受训者模式力跟踪曲线
(b) Force tracking curve in trainee mode



(c) 协同模式力跟踪曲线
(c) Force tracking curve in collaborative mode

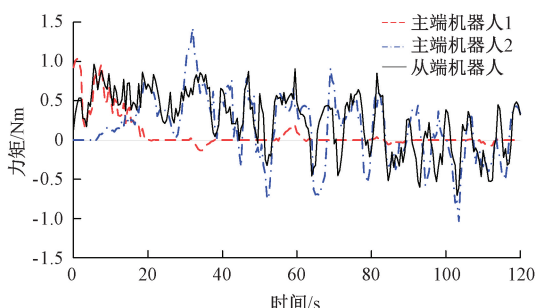


(d) 崎岖地形协同模式共享因子
(d) Weight factor of flat terrain collaborative model

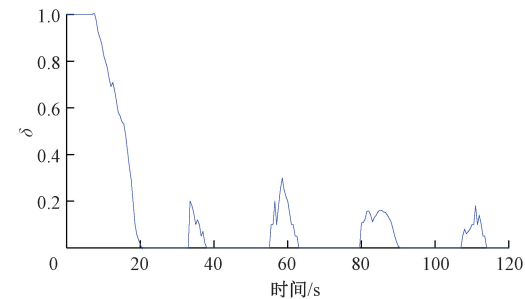
图 12 崎岖地形下力跟踪曲线

Fig. 12 Force tracking curves under rough terrain

图 13 反映崎岖地形下实物六足机器人遥控系统的力跟踪情况。图 13(a) 为训练模式的力跟踪曲线,图 13(b) 为受训模式的力跟踪曲线,图 13(c) 为协同模式的力跟踪曲线。图 13(d) 为崎岖地形下协同模式权重因子曲线。可以得出,实物六足遥控系统在崎岖地形下也具有良好的力跟踪性能。



(c) 协同模式力跟踪曲线
(c) Force tracking curve in collaborative mode



(d) 崎岖地形协同模式共享因子
(d) Weight factor of flat terrain collaborative model

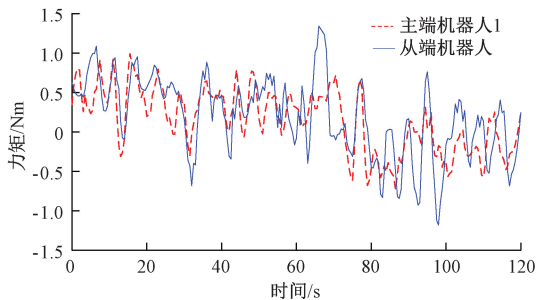
图 13 实物六足机器人在崎岖地形下力跟踪曲线

Fig. 13 Force tracking curves of hexapod robot in rugged terrain

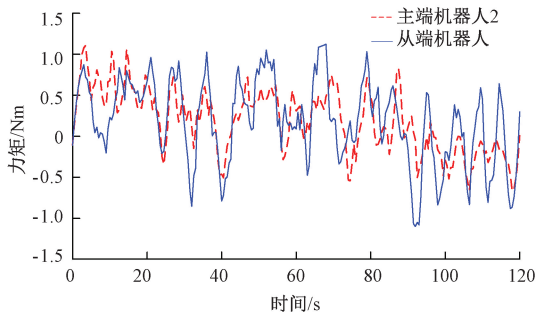
综上所述,通过本文的方法对三边遥控系统的速度跟踪和力跟踪进行半物理与实物实验,通过实验数据并和传统的三边遥控系统进行对比可以得出,该系统的实验结果满足在平坦地形下,对两个主端机器人和一个从端机器人的交互力进行估计的实验预期,并且在后续的主从端机器人的力跟踪有很好的表现,同时实物六足机器人遥控系统也具备良好的力跟踪性能,很好地验证了本文提出控制方法的有效性。

5 结 论

本文针对传统三边遥控方法控制六足机器人,考虑端口交互力缺失以及固定共享因子灵活性不足等问题,提出了基于交互力估计与权重切换控制的六足机器人三边遥控方法。本文设计了一种非线性力估计算法,可保证系统各端口具有良好的力跟踪性能。同时,在基于共享控制的三边遥控操作架构中设计了权重因子动态切换算法,确定 3 种遥控操作模式。针对系统主/从端动力学模型的不确定性,通过自适应控制策略设计双主单从端控制器,保证系统稳定性的同时兼顾较好的透明性。最后,搭建六足机器人三边遥控操作仿真和实物实验平台,在平坦地形和崎岖地形下与传统遥控方法进行对比。实验数据表明,在平坦地形下系统速度和力跟踪性能分



(a) 训练者模式力跟踪曲线
(a) Force tracking curve in trainer mode



(b) 受训者模式力跟踪曲线
(b) Force tracking curve in trainee mode

别提升了约 45.12% 和 64.71%, 在崎岖地形下系统速度和力跟踪性能分别提升了约 39.02% 和 29.41%。并且将提出的控制方法应用在实物六足机器人遥操作系统上也表现出了良好的力跟踪性能。

参考文献

- [1] 尤波, 陈翰南, 李佳钰, 等. 一种基于变权重的六足机器人共享遥操作控制[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(8): 239-250.
YOU B, CHEN H N, LI J Y, et al. A variable weight based shared teleoperation control for hexapod robots[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(8): 239-250.
- [2] LI J, YOU B, DING L, et al. Dual-master/single-slave haptic teleoperation system for semiautonomous bilateral control of hexapod robot subject to deformable rough terrain[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 21(4): 1-15.
- [3] ZHUANG H C, GAO H B, DE NG Z Q, et al. A review of heavy-duty legged robots [J]. Science China Technological Sciences, 2013, 57(2): 298-314.
- [4] CHEN X B, FENG G. Energy expenditure of trotting gait under different gait parameters[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(4): 1-8.
- [5] 尤波, 曲伟健, 李佳钰. 面向双操作者的六足机器人共享遥操作研究[J]. 控制与决策, 2022, 37(11): 2769-2778.
YOU B, QU W J, LI J Y. Research on shared teleoperation of hexapod robot for dual operators[J]. Control and Decision, 2022, 37(11): 2769-2778.
- [6] 金马, 高海波, 丁亮, 等. 一种六足机器人模拟驾驶系统研究与实现[J]. 机器人, 2016, 38(6): 678-686.
JIN M, GAO H B, DING L, et al. Research and implementation of a hexapod robot simulation driving system[J]. Robot, 2016, 38(6): 678-686.
- [7] LIU J, YANG J, YAN B, et al. The adaptable amphibious wheel-legged robot [J]. Transactions Canadian Society for Mechanical Engineering, 2018, 42(3): 3-6.
- [8] 李佳钰, 尤波, 许家忠, 等. 基于时域无源性控制的六足机器人双边触觉遥操作[J]. 控制与决策, 2020, 35(6): 1345-1352.
LI J Y, YOU B, XU J ZH, et al. Bilateral tactile teleoperation of hexapod robot based on time domain passive control[J]. Control and Decision, 2020, 35(6): 1345-1352.
- [9] LI L, YANG H, LIU J. Bilateral coordination control of flexible master-slave manipulators using a partial differential equation model[J]. Journal of Vibration and Control, 2020, 10(5): 2-5.
- [10] BAVILI R E, BAVIL A F, AKBARI A. Control of a bilateral teleoperation system in the presence of varying time delay, model uncertainty and actuator faults[J]. International Journal of Dynamics and Control, 2020, 9: 1261-1276.
- [11] LI J, TAVAKOLI M, HUANG Q. Absolute stability of a class of trilateral haptic systems[J]. IEEE Transactions on Haptics, 2014, 7(3): 301-310.
- [12] LIU Y C, KHONG M H. Adaptive control for nonlinear teleoperators with uncertain kinematics and dynamics[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(5): 2550-2562.
- [13] ETEDALI S, TALEBI H A, MOHAMMADI A D. A robust force observer for robot manipulators subjected to external disturbance[C]. 3rd RSI International Conference on Robotics and Mechatronics, 2015: 539-544.
- [14] CHAN L, NAGHDY F, STIRLING D. Extended active observer for force estimation and disturbance rejection of robotic manipulators [J]. Robotics & Autonomous Systems, 2013, 61(12): 1277-1287.
- [15] ALONGE F, BRUNO A, D'IPPOLITO F. Interaction control of robotic manipulators without force measurement[C]. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2010: 3245-3250.
- [16] 张晗, 陈卫东, 王景川. 多机器人探索系统的人机共享控制[J]. 机器人, 2015, 37(1): 17-24.
ZHANG H, CHEN W D, WANG J CH. Human-machine

shared control of multi-robot exploration system [J]. Robot, 2015, 37(1): 17- 24.

[17] ESCOLANO C, ANTELIS J M, MINGUEZ J. A telepresence mobile robot controlled with a noninvasive brain-Computer interface [J]. IEEE Transactions on Systems, 2012, 42(3): 793-804.

[18] 刘爽,朱国栋. 基于操作者表现的机器人遥操作方法[J]. 机器人, 2018, 40(4): 540-550.

LIU SH, ZHU G D. Teleoperation method of robot based on operator performance [J]. Robot, 2018, 40 (4): 540- 550.

作者简介



李佳钰(通信作者), 2009 年于哈尔滨理工大学获得学士学位, 2013 年于哈尔滨理工大学获得硕士学位, 2018 年于哈尔滨理工大学获得博士学位, 现为哈尔滨理工大学讲师, 主要研究方向为足式机器人控制与人机交互技术。

E-mail: lijiayu@hrbust.edu.cn

Li Jiayu (Corresponding author) received his B. Sc. degree

and M. Sc. degree both from Harbin University of Science and Technology in 2009 and 2013, and received his Ph. D. degree from Harbin University of Science and Technology in 2018. He is currently a lecturer at Harbin University of Science and Technology. His main research interests include control of the legged robot and human machine interaction.



丁亮, 2003 年于哈尔滨理工大学获得学士学位, 2006 年于哈尔滨理工大学获得硕士学位, 2009 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为哈尔滨工业大学教授, 主要研究方向为星球探测车、野外足式机器人、地面力学、系统设计与仿真、智能控制与感知。

E-mail: liangding@hit.edu.cn

Ding Liang received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Harbin University of Science and Technology in 2003 and 2006, and received his Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2009. He is currently a professor at Harbin Institute of Technology. His research interests include planetary rover, field legged robot, ground mechanics, system design and simulation, intelligent control and perception.