

控制与决策

Control and Decision

基于时域无源性控制的六足机器人双边触觉遥操作

李佳钰, 尤波, 许家忠, 丁亮, 陈翰南, 高海波

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0998>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

液压驱动单元基于力的阻抗控制方法控制参数灵敏度分析

Control parameters sensitivity analysis of force-based impedance control for hydraulic drive unit
控制与决策. 2019, 34(10): 2125–2133 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0083>

基于雅可比预测的机器人无模型视觉伺服定位控制

Jacobian prediction-based for robot model-free visual servoing positioning control
控制与决策. 2018, 33(10): 1813–1819 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0717>

轨迹跟踪级联机器人编队控制方法

Trajectory tracking cascade robot formation control
控制与决策. 2016(2): 317–323 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.1676>

基于广义扩张状态观测器的遥操作系统同步控制

Synchronization control of teleoperation systems based on generalized extended state observers
控制与决策. 2016, 31(11): 2077–2082 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.1090>

基于CPG的双足机器人多层步行控制器设计

Central pattern generator based multi-level walking controller design of biped robot
控制与决策. 2015(3): 467–472 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.0460>

基于时域无源性控制的六足机器人双边触觉遥操作

李佳钰¹, 尤 波^{1†}, 许家忠¹, 丁 亮², 陈翰南¹, 高海波²

(1. 哈尔滨理工大学 机电控制及自动化技术研究所, 哈尔滨 150080;

2. 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: 随着六足机器人研究工作的深入, 针对其遥操作系统的开发面临诸多挑战. 为了弥补松软接触条件对系统可控性及稳定性的影响, 提出一种基于时域无源性控制(time-domain passivity control, TDPC)的六足机器人双边触觉遥操作方法. 其主从两端采取位置-速度的交互模式, 通过分析足-地柔性接触的作用机理, 构建无源观测器和无源控制律以补偿足底滑移所导致环境系统的潜在有源性, 采用速度跟踪模式设计基于触觉力反馈的系统控制架构, 并利用 Llewellyn 准则确定控制律参数的稳定范围. 最后, 搭建半物理仿真实验平台并验证所提出的双边触觉遥操作方法在松软地形条件下能够保证六足机器人遥操作系统的稳定, 且兼具较好的持续跟踪能力.

关键词: 六足机器人; 双边遥操作; 松软地形; 足-地作用机理; 触觉力反馈; 时域无源性控制

中图分类号: TP242

文献标志码: A

Bilateral haptic teleoperation of hexapod robot based on time-domain passivity control

LI Jia-yu¹, YOU Bo^{1†}, XU Jia-zhong¹, DING Liang², CHEN Han-nan¹, GAO Hai-bo²

(1. Research Institute of Mechatronic Control and Automation Technology, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 2. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: With the depth of the research of hexapod robots, new challenges have arisen in terms of designing their teleoperation system. To compensate for the influence of the soft contact condition on the stability and controllability of the system, a bilateral haptic teleoperation scheme is proposed based on the time-domain passivity control (TDPC) approach. In the teleoperation system, an approximate coordination of position-velocity is established between the master robot and the slave hexapod. Through analysis of the interaction mechanic of flexible contact between the foot and ground, a passivity observer and a passivity controller are designed at the environment termination for eliminating the potential activity. Additionally, the control architecture of the teleoperation system is designed based on the difference of velocity tracking, and the difference is fed back to the operator in the form of haptic force. The stability of the controller parameters is shown via the Llewellyn's criterion. Finally, a semi-physical simulation platform is developed. Experiments of the system demonstrate that the proposed method can ensure the stability of bilateral haptic teleoperation of hexapod robots with satisfactory tracking performance.

Keywords: hexapod robot; bilateral teleoperation; soft terrain; foot-terrain interaction mechanics; haptic feedback; TDPC

0 引 言

足式机器人具备比轮式机器人更强的地形通过能力^[1], 而且能够代替人类进入到危险环境中执行救援及勘探等工作, 现已成为热门研究方向. 当多足机器人行走在未知的接触条件时, 环境因素对于机器人运动学/动力学模型的扰动势必会影响其控制系统的性能^[2]. 此时, 单纯依靠步态规划获得机体平顺运动

的理想假设不再得到满足. 遥操作技术作为一种人在环协同控制方式^[3], 将操作者的感知、决策能力融入到目标对象的控制体系中, 可视为一种能够改善多足机器人适应能力及运动能力的有效手段^[4-5].

目前, 针对六足机器人遥操作系统的开发主要集中在无力反馈功能的单向操作模式下, 这其中比较具有代表性的是 Nonami 等^[6] 面向六足机器人

收稿日期: 2018-07-19; 修回日期: 2018-10-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51575120); 哈尔滨市科技创新人才项目(2015RAXXJ007); 哈尔滨市杰出青年人才项目(2014RFYXJ001).

责任编辑: 易建强.

[†]通讯作者. E-mail: youbo@hrbust.edu.cn.

(COMET)开发出的人机交互系统,可实现简单工况下的远距离单向遥操作.美国国家航空航天局(NASA)开发出一套包括虚拟现实及人机接口技术的遥操作系统,该系统已成功地应用于轮足机器人“ATHLETE”^[7]的控制环节中.通过查阅相关文献可以发现,现阶段足式机器人遥操作系统的控制算法很少受到关注.六足机器人所适用的环境条件决定了其运动潜能需要被充分利用,此时,基于足-地无滑移接触的理论假设将不能满足实际运动状态下六足机器人对于其自身可控性及适应性的需求,因此,开发一套高效稳定的双边遥操作系统显得尤为重要.

目前,针对如何完善双边遥操作系统的控制性能,研究人员已提出了许多成熟的解决方案.其中,陈章等^[8]提出了一种变增益切换的遥操作方法,用于保证多自由度机器人在面对不同的任务需求时具备良好的适应能力. Lawrence^[9]则定义了遥操作领域中两个重要的概念:“无源性(passivity)”和“透明性(transparency)”,以此来指导控制参数的合理设计.此外, Niemeyer等^[10]提出的波变量理论,其实质是利用能量流来克服通信端口的有源性.郭语等^[11]则通过设计主端的非线性扰动观测器,并结合从端的滑模阻抗控制策略来提高双边遥操作系统在面对未知扰动时的操控性能.张文安等^[12]提出在机械臂遥操作系统中融入广义扩张状态观测器的控制方法,以保证存在变时延问题情况下遥操作系统的稳定性及跟踪性.

面向仿昆虫型电驱动六足机器人,为提升操作者的临场感并解决松软接触条件对六足机器人遥操作系统所产生的影响,本文提出一种基于时域无源性控制的双边触觉遥操作方法,并通过搭建半物理仿真遥操作平台进行相关实验来表明所提出方法的有效性.

1 六足机器人遥操作系统

1.1 六足机器人构型

六足机器人的本体结构如图1所示.作为双边遥操作系统的从端,机器人本体主要由机体及六条腿构

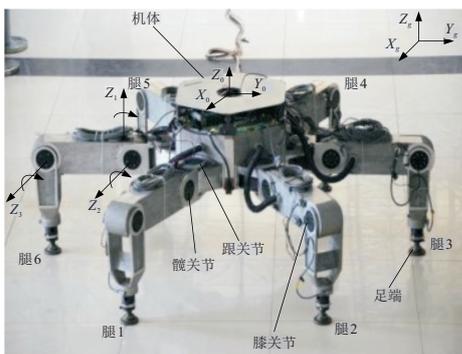


图1 六足机器人构型

成,机体成六边形结构,每条腿构型相同,均由基节、大腿、小腿及足所组成,且六条腿均匀分布于机体外侧.

定义 $\Sigma_{G-X_g Y_g Z_g}$ 、 $\Sigma_{R-X_g Y_g Z_g}$ 、 $\Sigma_{B-X_g Y_g Z_g}$ 、 $\Sigma_{H-X_g Y_g Z_g}$ 、 $\Sigma_{K-X_g Y_g Z_g}$ 和 $\Sigma_{F-X_g Y_g Z_g}$ 分别用来代表全局坐标系、机体坐标系、跟关节坐标系、髌关节坐标系、膝关节坐标系以及足端坐标系.

1.2 遥操作系统方案

六足机器人整体的自由度总数高达18个,如果每个自由度均与主端机器人建立映射关系,则不仅会增加操作者的负担,而且难以实现.为解决主从两端工作空间不匹配的实际问题,本文提出主端位置跟踪从端速度的遥操作方案.系统主端是一个力反馈设备,将机体质心处的速度与主端机器人的关节位置进行映射,底(关节)层运动单元则负责实时计算腿部各个关节的目标转角,外界环境对六足机器人速度的扰动以触觉力形式反馈给操作者.

步态规划是足式机器人区别于其他类型机器人的一个重要技术参数,在确保行走稳定性的前提下,本文选择行走效率最高的三角步态作为六足机器人遥操作过程中的运动模式.

2 主/从端机器人建模

2.1 主端机器人建模

主端机器人的动力学方程可描述为

$$M_m \ddot{q}_m + B_m \dot{q}_m = F_h + u_m. \quad (1)$$

其中: M_m 和 B_m 分别为主端机器人质量和阻尼系数, F_h 为操作者施加于主端机器人的力, u_m 为主端机器人的控制律, q_m 为位置指令.

为了保证系统无源性以及可操作性,本节在主端机器人原动态方程中引入一个新的控制变量,具体形式如下:

$$r_m = q_m + \lambda \dot{q}_m. \quad (2)$$

其中: $0 < \lambda < 1$, 该变量的引入需要在主端控制器内设计一个新的局部控制律 $u_m = u_m^* + \bar{u}_m$, u_m^* 、 \bar{u}_m 分别为主端机器人的局部控制律以及主端机器人在整个双边遥操作系统中的全局控制律,且 $u_m^* = -\hat{M}_m \dot{q}_m - \hat{B}_m q_m$. 由于新控制变量及局部控制律的引入,主端机器人的动力学模型被修正为

$$M_m \dot{r}_m + \bar{B}_m r_m = \bar{u}_m + F_h. \quad (3)$$

其中: $\bar{B}_m = M_m/\lambda$, $\hat{M}_m = M_m/\lambda + \lambda \hat{B}_m - B_m$, $\bar{B}_m = \hat{B}_m$. 此时的主端机器人阻抗模型可表示为

$$Z_m = \frac{H(\bar{u}_m + F_h)}{H(r_m)} = \bar{M}_m s + \bar{B}_m. \quad (4)$$

另外,由文献[13]可知,操作者可以通过调节修正后的手臂阻抗参数($F_h = \bar{Z}_h r_m$)时刻保证操作端的输出无源性。

2.2 从端机器人建模

本文所述六足机器人作为遥操作系统的从端机器人,其各部分结构参数如表1所示,其中COM的位置代表机体质心到相邻腿跟关节的距离。

表1 六足机器人的结构参数

参数	长度/mm	质量/kg	COM位置/mm
机体	400	121.94	中心
基节	180	3.58	100
大腿	500	22.14	250
小腿	500	7.19	300
足端	25	0.2	10

通过机器人单腿运动学方程可推导出*i*号腿足端的目标位置与该腿各关节转角间的关系

$${}^R \dot{P}_{F_i} = J_s(q_s)[\dot{\alpha}_i \dot{\beta}_i \dot{\gamma}_i]^T. \quad (5)$$

其中: α 、 β 、 γ 分别为跟关节、髌关节以及膝关节的转角, ${}^R P_F$ 为足端在机体坐标系下的位置向量, J_s 为关节空间映射到足端坐标系的雅克比矩阵, q_s 为腿的关节向量。

六足机器人处于多足支撑状态时可以被视为与地面构成的并联运动链,以下对支撑腿关节角速度与机体速度之间的关系进行推导:

$$\dot{q}_s = J_s^{-1G} T_T^R ({}^G V_F - {}^G V_R - S^G T_R^R P_F). \quad (6)$$

其中: ${}^G V_F$ 为足端在全局坐标系下的速度向量, ${}^G V_R$ 为机体速度向量, ${}^G T_R$ 为从机体坐标系到全局坐标系的旋转变换矩阵, S 为斜对称矩阵^[14]。

在不考虑足端与地面之间发生相对滑移的情况下可知 ${}^G V_F = 0$,则式(6)可简化为

$$\dot{q}_s = J_s^{-1G} T_T^R (-{}^G V_R - S^G T_R^R P_F). \quad (7)$$

通过观察式(6)可知,机体位姿的波动量与关节转角之间存在耦合的非线性关系.忽略六足机器人行走过程中位姿波动对运动状态的影响,可以推导出六足机器人机体的速度损失模型为

$$\delta_e = \Delta^G V_R = {}^G V_F - S^G T_R^R \Delta^R P_F - {}^G T_R J_s \Delta q_s. \quad (8)$$

其中: δ_e 为机体速度损失的总和且 $\Delta^G V_R = {}^G V'_R - {}^G V_R$, ${}^G V'_R$ 是支撑足与地面发生相对滑移时机体的速度量; $\Delta^R P_F$ 为六足机器人足端的滑移量且 $\Delta^R P_F = {}^R P'_F - {}^R P_F$, ${}^R P'_F$ 是足端发生滑移后相对于机体坐标系的位置量; Δq_s 为六足机器人支撑腿

各关节的角速度误差且 $\Delta q_s = q'_s - q_s$, q'_s 是足端发生相对滑移时支撑腿各关节角速度的突变量。

六足机器人在松软地形上行走时,机体出现速度损失的主要原因有两方面:足端与地面之间所发生的相对滑移以及系统内部的传动误差.由此,可量化出松软地形条件下六足机器人机体的速度损失模型为

$$\delta_e = \delta_j + \delta_f. \quad (9)$$

其中: δ_j 代表由于六足机器人内部的传动误差所造成的机体速度损失, δ_f 代表由于足底滑移所导致的机体速度损失。

本文将地形条件导致六足机器人机体产生的速度损失模型视为从端机器人与环境端之间的交互作用力,由此得到松软地形条件下六足机器人在该运动方向上的运动学模型为

$$\delta_e = u_s + v_s. \quad (10)$$

其中: δ_e 为六足机器人行走过程中造成机体速度出现差异的等效作用力, u_s 为从端系统的控制输入, v_s 为六足机器人机体的速度。

3 双边遥操作架构分析

实际上,足底滑移以及其他外力可能会造成环境端呈现出某种程度上的有源性.当六足机器人行走在松软地形上时,由于足-地接触之间产生的驱动力有限或者受到外部阻力,使得足-地作用难以维持理想的静摩擦状态,进而产生足底滑移现象.由于足-地力学模型恰恰能反应出滑移与接触力之间的关系,本节将基于足-地作用机理^[15],在考虑相对滑移的情况下,分析六足机器人整个足-地接触(法向和切向)过程中,环境端口是否严格无源。

3.1 足-地法向接触过程中有源性分析

由文献[15]的研究结果可知,对于具有一定柔性的足与松软地形进行动态接触时,其法向维度上的力学模型可表示为

$$F_N = \begin{cases} k_N \Delta \delta_N^n + b_N \delta_N^p \Delta \delta_N^q, & \Delta \delta_N > 0; \\ 0, & \Delta \delta_N \leq 0. \end{cases} \quad (11)$$

其中: F_N 为法向接触力; k_N 、 b_N 分别为动态接触过程中法向模型的等效刚度系数以及等效阻尼系数; $\Delta \delta_N$ 为足端的等效形变,且定义 $\Delta \delta_N = \delta_N - \bar{\delta}_N$, δ_N 代表足-地接触过程中足在地面上的法向位移, $\bar{\delta}_N$ 代表地面的塑性变形,其数值大小与最大沉陷量 δ_{Nmax} 有关。

在法向维度上表征环境端所产生的能量为

$$E_N = \int_0^T F_N(t) \dot{\delta}_N(t) dt = \begin{cases} F_N = E_m \delta_N, \\ F_T = G_m \delta_T, \end{cases} \quad (17)$$

$$\int_0^T (k_N \Delta \delta_N^n(t)) \dot{\delta}_N(t) dt + \int_0^T (b_N \delta_N^p(t) \Delta \dot{\delta}_N^q(t)) \dot{\delta}_N(t) dt, \quad (12)$$

其中 E_N 为足-地动态接触过程中法向的能量函数。由地面塑性变形 $\bar{\delta}_N$ 的定义可知,其值仅与最大沉陷量有关。由简化的 Hunt-Crossley 模型可知, $p = n, q = 1$ 。通过将机器人腿部等效成一个弹簧-阻尼系统,将腿部自由状态规定为弹簧的原始长度,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_N 始终为正, k_N 和 b_N 也始终保持正值,则式(12)可进一步简化为

$$E_N = \int_0^T k_N \Delta \delta_N^n(t) \Delta \dot{\delta}_N(t) dt + \underbrace{\int_0^T b_N \delta_N^p(t) \delta_N^q(t) dt}_{\geq 0} \geq \int_0^T k_N \Delta \delta_N^n(t) \Delta \dot{\delta}_N(t) dt \geq \frac{k_N}{n+1} [\Delta \delta_N^{n+1}(T) - \Delta \delta_N^{n+1}(0)] \geq 0. \quad (13)$$

由此可知,在足-地动态接触过程中,环境端在法向维度上可始终保证输出无源。

3.2 足-地切向接触过程中有源性分析

在切向上,足-地作用力主要与机器人足端在地面上的切向剪切位移和剪切速度有关。同样,根据文献[15]可得切向动态接触过程中的力学模型为

$$F_T = \varepsilon \mu F_N - C \dot{\delta}_T \sqrt{|\delta_T|}, \quad (14)$$

$$\varepsilon = \frac{e^{-\delta_T/K} - e^{\delta_T/K}}{e^{\delta_T/K} + e^{-\delta_T/K}}. \quad (15)$$

其中: F_T 为切向接触力; δ_T 为足在地面上的切向剪切位移; K 为地面的剪切位移模量,该常数与地面材质有关; μ 为足-地间的摩擦系数; C 为切向接触的等效阻尼系数。

在切向接触维度中,环境端能量函数可表示为

$$E_T = \int_0^T F_T(t) dt = \int_0^T (\varepsilon(t) \mu F_N(t)) \dot{\delta}_T(t) dt - \int_0^T (C \dot{\delta}_T(t) \sqrt{|\delta_T(t)|}) \dot{\delta}_T(t) dt. \quad (16)$$

将足端踏入地面的过程视为对足的整体进行轴向及切向的等效压缩;而在足准备抬离地面时,又视为对足的整体进行轴向及切向的等效拉伸。由此,根据胡克定律可知

其中 E_m 和 G_m 分别为弹性模量和切向模量,其值与接触材料有关。因为足-地接触间的等效形变可以认为是在弹性范围内环境力单独对足端进行压缩或拉伸作用,由此可知材料常数 E_m 与 G_m 存在线性关系,即

$$G_m = \frac{E_m}{2(1+\nu)}, \quad (18)$$

其中 ν 为泊松比。通过式(17)和(18),可推导出足端法向/切向上的等效形变与接触力之间的关系为

$$\frac{\delta_T}{\delta_N} = 2(1+\nu) \frac{F_T}{F_N}. \quad (19)$$

将式(19)代入(11)及(14),则切向接触力模型可表示为

$$F_T(t) = \frac{C \delta_T(t) \dot{\delta}_T(t) \sqrt{|\delta_T(t)|}}{\varepsilon(t) \delta_N(t) \mu (2+2\nu) - \delta_T(t)}. \quad (20)$$

将式(20)代入(16),并进行等效变换,有

$$E_T = \int_0^T F_T(t) dt = \int_0^T \left(\frac{C \delta_T(t) \dot{\delta}_T(t) \sqrt{|\delta_T(t)|}}{\mu \varepsilon(t) \delta_N(t) \mu (2+2\nu) - \delta_T(t)} \right) \dot{\delta}_T(t) dt + \int_0^T C [\dot{\delta}_T(t)]^2 \sqrt{|\delta_T(t)|} dt - \int_0^T C [\dot{\delta}_T(t)]^2 \sqrt{|\delta_T(t)|} dt. \quad (21)$$

通过观察,式(21)最后一项是一个恒大于等于零的项。将前两项作为一个整体,分析正负性,有

$$\int_0^T \left(\frac{C \delta_T(t) \dot{\delta}_T(t) \sqrt{|\delta_T(t)|}}{\mu \varepsilon(t) \delta_N(t) \mu (2+2\nu) - \delta_T(t)} \right) \dot{\delta}_T(t) dt + \int_0^T C [\dot{\delta}_T(t)]^2 \sqrt{|\delta_T(t)|} dt = \int_0^T \frac{\mu C (2+2\nu) \varepsilon(t) \delta_N(t) [\dot{\delta}_T(t)]^2 \sqrt{|\delta_T(t)|}}{\mu (2+2\nu) \varepsilon(t) \delta_N(t) - \delta_T(t)} dt. \quad (22)$$

基于双曲正切函数属性可以发现,当 $\delta_T(t) \leq 0$ 时, $\varepsilon(t) \geq 0$, 式(22)为非负;当 $\delta_T(t) \geq 0$ 时, $\varepsilon(t) \leq 0$, 式(22)仍然非负。由此,可将式(21)分解成两部分:一部分看作是一个恒大于等于零的无源子系统(22);另一部分则为一个恒小于等于零的有源子系统(式(21)中最后一项)。当这两部分之和为正数时,表明该环境系统消耗能量,足-地切向接触过程将是严格无源的;当这两部分之和为负数时,该环境系统产生部分额外能量,足-地切向接触过程表现出一定的有源性。

如前文所述,操作者可以自动调节修正后的手臂阻抗参数以保证操作端的无源性。如果通过设计控制算法可以时刻补偿环境端的有源性溢出,则对于一

个具有无源端口的双端口网络, 可以采用 Llewellyn 准则^[16]设计控制律参数以保证整个双端口网络的绝对稳定。

4 双边遥操作控制算法设计

对于模型的不确定性和外界干扰给系统带来的不稳定问题, 传统的解决方法通常需要已知动力学模型或进行参数辨识, 这无形中加大了控制系统的设计难度。本文从系统能量分析的角度入手, 所提出的时域无源性控制算法, 正适用于这种对模型不确定性和外界扰动较为敏感的系统, 可以减弱对模型保真度的需求, 增强系统的可实施性。

4.1 基于TDPC的补偿算法设计

根据前文建立的主从端机器人动力学/运动学模型, 本节将基于电路学中双端口网络技术, 描述所设计六足机器人双边遥操作系统的架构。

为在松软地形条件下能更好地实现机体速度的持续跟踪, 本文在常规速度级控制器的基础上, 采用文献[17]所提出的基于时域无源性分析的控制算法解决足底滑移导致的系统潜在有源性, 具体控制架构如图2所示。

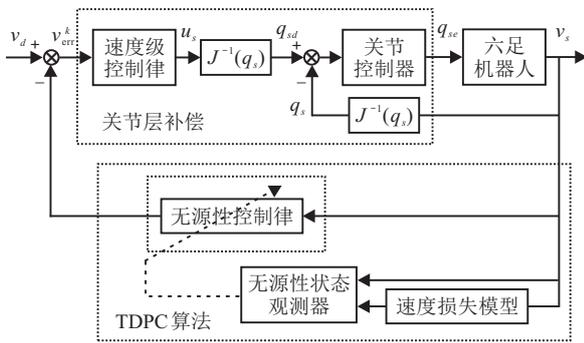


图2 六足机器人闭环控制框图

首先设计一个无源观测器 (passivity observer, PO), 时刻监测双端口网络中操作端/环境端是否处于无源的状态。如果发现有额外能量从该端口注入到双端口网络内, 则设计一个时变的阻尼系数作为无源控制律 (passivity controller, PC), 消耗掉这部分能量, 保证双端口网络的绝对稳定。

按如下过程确定阻尼系数 α_x :

1) 假设从端机器人机体纵向速度以及松软地形条件下环境端导致机体出现的速度差异力在每一个采样周期内均为常值, 通过 PO 可以观测到任意时刻内流入或流出系统的能量值, 即

$$E_x(n) = E_x(n-1) + \delta_{ex}(n)\nu_x(n)\Delta T + \alpha_x(n-1)\nu_x^2(n-1)\Delta T. \quad (23)$$

2) 设计变阻尼系数 α_x : 当某一时刻 PO 观测到环

境端有额外的能量流入系统时 ($E_x(n) < 0$), 为抵消掉这部分能量, 需要对 α_x 进行赋值; 否则 ($E_x(n) \geq 0$), 系数 α_x 将持续保持零值, 即

$$\alpha_x(n) = \begin{cases} -\frac{E_x(n)}{\nu_x^2(n)\Delta T}, & E_x(n) < 0; \\ 0, & E_x(n) \geq 0. \end{cases} \quad (24)$$

3) 当环境系统的能量输出处于有源状态时 ($PO < 0$), 从端机器人的控制输入在无源性控制律 PC 的作用下修正为

$$u_s^* = u_s + \alpha_x(n)\nu_x(n). \quad (25)$$

由下式可以发现, 通过所设计的变阻尼参数 α_x , 环境端将成为一个恒定无源的端口:

$$\begin{aligned} \check{E}_x(n) &= E_x(n) + \alpha_x(n)\nu_x^2(n)\Delta T \geq \\ E_x(n) - \frac{E_x(n)}{\nu_x^2(n)\Delta T}\nu_x^2(n)\Delta T &\geq 0. \end{aligned} \quad (26)$$

根据主端机器人的修正模型(3)以及从端机器人的运动学模型(10), 通过在环境端引入局部的无源控制律 PC, 得到修正后的六足机器人双边遥操作系统的双端口网络阻抗模型为

$$\begin{bmatrix} F_h \\ \delta_{ex} + PC \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_m \\ -\nu_x \end{bmatrix}. \quad (27)$$

4.2 双边遥操作的控制律设计

操作者向从端机器人发送指令 r_m , 以此作为机体的期望速度 V_{xd} . 复杂的接触状态可能会造成环境端的有源性溢出, 导致六足机器人的实际线速度 V_x 与其期望速度存在差值。如果此时 r_m 的值大于 V_x , 则在主端机器人内部产生一股阻力, 使得操作者不会继续增加 r_m ; 相反, 如果此时 r_m 的值小于 V_x , 则在主端机器人内部产生一股拉力, 使得操作者能更有效率地控制六足机器人行走。

基于速度跟踪的控制模式设计双边遥操作系统的控制律

$$\begin{cases} \bar{u}_m = C_m(\nu_x(t) - r_m(t)), \\ u_s = C_s(r_m(t) - \nu_x(t)) - K_s\nu_x(t). \end{cases} \quad (28)$$

其中: C_m 和 C_s 分别为主从两端的控制增益; K_s 为局部阻尼补偿系数, 用于消除六足机器人内部传动误差导致系统所产生的潜在有源性。于是, 式(27)中的阻抗矩阵 Z_s 可表示为

$$Z_s = \begin{bmatrix} \bar{M}_m s + \bar{B}_m + C_m & C_m \\ C_s & C_s + K_s + 1 \end{bmatrix}. \quad (29)$$

根据 Llewellyn 准则, 双边遥操作系统的控制律参数应满足下列条件:

$$\begin{cases} \bar{B}_m + C_m \geq 0, \\ C_s + K_s + 1 \geq 0, \\ (2\bar{B}_m + 2C_m)(C_s + K_s + 1) - \\ C_m C_s - |C_m C_s| \geq 0. \end{cases} \quad (30)$$

式(30)的解为

$$\begin{cases} \bar{B}_m \geq 0; \\ C_m, C_s \geq 0; \\ K_s \geq 0. \end{cases} \quad (31)$$

所设计的控制律参数如果满足稳定性条件(31),则认为在松软地形条件下的六足机器人双边遥操作系统可以达到绝对稳定。

5 实验验证

本节采用一个3-DOF关节型机器人作为控制指令的输入端,实验系统从端为基于Vortex仿真平台所创建的六足机器人高保真模型以及地形环境模型,主从两端通过局域网进行通信。

5.1 双边遥操作的控制律设计

本文的另一个研究目标是力觉反馈功能在六足机器人双边遥操作系统中的应用效果,因此,采用遥操作领域内常用的PHANToM Omni触觉力反馈设备作为实验系统的主端。

在实验过程中,可对人为施加在主端机器人上的操作力进行估计,有

$$F_h = \bar{M}_m \dot{r}_m + \bar{B}_m r_m - \bar{u}_m. \quad (32)$$

根据文献[18]的研究结果,主端机器人的转动惯量 $M_m = 0.0035 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 设置所引入新变量的控制参数 $\lambda = 1$ 。

5.2 实验系统从端及环境端

本节使用Vortex(CMLabs, Montreal, Canada)多体力学实时虚拟仿真平台开发一套具备较高保真度的六足机器人及接触环境的仿真模型,整个仿真系统包括机器人本体模型模块、地形创建模块、视景仿真模块、通信模块、运动控制模块、足-地接触力学求解模块以及运动学和动力学求解模块。将所开发的各个模块集成,借助Vortex仿真软件中的丰富功能,并加入环境建模和视景仿真技术实现包含六足机器人及环境视景的实时虚拟仿真系统^[9]。

5.3 双边遥操作实验验证

本文搭建的半物理仿真实验平台如图3所示,实验中的环境工况为足-地间具备一定滑移条件的平坦地形,地形尺寸设定为 $50 \text{ m}(x) \times 50 \text{ m}(y)$, 具体足-地

接触参数如表2所示。

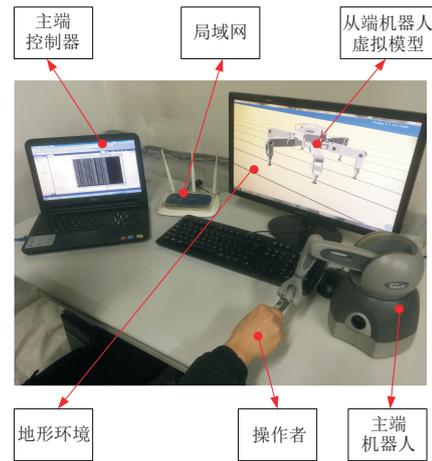


图3 半物理仿真遥操作实验平台

表2 具有一定滑移条件的足-地接触参数

参数	数值
$k_N / (\text{N}/\text{m})$	1.0×10^6
$b_N / (\text{N} \cdot \text{s}/\text{m})$	1.0×10^5
$C / (\text{N} \cdot \text{s}/\text{m})$	0
K / mm	0.001
n	2
q	1
p	2
μ	0.05

实验中将环境端所嵌入无源观测器的采样频率设定为 100 Hz 。为防止单步采样周期内求解出的PC值过大,设定其上限值为5.0。

基于速度跟踪模式对机器人进行双边遥操作实验。根据式(31),将该系统控制律参数设为 $C_m = 10, K_s = 0.1, C_s = 5, \bar{B}_m = 0.4$ 。设计两组实验:一组未采用TDPC补偿算法,另一组则采用TDPC对环境端的潜在有源性进行补偿。实验结果如图4和图5所示。

首先对比两组实验的位置-速度跟踪效果。图4(a)表明,在给定的地形参数(表2)作用下,会增大足底滑移现象发生的几率,使得从端的六足机器人与地面接触的相互作用表现为一个有源系统,导致位置-速度跟踪效果较差并伴有滞后现象。通过观察图4(a)可以发现,此时六足机器人机体最大速度已接近 0.1 m/s , 速度差的峰值则可达 0.015 m/s , 局部差异可持续在 0.01 m/s 。而图5(a)则反映出采用TDPC算法实时抵消此部分额外的能量,使得位置-速度的跟踪效果趋于稳定。然而,由于环境端修正后的阻尼特性,会使得六足机器人双边遥操作系统主从端的跟踪性能受到一定影响(图5(a)中的六足机器人实际机体速度与期望值略有差异)。

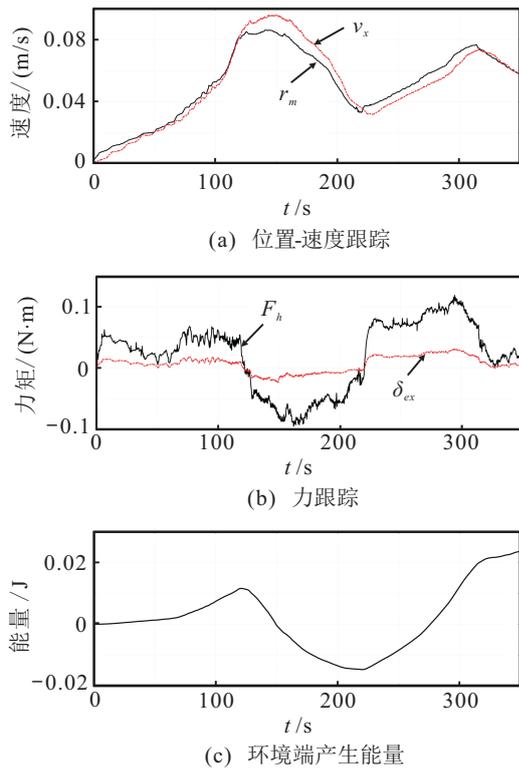


图4 无TDPC的遥操作实验结果

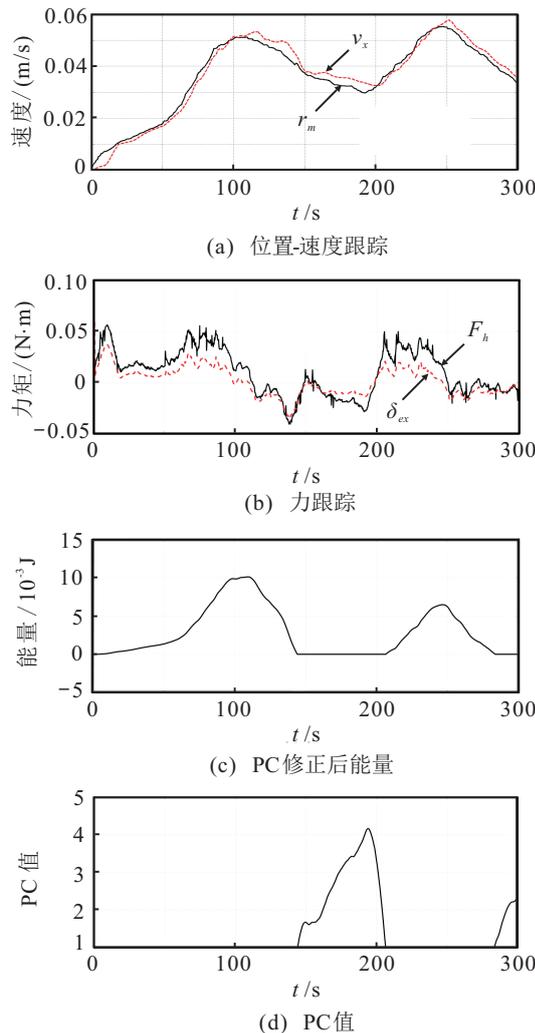


图5 基于TDPC的遥操作实验结果

其次,对比两组实验的力反馈性能. 由图4(b)可以看出,忽略环境端潜在有源性,导致当外界能量注入双端口网络后,由于位置-速度跟踪效果不稳,使得来自主端机器人内部的力感震荡剧烈,振动幅度在 $\pm 0.1 \text{ N}\cdot\text{m}$ 上下波动,最大振幅超过 $0.1 \text{ N}\cdot\text{m}$,且力透明度较差. 而图5(b)表明,操作力的波动显著减弱,振幅维持在 $\pm 0.05 \text{ N}\cdot\text{m}$ 内. 对比有无TDPC算法的情况可以发现,所反馈的力感幅值近似下降50%,从另一方面也反映出该方法可以减轻操作者的操作负担.

最后,分析两组实验中的系统能量. 其中在 $150 \text{ s} \sim 280 \text{ s}$ 之间,能量函数小于零,说明此时系统将表现出一定的有源性(图4(c)). 再观察图4(a)可以发现,该时间段内的速度跟踪效果最差. 另外,在 $100 \text{ s} \sim 200 \text{ s}$ 之间的跟踪效果较差,此时PC处于同步计算状态(图5(d)),且峰值达到3.2,并未超过阈值5;而此时系统能量在PC值的同步抵消作用下,保持0值状态(图5(c)),修正后的环境端则成为一个无源系统.

总体来说,一方面通过实验曲线可以表明本文提出的六足机器人遥操作方法在面对松软地形时具备良好的稳定性及力透明度;另一方面,通过在控制环节中引入TDPC算法,并加入局部阻尼补偿可以避免机器人内部潜在有源性造成的影响.

6 结论

本文提出了一种面向松软地形的基于时域无源性控制的六足机器人双边触觉遥操作方法. 在该遥操作系统中,首先考虑主从两端工作空间的不匹配问题,提出了主端位置跟踪从端速度的映射方式;建立了松软地形条件下六足机器人足-地动态接触的能量模型,证明了六足机器人行走过程中可能产生额外的能量并由环境端流入系统;基于TDPC算法设计了速度跟踪模式下的无源控制律,消除了发生足底滑落的情况下环境端潜在有源性所造成的不利影响;保证了六足机器人双边遥操作系统可适用于松软地形并具有持续稳定的跟踪能力. 未来,针对如何设计稳定的六足机器人多维度遥操作系统,以及提升控制算法对模型不确定性和外界干扰的有效性,将开展更全面的分析和研究.

参考文献(References)

[1] 刘逸群, 邓宗全, 刘振, 等. 液压驱动六足机器人一种低冲击运动规划方法[J]. 机械工程学报, 2015, 51(3): 71-80.
(Liu Y Q, Deng Z Q, Liu Z, et al. Low-impact motion planning method of hydraulically actuated hexapod robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(3): 71-80.)

- [2] 程刚. 非结构化环境中移动机器人系统越障运动机理的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学工程科学学院, 2006.
(Cheng G. Research on over-obstacle motion mechanism of the whole mobile robot system in unstructured environment[D]. Hefei: School of Engineering Sciences, University of Science and Technology of China, 2006.)
- [3] Passenberg C, Peer A, Buss M. A survey of environment-operator- and task-adapted controllers for teleoperation systems[J]. *Mechatronics*, 2010, 20(7): 787-801.
- [4] 李佳钰, 尤波, 丁亮, 等. 基于双向控制的六足机器人转向遥操作研究[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(3): 71-80.
(Li J Y, You B, Ding L, et al. Steering teleoperation of hexapod robot based on bilateral control[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(3): 71-80.)
- [5] You B, Li J Y, Ding L, et al. Semi-autonomous bilateral teleoperation of hexapod robot based on haptic force feedback[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2017, 91(3/4): 583-602.
- [6] Konami K, Barai R K, Irawan A, et al. Hydraulically actuated hexapod robots: Design, implementation and control[M]. Chiba: Springer, 2014: 199-235.
- [7] Vona III M A. Virtual articulation and kinematic abstraction in robotics[M]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2009: 1-292.
- [8] 陈章, 梁斌, 张涛, 等. 一种基于切换控制律的机器人双边遥操作方法[J]. *宇航学报*, 2015, 36(4): 410-418.
(Chen Z, Liang B, Zhang T, et al. A switching control law based bilateral teleoperation approach for robot[J]. *Journal of Astronautics*, 2015, 36(4): 410-418.)
- [9] Lawrence D A. Stability and transparency in bilateral teleoperation[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1993, 9(5): 624-637.
- [10] Niemeyer G, Slotine J E. Telemanipulation with time delays[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2004, 23(9): 873-890.
- [11] 郭语, 孙志峻. 基于扰动观测器的时延双边遥操作系统鲁棒阻抗控制[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(21): 15-21.
(Guo Y, Sun Z J. Robust impedance control of bilateral teleoperation system with time delay based on disturbance observer[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(21): 15-21.)
- [12] 张文安, 金俊凯, 俞立, 等. 基于广义扩张状态观测器的遥操作系统同步控制[J]. *控制与决策*, 2016, 31(11): 2077-2082.
(Zhang W A, Jin J K, Yu L, et al. Synchronization control of teleoperation systems based on generalized extended state observers[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(11): 2077-2082.)
- [13] Lee D, Palafox O M, Spong M W. Bilateral teleoperation of a wheeled mobile robot over delayed[C]. *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation Conf. Orlando*, 2006: 3298-3303.
- [14] Arai T, Koyachi N, Adachi H, et al. Integrated arm and leg mechanism and its kinematic analysis[C]. *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation Conf. Nagoya*, 1995: 994-999.
- [15] Ding L, Gao H B, Deng Z Q, et al. Foot-terrain interaction mechanics for legged robots: Modeling and experimental validation[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2013, 32(13): 1585-1606.
- [16] Llewellyn F B. Fundamental properties of transmission systems[J]. *Proceedings of the IRE*, 1952, 40(3): 271-283.
- [17] Ryu J H, Kwon D S, Hannaford B. Stable teleoperation with time-domain passivity control[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2004, 20(2): 365-373.
- [18] Cavusoglu M C, Feygin D, Tendick F. A critical study of the mechanical and electrical properties of the PHANToM haptic interface and improvements for high performance control[J]. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 2011, 11(6): 555-568.
- [19] 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 driving simulator for hexapod robots[J]. *Robot*, 2016, 38(6): 678-686.)

作者简介

李佳钰(1986—), 男, 讲师, 博士生, 从事足式机器人控制与人机交互技术的研究, E-mail: lijiayu19861122@sina.com;

尤波(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能机器人与机电控制等研究, E-mail: youbo@hrbust.edu.cn;

许家忠(1977—), 男, 教授, 博士生导师, 从事复合材料成型工艺及装备、机电一体化及机器人技术等研究, E-mail: xujiazhong@126.com;

丁亮(1980—), 男, 教授, 博士生导师, 从事特种机器人、星球探测车等研究, E-mail: liangding@hit.edu.cn;

陈翰南(1995—), 男, 硕士生, 从事足式机器人遥操作的研究, E-mail: m13032076365@163.com;

高海波(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 从事特种机器人、星球探测车等研究, E-mail: gaohaibo@hit.edu.cn.

(责任编辑: 李君玲)