

评价指标体系下的外骨骼支撑相控制效果

陈建华¹, 穆希辉², 杜峰坡², 何翼¹, 崔东华^{1*}

1. 海军研究院, 北京 102401

2. 陆军研究院, 石家庄 050000

摘要 针对一种下肢外骨骼机器人, 设计了一种基于步态识别的阻抗自调整控制方法, 并通过实验验证, 与传统的位置控制、阻抗恒定控制方法进行了对比分析。通过建立一套基于雷达图的指标体系, 对不同的外骨骼支撑相控制实验结果进行了科学评价, 发现阻抗自调整控制能够保证外骨骼在支撑相不同阶段满足不同的运动需求, 与传统阻抗控制方法相比具有最优的总体运动效果。

关键词 指标体系; 外骨骼; 支撑相; 控制效果

下肢外骨骼机器人是一类穿戴于人体下肢外侧、感知人体运动意图并及时辅助人体运动或提供人体助力的机器人系统, 其运动控制回路中涉及到人体。

为了较好地做到人机运动匹配, 不少研究者开始从人体仿生学的角度研究外骨骼的控制策略。通过研究人体行为发现, 由于人体下肢肌骨系统既包括被动成分(如骨骼、肌腱、韧带、软骨及放松的肌肉), 又包括主动成分(如收缩并具有反射功能的肌肉)^[1], 使得人体可以适时地改变腿部阻抗参数、调整柔顺程度, 以实时适应外界环境和所需的自身运动方式。不少外骨骼开发人员尝试采用阻抗控制来解决外骨骼行走僵硬以及人机不匹配的难题^[2-5]。

然而, 目前一直缺少评价阻抗控制效果的指标体系, 因此难以很好地解决阻抗控制变化规律的优化问题。为此, 本文通过建立一套采用雷达图评分的外骨

骼综合控制效果指标体系, 对运用于下肢外骨骼的几种阻抗控制方法进行了实验对比分析。

1 支撑相外骨骼变阻抗控制模型

支撑相期间, 外骨骼与地面接触, 主要起支撑和负重的作用。其物理模型可采用倒立摆模型, 具有下端位置固定、运动轨迹相对稳定、运动自由性低以及阻抗效果大、负重能力强等特点(图1)。

考虑机械重力和实际摩擦, 外骨骼的下肢阻抗自调整控制数学表达式为

$$F + G - f + (\hat{f} - \hat{G}) = Z_{\text{exo}}(t)\Delta X \quad (1)$$

式中, F 为外力合力, G 为重力作用力, f 为内摩擦力, \hat{G} 和 \hat{f} 分别表示重力、摩擦力的估计值, $Z_{\text{exo}}(t)$ 表示外骨骼阻抗, ΔX 为位移变化。

收稿日期: 2019-02-14; 修回日期: 2019-03-20

基金项目: 军队重点科研项目(01060603)

作者简介: 陈建华, 工程师, 研究方向为信息感知与智能技术, 电子信箱: chenjhua@zju.edu.cn; 崔东华(通信作者), 研究员, 研究方向为武器系统工程, 电子信箱: cuidonghua328@yeah.net

引用格式: 陈建华, 穆希辉, 杜峰坡, 等. 评价指标体系下的外骨骼支撑相控制效果[J]. 科技导报, 2019, 37(13): 88-92; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2019.13.013

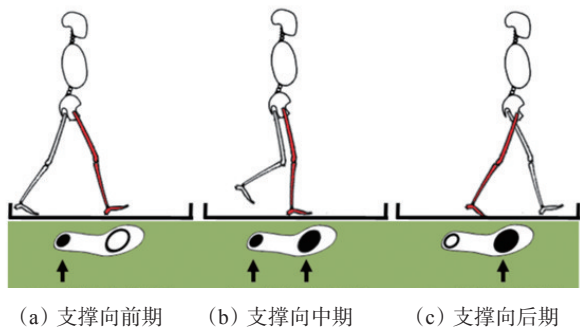


图1 人体行走支撑相腿部受力图

Fig. 1 Force on human support leg during walking

在支撑相变阻抗控制中,外骨骼阻抗变化方式通过拟人设计,依据本研究组已测定的下肢刚度变化规律进行 $Z_{\text{exo}}(t)$ 的自调整规则设计(图2)。

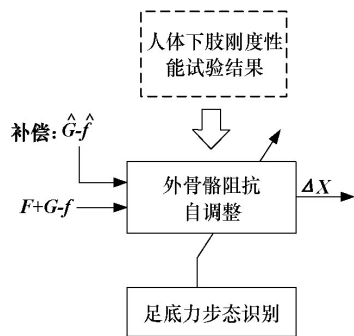


图2 基于步态识别的变阻抗控制原理

Fig. 2 Variable impedance control method by gait classification

2 实验结果

为与以往控制方式作对比,分别采用位置控制、阻抗恒定控制和本文提出的变阻抗控制,依此开展外骨骼支撑相行走实验(图3)。其中,液压缸处安装有位置传感器和力传感器。根据人体支撑相前、中、后3个阶



图3 外骨骼支撑行走实验照片

Fig. 3 Control experiment of exoskeleton support phase during walking

段的人体下肢刚度值,阻抗恒定控制实验分别对应设定3组不同阻抗值(阻抗1~阻抗3,其中阻抗1包含刚度值6000 N/m和阻尼值320 N/(m/s),阻抗2、3相关数值含义与之相同),分别与阻抗自调整规则相对应。实验中为消除摆动相影响,设定摆动相均为位置控制方式。各组实验参数设置如表1。

表1 实验参数设置

Table 1 Experimental parameter setting

控制算法	虚拟阻抗设置/ $\{N \cdot m^{-1}, N \cdot (m \cdot s^{-1})^{-1}\}$		
	支撑前相	支撑中相	支撑后相
位置控制	—		
阻抗1	{6000, 320}		
阻抗2	{32000, 640}		
阻抗3	{8000, 160}		
变阻抗	{16000, 320}	{32000, 640}	{8000, 160}

图4给出了5组实验外骨骼下肢长度位移偏差曲线;图5给出了5组实验相应的力传感器变化曲线。对5组实验结果进行定性对比,可得如下结论。

1) 结合图4和图5,实验中支撑相前期外骨骼主要受地面冲击作用;支撑相中期起负重效果,主要支撑上端负载重力及惯性作用;支撑相后期外骨骼即将进入摆动相,运动自由度较大,主要会受到来自人体较强的干预。

2) 将图5(a)与图5(b)~图5(d)进行对比:采用位置控制时(图5(a)),外骨骼支撑相前期受到冲击力较大;采用阻抗控制时(图5(b)~图5(d))能降低冲击力,且随着设定阻抗值的减小,能够降低冲击,但增加了缓冲时间。

3) 将图5(b)与图5(c)、图5(d)对比:当阻抗值较大时(图5(c)),外骨骼表现较为刚硬,对外界干扰影响小,受力与运动较为平顺;阻抗较小时(图5(b)、图5(d)),外骨骼表现较为柔软,受力和运动受外界影响容易产生小幅抖动。

4) 依据图4,采用位置控制时,支撑相三阶段能准确跟随预设轨迹,外环境对外骨骼运动干扰小;采用阻抗恒定控制时,不同的阻抗参数设置,能使外骨骼表现出不同的柔顺性;根据阻抗自调整规则设定的变阻抗控制,运动介于其他4种控制方式中间,在不同时期能够表现出不同的柔顺。

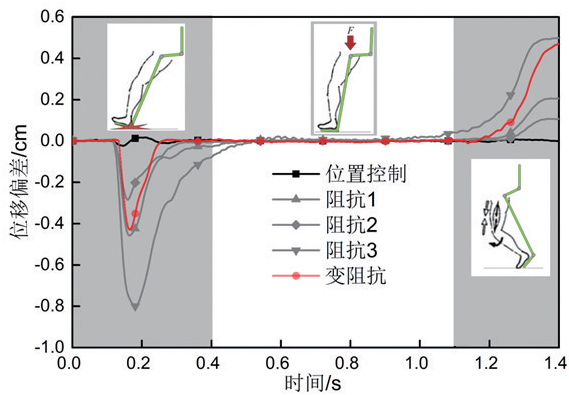


图4 外骨骼下肢长度位移偏差曲线

Fig. 4 Displacement deviation curve of exoskeleton lower limb

3 基于雷达图指标体系的控制效果定量评价

变阻抗控制综合了3种阻抗参数恒定控制的优点,柔顺性、负载特性等各子特性介于它们之间。为定量评价其综合性能,提出了一种基于雷达图指标体系的评价方法。雷达图是一种将图形与数值相结合的评价方法,对各分指标进行定量描述,通过采用特定综合评价函数提取雷达图特征量,可以获得评价对象的综合评价结果^[6-8]。针对外骨骼运动柔顺性、负载能力和随动性等要求,选取以下5个关键指标。

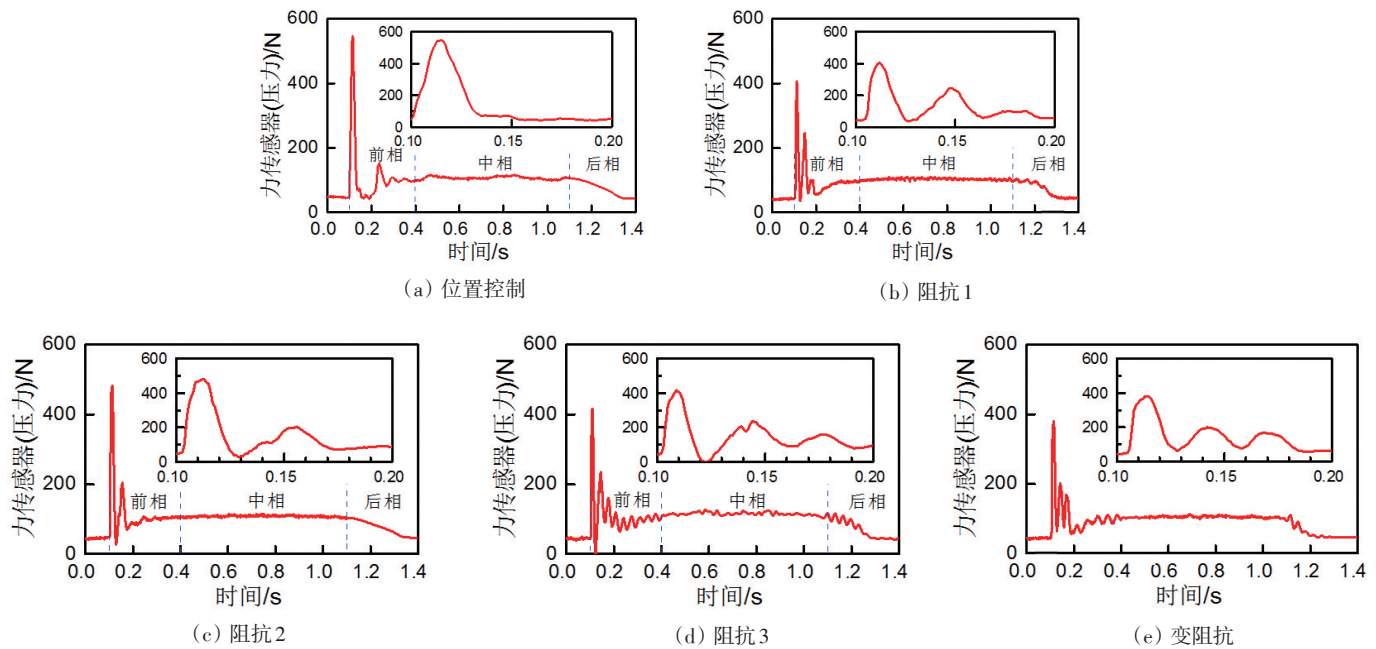


图5 各实验工况受力图

Fig. 5 Force curves of each experiment conditions

1) 冲击力峰值 F 指标主要考查外骨骼对地面冲击的缓冲。将力值区间变换为 $[0, 1]$, 设定参考下限 F_{\min} 为 300 N, 参考上限 F_{\max} 为 800 N。雷达图指标对应换算

$$r_1 = \frac{F_{\max} - F}{F_{\max} - F_{\min}} \quad (2)$$

2) 冲击调整时间 T 指标主要考查外骨骼受到冲击时的稳定性能。设定参考下限 T_{\min} 为 0.1 s, 参考上限 T_{\max} 为 0.5 s。雷达图指标对应换算

$$r_2 = \frac{T_{\max} - T}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (3)$$

3) 中期负载能力 G 指标主要考查外骨骼支撑相中

期负载特性,受外力作用的最大偏差。设定参考下限 G_{\min} 为 0, 参考上限 G_{\max} 为 0.4 cm。雷达图指标对应换算

$$r_3 = \frac{G_{\max} - G}{G_{\max} - G_{\min}} \quad (4)$$

4) 后期随动性 R 指标主要考查外骨骼支撑相后期跟随人体运动的能力。设定参考下限 R_{\min} 为 0, 参考上限 R_{\max} 为 0.2 cm。雷达图指标对应换算

$$r_4 = \frac{R - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} \quad (5)$$

5) 轨迹跟踪能力 S 指标主要考查受干扰下外骨骼保持与预设轨迹同步的能力,通过实际轨迹和预设轨

迹相关系数表征。相关系数表示两个变量之间的相关程度,为

$$Corrcoef = Cov(X, X_d) / (\sigma_x \sigma_{x_d}) \quad (6)$$

其中, $Cov(X, X_d)$ 表示预设轨迹与实际轨迹的协方差, σ_x 、 σ_{x_d} 表示两者的方差。将相关系数设定参考下限 C_{min} 为 0.95, 参考上限 C_{max} 为 1。雷达图指标对应换算

$$r_s = \frac{C - C_{min}}{C_{max} - C_{min}} \quad (7)$$

图6给出了各控制方式雷达评分图。

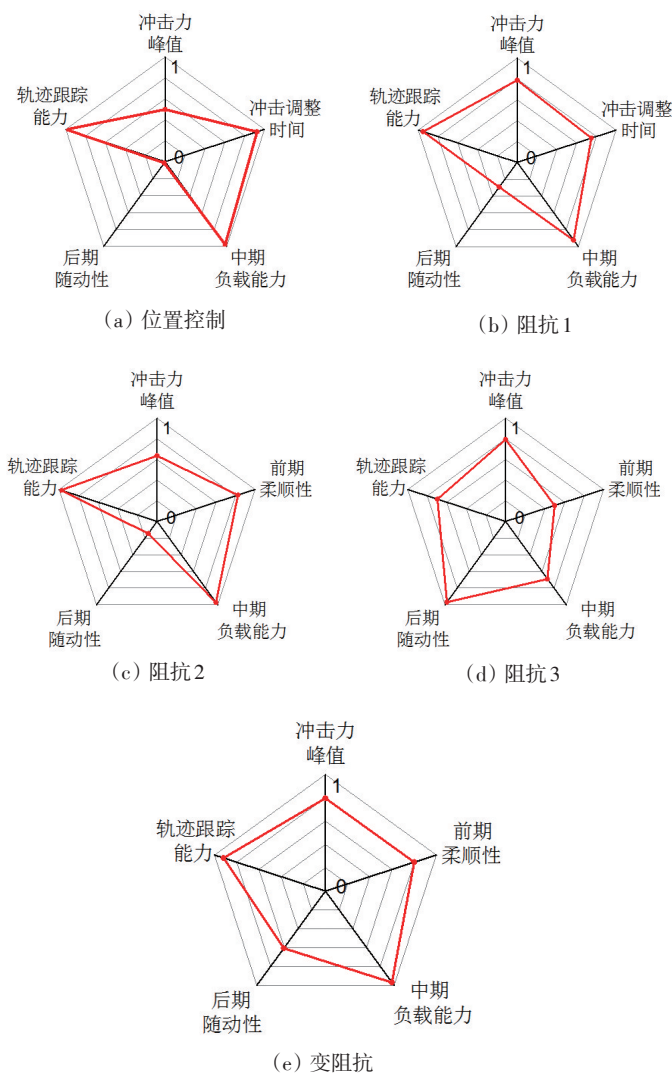


图6 各雷达评分图

Fig. 6 Radar score maps

为对总体效果进行评价,将雷达图面积 S 和周长 L 作为特征量,取两特征量的几何平均值作为评价函数总评分^[6]

$$f(S, L) = \sqrt{S \times L} \quad (8)$$

通过计算可得各控制方式的评价函数总评分,由图7可知,变阻抗控制针对支撑相不同运动需求,能够

充分发挥3种阻抗不同阶段优点,将柔顺性和负载刚性较好协调,提高了控制总体效果。

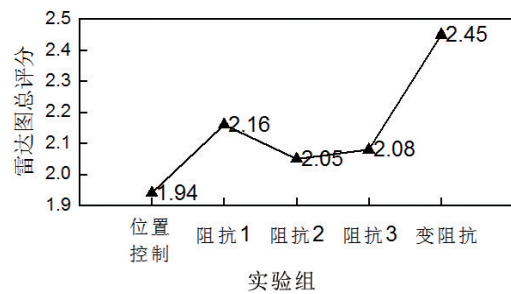


图7 评价函数总评分

Fig. 7 Total score of each condition

4 结论

为改善外骨骼行走人机耦合性,开展了基于步态识别的支撑相阻抗自调整控制方法研究,并对位置控制、恒定阻抗控制和提出的阻抗自调整控制3种方法进行了对比实验,通过雷达图建立评价指标体系,并进行了综合性能评价表明:阻抗自调整控制能够保证外骨骼在支撑相不同阶段满足不同的运动需求,相比其他方法具有最优的总体运动效果。

参考文献 (References)

- [1] Knudson D. 生物力学基础[M]. 钟亚平, 胡卫红, 译. 2版. 北京: 人民体育出版社, 2012: 41.
- [2] 杨智勇, 顾文锦, 张静, 等. 单兵负荷骨骼服的力控制理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [3] Anam K, Al-Jumaily A A. Active exoskeleton control systems: State of the art[J]. Procedia Engineering, 2012(41): 988-994.
- [4] Tran H, Cheng H, Rui H, et al. Evaluation of a fuzzy-based impedance control strategy on a powered lower exoskeleton[J]. International Journal of Social Robotics, 2016, 8(1): 103.
- [5] Baek E, Song S, Oh S, et al. A motion phase-based hybrid assistive controller for lower limb exoskeletons[C]//IEEE International Workshop on Advanced Motion Control. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 197-202.
- [6] 魏春阳, 王信民, 蔡宪杰, 等. 基于雷达图的烤烟烟叶主要化学成分协调性综合评价方法[J]. 中国烟草学报, 2009, 15(5): 48-53.
- [7] 陈勇, 陈潇凯, 李志远, 等. 具有评价结果唯一性特征的雷达图综合评价法[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(12): 1409-1412.
- [8] 郑惠莉, 刘陈, 翟丹妮. 基于雷达图的综合评价方法[J]. 南京邮电学院学报(自然科学版), 2001, 21(2): 75-79.

Study on control effect of exoskeleton during support phase through an evaluation indicator system

CHEN Jianhua¹, MU Xihui², DU Fengpo², HE Yi¹, CUI Donghua^{1*}

1. Naval Research Academy, Beijing 102401, China

2. Army Research Academy, Shijiazhuang 050000, China

Abstract To improve the lower limb exoskeleton moving effect, an impedance self-adjusted control method by gait classification for support phase is presented, and a comparative analysis between traditional position control method and constant impedance control methods and the impedance self-adjusted control method is experimentally conducted by setting up an indicator system based on radar maps and evaluating the moving effects of different control methods during the support phase. Results show that the impedance self-adjusted control method can meet different sports needs at different stages of the supporting phase, which has optimal overall motion effect compared with the traditional impedance control method.

Keywords indicator system; exoskeleton; support phase; control effect ●



(责任编辑 王志敏)