

套装式助力机器人动力学建模与仿真^{*}

王 岚, 陆 露

(哈尔滨工程大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对老年人或者下肢功能较弱患者自主行走存在一定困难的问题, 研究了一种能够辅助其行走的套装式助力机器人。机器人工作时绑缚在人体上, 为行走提供动力。机器人左右对称, 单侧机构包括髋关节和膝关节两部分, 分别由直流电机驱动丝杠螺母机构的电动缸实现。基于 Matlab/Simulink 和 SimMechanics 建立了套装式助力机器人的动力学模型和控制模型, 机器人采用 PD 控制器进行位置控制。最后, 进行了机器人单关节阶跃响应仿真、空载轨迹仿真和带负载轨迹仿真研究。仿真结果表明设计的机器人满足性能指标要求。

关键词: 套装式助力机器人; 动力学; 控制模型; 仿真

中图分类号: TH122; TP242

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)03-0324-05

Dynamic modeling and simulation on the power assisted suit robot

WANG Lan, LU Lu

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Aiming at the difficulty of the elderly and the infirm walking independently, a kind of power assisted suit robot was researched to help people walking independently. The robot is worn on the lower-limb of human body, and it follows the movement of the lower limbs to provide some supports in the process of human walking. The robot's left side and right side were designed symmetrically. Each side of robot contains pelvis and knee joint, and they were driven by the DC motor-driven screw-nut body. Based on Matlab/Simulink and SimMechanics, the robot's dynamics model and control model were constructed. The PD controller was adopted. The robot single joint step respond, trajectory control without load and with load were simulated. The simulation results indicate that the robot can achieve the gait law and has strong load capacity.

Key words: power assisted suit robot; dynamics; control model; simulation

0 引 言

我国和世界上许多国家一样,正在步入老龄化。据统计,截至 2008 年底,我国 60 岁以上老年人口已经达到 1.598 9 亿,约占全国总人口的 12%,今后将以年均 800 万人的规模递增。与之相对的是,通过人工或简单的医疗设备进行的康复理疗,已经远不能满足患者的要求。套装式助力机器人就是为患者提供此类服务辅助装置。

下肢助力机器人的研究起始于 20 世纪 80 年代,1990 年以后助力机器人的研究进入到全面发展时期。瑞士的 LOKOMAT 步行康复训练机器人绑缚在病人下肢上,为病人下肢提供外力,使病人能按照正常人的行走模式进行康复训练^[1-2]。美国加州大学伯克利分校机器人和人体工程实验室研制出美军“伯克利下肢外骨骼”(Berkeley lower extremity exoskeleton, BLE-EX)^[3-4],它由背包式外架、金属腿及相应的液压驱动设备组成,机械系统采用了与类人形结构相似的设计,

有脚踝、膝盖、臀部等关节,很像是人的腿。日本筑波大学开发的 HAL (Hybrid Assistive Limb) 机器人^[5-6],用于协助步态紊乱的行人行走。中科院合肥智能机械研究所研究的下肢助力机器人能与人体协调运动并提供助力^[7-8]。清华大学精密仪器系康复工程研究中心在国家自然科学基金和国家科技支撑计划支持下正在研究 GRTS (gait rehabilitation training system) 步行康复训练机器人^[9]。上海大学^[10]、浙江大学等也对下肢助力机器人进行了相关研究。但目前的研究工作大都处于实验室研究阶段。

笔者研究了一种采用电动缸驱动的助力机器人,分析了人机系统模型,并进行了控制仿真,其对助力机器人的实用化研究具有重要意义。

1 套装式助力机器人简介

套装式助力机器人是绑缚在人体上工作的,在人体行走过程中,可以为人体下肢提供部分助动力。因此需要机器人能够模拟人体下肢行走。助力机器人左右对称,每侧由大腿杆、小腿杆和脚部组成。

人体髋关节为多轴性关节,能作屈伸、收展、旋转及环转运动。但由于股骨头深嵌在髋臼中,髋臼又有关节盂缘加深,包绕股骨头近 2/3,所以关节头与关节窝二者的面积差甚小,故运动范围较小。在行走过程中髋关节以屈伸运动为主,所以将机器人髋关节设计为一个做屈伸运动的旋转关节,在其它方向上有少量的柔顺性。髋关节的驱动采用直流电机驱动丝杠螺母机构的电动缸实现。膝关节只有一个回转自由度,也是采用电动缸驱动。踝关节是具有一定阻尼的被动关节,不驱动。机器人单侧结构如图 1 所示。

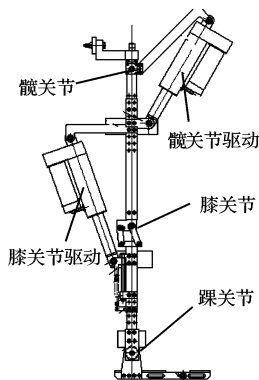


图 1 机器人单侧结构图

为了能满足不同身高的人群使用,大小腿杆及腰部连杆均可以调节长度。具体参数为:大腿杆调节范围为 470 mm ~ 530 mm,小腿杆调节范围为 350 mm ~ 420 mm;腰部调节范围为 390 mm ~ 600 mm。

2 机器人系统模型建立

2.1 人机系统模型建立

依据助力机器人机械结构,基于 Matlab/SimMechanics 建立的人机系统仿真模型如图 2、图 3 所示。

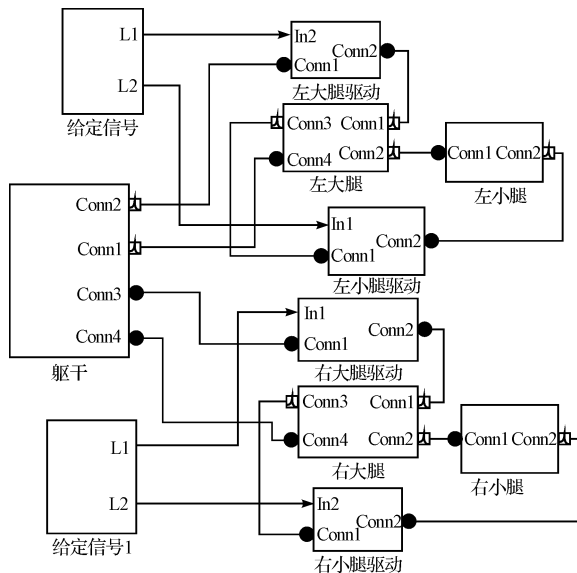


图 2 SimMechanics 的机构仿真模型

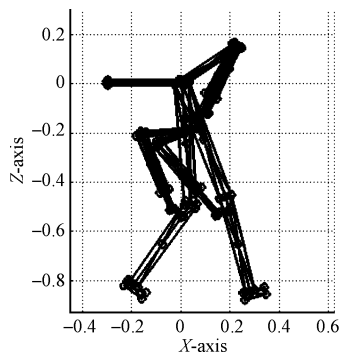


图 3 机构仿真模型

模型中各模块的参数设置为:机器人的大腿杆与小腿杆分别看作是质量均匀分布的棍状体,大腿杆长 $l_{11} = 495 \text{ mm}$,小腿杆长 $l_{12} = 386 \text{ mm}$ 。大腿杆与小腿杆的质量、转动惯量如表 1 所示。由于踝关节设计为具有一定阻尼的被动关节,将脚与小腿合为一个模块,仿真时阻尼设定为 0.3。设计套装式助力机器人的目的是为使用者提供步行动力支持,因此把人体下肢作为负载。依据郑秀媛 CT 法^[11]测量得到的数据,以身高 175 cm,体重 70 kg 的男性为例分析,得到人体下肢质量分布、质心位置和各环节的转动惯量如表 1 所示。

设定双腿直立时各个关节角度为 0° ,大腿向上抬起时髋关节角度为正,小腿向后摆动时膝关节角度为正。

表 1 人机系统基本参数

| | 大腿 | 小腿 | 大腿杆 | 小腿杆 | 电动缸 |
|-------------------------------|-------|---------|---------|-------|-------|
| 质量/kg | 8.933 | 2.569 | 0.60 | 0.51 | 4.05 |
| 相对位置/(%) | 45.3 | 39.3 | 50 | 50 | 50 |
| 转动惯量 /(kg·m ²) | I_x | 0.160 3 | 0.026 0 | 0.020 | 0.012 |
| | I_y | 0.163 7 | 0.025 8 | | |
| | I_z | 0.031 1 | 0.003 2 | | |

2.2 控制模型建立

在套装机器人行走的一个周期中,可以分为抬腿和腿放下两个阶段。在向上抬腿的过程中,驱动电机克服重力做功,而重力的作用线与大腿轴线方向的夹角是随着时间变化的,即作用于电机的重力负载是变化的;在腿放下过程中,重力变为驱动力。由此可见,套装机器人的负载存在着严重的非线性。为了获得较好的控制效果,本研究采用 PD 控制器。

控制系统总体方框图如图 4 所示,通过给定轨迹与反馈轨迹的偏差实现对套装式助力机器人的位置控制。其中 PI 控制器为速度环的控制器,PD 控制器为位置环的控制器。给定信号为关节转角 θ_r ,电机输出的力矩 T_m 驱动髋关节和膝关节的丝杠螺母机构,通过编码器反馈得到关节转角的位置信号 θ_p ,将其与给定信号进行比较,得到偏差信号 θ_e ,通过 PD 控制器产生电机的速度指令 ω_r ,通过速度环 PD 控制器调节电机转速 ω_p ,最终使位置偏差 θ_e 逐渐趋近于 0。

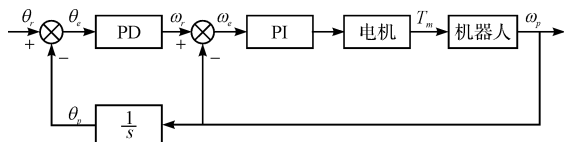


图 4 控制系统总体方框图

在本研究中,套装式助力机器人的驱动机构的电机选择 SYX 系列稀土永磁直流伺服电机,型号为 50SYX05。新宽 SYX 系列电机具有普通直流电机连续运行性与伺服电机高精度控制性,它还具有过载能力强,低输出大扭矩,低速性能好,快速响应好的特性。电机参数为力矩常数 $C_m = 0.030 2$,电流常数 $C_e = 0.030 2$, $R_a = 0.317$, $L_a = 0.000 082 3$, $B_e = 0.000 108$, $J_e = 0.000 013 8$,电机的额定转速为 2 000 r/min。

3 控制仿真

套装式助力机器人的两个驱动机构所带的负载是不同的,髋关节驱动电机所带负载较大,而膝关节所带负载较小。下面分别对这两个控制系统进行仿真。

3.1 髋关节位置控制

髋关节位置控制系统构成如图 4 所示。给定信号为阶跃信号,髋关节位置控制的参数为:速度环 PI 控制器 $k_p = 0.2, k_i = 145$;位置环 PD 控制器 $k_p = 40, k_d = 0.025$ 。髋关节初始位置为 16° 时,阶跃响应曲线如图 5 所示,从图中可以看出响应时间约为 0.1 s,无超调。机器人的髋关节在一个周期内的平均速度约为 $27^\circ/s$,匀速状态下髋关节转过 5° 所需的时间约为 0.18 s,而此时髋关节转过 5° 的响应时间为 0.1 s,所以在这个位置时,这组 PD 控制参数满足要求。

在同一组控制参数下,当初始位置为 0° 时,阶跃响应如图 6 所示。由图中可看出响应时间约为 0.2 s,响应时间与设计要求的响应时间基本相等,满足了设计要求。但是与图 5 的曲线相比,响应时间变长。分析其原因是因为在这个初始位置时,重力产生的阻力为行走周期中变化最大的,驱动电机克服较大的阻力,从而使响应时间变长。

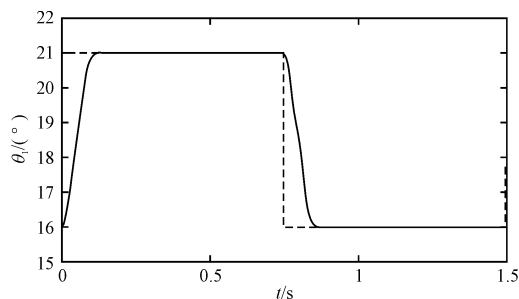


图 5 初始位置为 16° 时大腿杆响应曲线

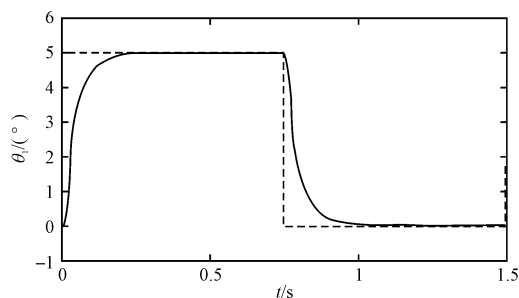


图 6 初始位置为 0° 时大腿杆响应曲线

当初始位置为 24° 时,阶跃响应如图 7 所示。从图中可以看出响应时间约为 0.1 s,超调量为 1.8%。

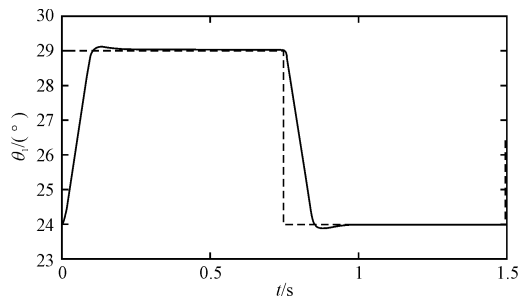


图 7 初始位置为 24° 时大腿杆响应曲线

以上笔者分析了在3个典型初始位置下髋关节的位置阶跃响应,从分析结果可以看出,由于重力的影响,在不同位置时阶跃响应有所不同,但本研究设计的PD控制器在这些位置下均能满足设计要求。

3.2 膝关节位置控制

膝关节位置控制采用图4给出的控制方框图。给定信号为阶跃信号,选择控制器参数为:速度环PI控制器 $k_p = 0.2, k_i = 145$;位置环PD控制器 $k_p = 100, k_d = 0.005$ 。仿真结果如图8所示,图8为初始位置 5° 时,机器人的小腿杆绕着膝关节顺时针转过 5° 后又回到初始位置的响应曲线,从图中可以看出,响应时间为 0.05 s ,响应速度较快并且无超调。机器人的膝关节在高速状态下的平均速度约 $55^\circ/\text{s}$,所以膝关节转过 5° 的响应时间约为 0.09 s ,而此时膝关节转过 5° 的响应时间约为 0.05 s ,因而这组PD控制参数满足要求。

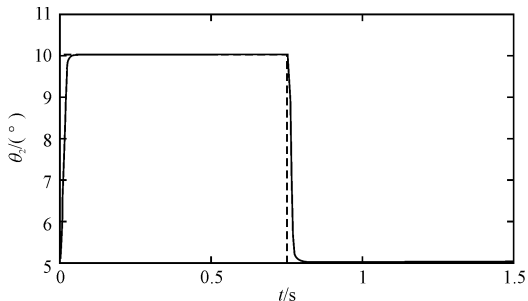


图8 初始位置为 5° 时小腿杆响应曲线

3.3 机器人空载时的轨迹控制

机器人轨迹控制时,给定信号选用作者通过实验获得的髋关节、膝关节轨迹^[12],控制系统结构如图4所示。由于在机器人髋关节和膝关节的驱动电机之间存在耦合,所以两个关节的联合控制与单关节控制的控制器参数有所不同。通过仿真调试,本研究选择控制参数为:髋关节位置环控制器 $k_p = 95, k_d = 0.0142$;膝关节位置环控制器 $k_p = 125, k_d = 0.012$;各关节速度环控制器参数不变。仿真结果如图9~图12所示。

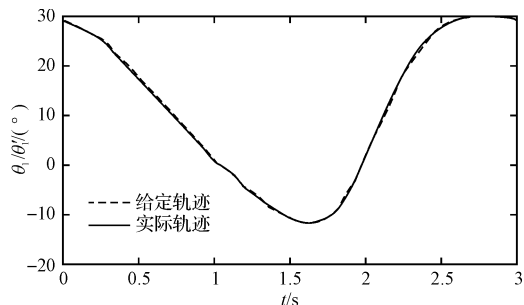


图9 髋关节的给定轨迹与跟踪曲线

中虚线为给定的髋关节轨迹,实线为髋关节的实际运动轨迹。髋关节的误差曲线如图10所示,从图中可以看出最大误差出现在转速较高的时候,约为 0.73° ,满足控制性能要求。

膝关节轨迹控制响应曲线如图11所示,其中虚线为给定的轨迹,实线为关节实际运动轨迹。膝关节的误差曲线如图12所示,从图中可以看出最大误差出现在转速较高的时候,约为 0.79° ,满足要求。

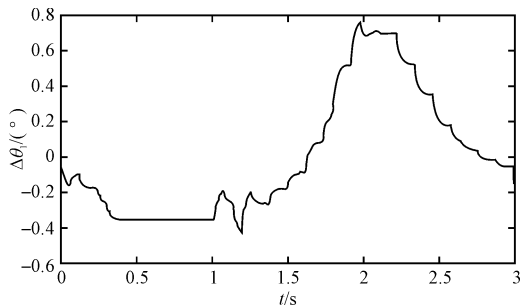


图10 髋关节的误差曲线

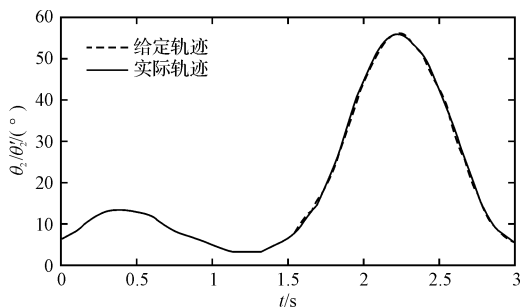


图11 膝关节的给定轨迹与跟踪曲线

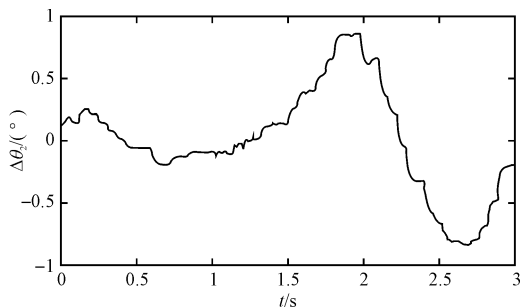


图12 膝关节的误差曲线

由响应曲线结果可知,套装式助力机器人空载时PD控制器的控制效果较好,满足控制要求。

3.4 机器人带负载时的轨迹控制

将人体下肢的重量和转动惯量施加在机器人大腿杆和小腿杆上,进行机器人的带负载轨迹控制。由于套装式机器人的应用对象是老人或行走能力弱的患者,机器人提供的是人体行走动力的一部分,所以在仿真中使用的是70%人体下肢的重量和转动惯量,机器人模型与空载轨迹控制的相同,给定轨迹和控制器参

机器人髋关节轨迹控制响应曲线如图9所示,其

数也相同。

机器人带负载时,髋关节和膝关节的误差曲线如图 13、图 14 所示,其中髋关节和膝关节的给定轨迹如图 9 和图 11 中的实线轨迹所示。与空载时机器人的误差曲线相比,最大误差基本相等,满足控制要求。

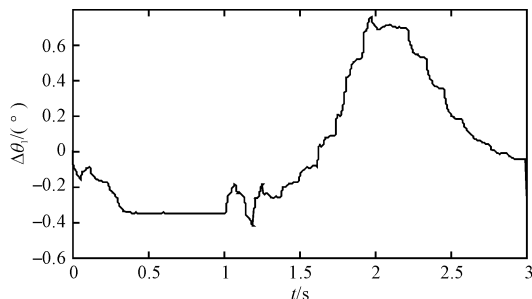


图 13 带负载时髋关节的误差曲线

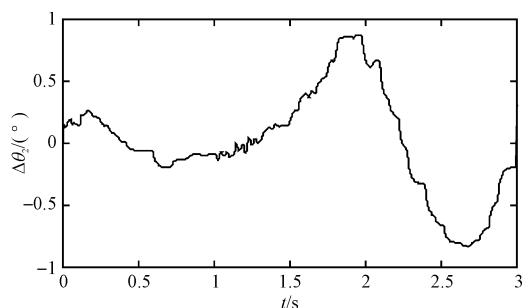


图 14 带负载时膝关节的误差曲线

4 结束语

笔者研究了一种下肢助力机器人—套装式助力机器人,它可以帮助老年人或者下肢功能障碍患者行走。机器人左右对称,每条腿的髋关节和膝关节采用直流电机驱动丝杠螺母机构的电动缸实现运动,踝关节在本研究中设计为具有一定阻尼的被动关节,在髋关节其它方向上有少量的柔顺。

本研究基于 Matlab/Simulink 和 SimMechanics 建立了套装式助力机器人的动力学模型,通过仿真得到机构所需驱动力和驱动速度曲线。分析了机器人和人体下肢的参数,建立了机器人控制模型,进行了机器人单关节阶跃响应仿真、空载轨迹仿真和带负载轨迹仿真。仿真结果表明所设计的机器人满足性能指标要求。

参考文献 (References):

[1] PENNYCOTT A, HUNT K J, JACK L P, et al. Estimation

and volitional feedback control of active work rate during robot-assisted gait[J]. **Control Engineering Practice**,2009, 17(2):322-328.

[2] MUSCATO G, SPAMPINATO G. Kinematical model and control architecture for a human inspired five DOF robotic leg[J]. **Mechatronics**,2007,17(2):45-63.

[3] ZOISS A, KAZEROONI H, CHU A. On the Mechanical Design of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX) [C]//IEEE/RSJ IROS 2005. Canada: [s. n.], 2005: 3465-3472.

[4] KAZEROONI H. Exoskeletons for Human Power Augmentation[C]//2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Canada: [s. n.], 2005: 3120-3125.

[5] HAYASHI T, KAWAMOTO H, SANKAI Y. Control method of robot suit HAL working as Operator's muscle using biological and dynamical information[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Canada: [s. n.], 2005: 3455-3460.

[6] KAWAMOTO H, SANKAI Y. Power Assist System HAL-3 for Gait Disorder Person [C]//ICHP 2002. London: Springer-Verlag, 2002: 196-203.

[7] 吴宝元,余永,许德章,等.可穿戴式下肢助力机器人运动学分析与仿真[J]. **机械科学与技术**,2007,26(2):235-240.

[8] CHEN Feng, YU Yong, GE Yun-jian, et al. WPAL for enhancing human strength and endurance during walking [C]//IEEE International Conference on Information Acquisition 2007. Korea: [s. n.], 2007: 487-491.

[9] 程方,王人成,贾晓红,等.减重步行康复训练机器人研究进展[J]. **康复医学工程**,2008,23(4):366-368.

[10] WANG Qi-yuan, QIAN Jin-wu, ZHANG Ya-nan, et al. Gait Trajectory Planning and Simulation for the Powered Gait Orthosis[C]//Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Sanya: [s. n.], 2007: 1693-1697.

[11] 郑秀媛. **现代运动生物力学**[M]. 北京:国防工业出版社,2002.

[12] 王岚,王婷,王劲松,等.人体步态规律测量分析与研究[J]. **哈尔滨工程大学学报**,2008,29(6):589-593.

[编辑:张翔]