

文章编号: 1673-1522 (2007) 04-0467-04

能量辅助骨骼服 NAEIES 的开发

归丽华^{1a, 2}, 杨智勇^{1a, 1c}, 顾文锦^{1b}, 张远山³, 杨秀霞^{1b}

(1. 海军航空工程学院 a. 研究生管理大队; b. 控制工程系; c. 七系, 山东 烟台 264001;

2. 总后勤部华东军用物资采购局, 上海 200000; 3. 山东工商学院信息与电子学院, 山东 烟台 264005)

摘要: 骨骼服是一种辅助人承受负载, 有效增强人的负重能力, 并帮助人们在各种地形条件下行走, 结合了人的智能和机械动力装置的机械能量的一种人机结合的机器人。文章介绍了海军航空工程学院开发的能量辅助骨骼服 (NAEIES) 的系统组成及工作原理。NAEIES 采用上肢控制下肢的原理, 通过测量上肢的运动信息, 控制下肢膝关节的运动, 而下肢髋关节的运动则通过气弹簧来巧妙地实现, 良好的实现了骨骼服在承载的同时, 跟踪人的行走步态。

关键词: 能量辅助; 人机结合; 骨骼服; 机器人; 外骨骼

中图分类号: TP273

文献标志码: A

0 引言

现代机器人所具有的机械动力装置使得机器人可以轻易地完成很多艰苦的任务, 比如举起、搬运沉重的负载等。虽然现代机器人控制技术有了长足的发展, 但还达不到人的智力水平, 包括决策能力和对环境的感知能力。与此同时, 人类所具有的智能是任何生物和机械装置所无法比拟的, 人所能完成的任务不受人的智能的约束, 而仅受人的体能的限制。因此, 将人的智能与机器人所具有的强大的机械能量结合起来, 综合为一个系统, 将会带来前所未有的变化, 这便是外骨骼机器人的设计思想^[1]。

外骨骼机器人是一种和人紧密联系的人机结合的机械动力系统, 它具有两条和人腿类似的机械腿, 通过脚部、腰部或腿部等部位和人紧密结合在一起, 机械腿用来承担人所背负的所有负荷, 人作为整个系统的控制中枢, 控制外骨骼腿的行走方向和速度, 外骨骼腿中具有多个传感器, 能够感受人的运动信息, 通过智能算法判别人的运动意识, 同时控制外骨骼腿的各个关节进行相应的转动, 从而跟随人的运动。

外骨骼机器人的应用范围十分广泛:

1) 在军事领域, 它可以用于增加士兵的负重能

力, 提高士兵的行走速度和耐久力, 大大提高部队的战斗力;

2) 在民用领域可以广泛应用于登山、旅游、消防、救灾等需要背负沉重的物资、装备, 而车辆又无法行驶的场所;

3) 外骨骼机器人稍加改造, 还可以用于辅助残疾人、老年人及下肢肌无力患者行走, 也可以帮助他们进行强迫性运动康复等。

1 相关研究

对外骨骼系统的最早研究始于 19 世纪 60 年代^[2], 根据应用范围不同可以分为两类: 一类用于辅助老年人或残疾人行走; 一类是帮助携带大量负荷的人进行长距离的行走。

目前, 最成功的用于辅助残疾人行走的外骨骼是日本筑波大学 Cybernics 实验室的科学家和工程师们研制出的世界上第一种商业外骨骼机器人 Hybrid Assistive Leg (HAL)。这种装置能帮助残疾人以 4 km/h 的速度行走, 毫不费力地爬楼梯^[3-5]。

HAL 采用肌电传感器来辨识人的运动意识, 肌电原始信号被处理为肌肉的“兴奋度”。而肌肉屈肌和伸肌所施加的力矩的估计值可以表示为“兴奋度”的线性函数。因此, HAL 所要产生的辅助力矩可以

收稿日期: 2007-04-20

基金项目: 中国博士后科学基金资助 (20060400293)

作者简介: 归丽华 (1975-), 女, 博士生; 顾文锦 (1938-), 男, 教授, 博导, 大学。

表示为肌肉屈肌和伸肌力矩的线性函数^[4, 5]。HAL 的最大缺点体现在机电传感器上, 由于机电传感器使用肌电贴片贴于人体肌肉上面, 受到很多因素的影响: ① 在激烈运动下, 容易脱落、易位; ② 长时间运动后, 人体出汗会影响传感器的测量; ③ 传感器随人的个体不同, 存在一定的差异; ④ 传感器每次都要贴到人体表面, 使用不便。这些缺点使得这种控制方法很不适用。

后一种类型的外骨骼用于辅助人负重, 与没有穿戴外骨骼的人相比, 在人感到疲劳之前, 穿戴外骨骼的人可以携带更多的负重, 可以走得更远。这类外骨骼系统中最早的就是 1960 年美国通用电气公司和美国陆军联合发展一种称为“强人”(Hardiman) 的外骨骼。它以主从控制方式运行, 使用电机驱动方式, 可以像举起 10 磅那样来举起 250 磅的重物。但是, 由于技术的限制, Hardiman 只实现了一只手臂的控制, 慢慢停止了发展。

近年来美国的“国防远景研究计划署”(DARPA) 又斥巨资在加利福尼亚大学伯克利分校研制成功了一种可以绑缚在士兵腿上的“伯克利末端外骨骼”(BLEEX)^[2, 6], BLEEX 包括可以固定在使用者脚上和腰部的两条机械腿架, 以及用来承载重物的背包式外架和动力设备等。在该装置中总共有 40 多个传感器以及液压关节, 它们组成了一个类似人类神经系统的局域网。一些传感器安装在鞋垫中, 它们会将信息传给电脑, 并根据使用者的动作计算出所需的力量分配, 然后调节仿生机械腿, 将重量合理分配到一对合成金属制成的不锈钢钢架结构上, 从而使佩带者的负荷达到最少。

本文设计了一个简单的骨骼服原型机, 它由两个电机驱动两个膝关节, 通过气弹簧巧妙地实现了承载和髋关节的转动。

2 系统组成

骨骼服的总体结构如图 1 所示, 其主要部件包括: 控制器、角度传感器、锂电池、驱动器、编码器以及电机。辅助机械部件有气弹簧、铝型材支架、背包等。其中, 控制器为一个笔记本电脑, 安装在铝型材支架上的一个包内, 可以随时拆卸。背包支架由铝型材制成, 除了可以安装控制器外, 还可以承载背包及负载。并且在支架下面, 臀部后面安装电机驱动器及电池(锂电池组)。在支架两侧还安装有两个角度传感器, 通过绑带和连杆与前臂相连,

用于测量前臂的旋转角度。髋关节处不加驱动, 但是具有两个自由度: 屈伸和外翻及内展。膝关节处安装一个电动机, 用于驱动膝关节旋转。大腿及小腿均由铝型材制成。在支架后部及小腿中部之间安装一个气弹簧, 气弹簧的作用将在第三部分阐述。踝关节处不加驱动, 但是也具有 3 个旋转自由度: 屈伸、外翻及内展和旋转。



图 1 单兵负重外骨骼机器人组成示意图

骨骼服采用上肢控制下肢的原理, 其工作原理如图 2 所示。当操作者行走时, 操作者前臂带动角度传感器旋转, 角度传感器电压发生变化, 电机驱动器采集到这个信号, 并通过 RS232 串行总线将这个信号传送到控制器中, 控制器通过控制算法, 输出信号控制膝关节电机旋转。

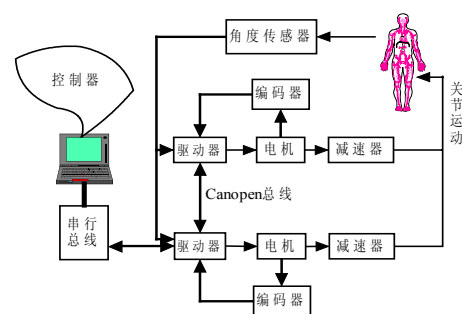


图 2 单兵负重外骨骼机器人工作原理图

3 控制方法

人在行走时, 上臂和膝关节具有相似的运动轨迹, 因此, 只要测量出上臂的运动, 再控制外骨骼膝关节跟随上臂的运动就可以达到外骨骼和人同步行走。而髋关节的控制则通过一个巧妙的机械装置来实现, 下面将详细阐述。

NAEIES 的膝关节、髋关节和气弹簧及关节之间

的连杆构成了一个五边形, 如图 3 所示。这个五边形可以绘成图 4。



图 3 外骨骼膝关节、髋关节和气弹簧等构成的五边形

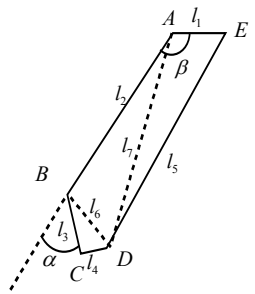
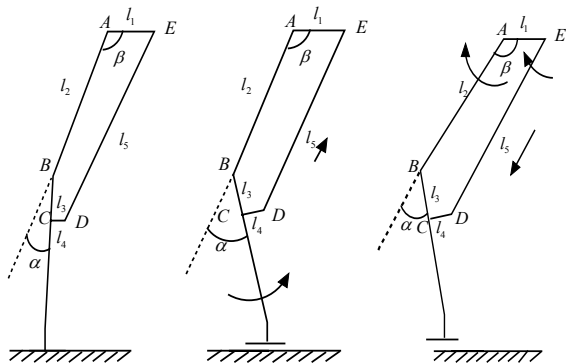


图 4 图 3 中五边形示意图

图 4 中 A 点表示髋关节; B 点表示膝关节; C、D、E 为几个辅助点, C 点不可以转动, D 点和 E 点处没有驱动, 但是可以自由转动; AB 表示大腿

$$\begin{aligned} \angle CBD &= \arctan \frac{l_4}{l_3}, \quad l_7 = \sqrt{l_2^2 + l_3^2 - 2l_2l_3 \cos \angle ABD} = \sqrt{l_2^2 + l_3^2 + 2l_2l_3 \cos(\angle CBD + \theta_1)}, \\ \angle BAD &= \arcsin \left(\frac{l_6}{l_7} \sin(\angle CBD + \theta_1) \right), \quad \angle EAD = \arccos \frac{l_1^2 + l_7^2 - l_5^2}{2l_1l_7}, \quad \beta = \angle BAD + \angle EAD, \\ \theta_2 &= \arcsin \left(\frac{\sqrt{l_3^2 + l_4^2}}{\sqrt{l_2^2 + l_3^2 + 2l_2l_3 \cos \left(\arctan \frac{l_4}{l_3} + \theta_1 \right)}} \sin \left(\arctan \frac{l_4}{l_3} + \theta_1 \right) \right) + \arccos \frac{l_1^2 + \sqrt{l_2^2 + l_3^2 + 2l_2l_3 \cos \left(\arctan \frac{l_4}{l_3} + \theta_1 \right)^2} - l_5^2}{2l_1 \sqrt{l_2^2 + l_3^2 + 2l_2l_3 \cos \left(\arctan \frac{l_4}{l_3} + \theta_1 \right)}} - \frac{\pi}{2}. \end{aligned}$$



a) 初始状态 b) 行走时膝关节的运动 c) 行走时髋关节的运动

图 5 行走原理分解图

连杆; BC 表示小腿连杆的上半部分; CD 为一个辅助连杆, 同时 BC 和 CD 是固定的垂直关系; DE 表示气弹簧, 气弹簧可以伸缩; EA 为辅助连杆。EA、AB、BC、CD、DE 的长度分别为 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 、 l_5 , 并定义 BD 和 AE 的长度分别为 l_6 和 l_7 。

NAEIES 的行走过程可以通过图 5 来分析。定义膝关节角度为 $\theta_1 = \alpha$, 定义 AE 和 AB 之间的夹角为 β , 则髋关节与躯干之间的夹角为 $\theta_2 = \beta - \pi/2$ 。初始状态如图 5 a) 所示, 机器人处于静止状态, 当人抬腿走动时, 受力如图 5 b) 所示, 随着腿的抬起, α 角度增大, 若 AE、AB 不运动, 则由于 l_4 是固定的, 就会对 l_5 施加向上的力, 由于 l_5 是气弹簧, 对其的压缩会使气弹簧收缩并储存部分机械能, 随着气弹簧收缩的增加, 气弹簧储存的力也增加, 而 A 点和 E 点可以自由转动, 且 α 角不受气弹簧的影响, 则在气弹簧压力作用下整套装置就会绕 A 点和 E 点顺时针转动, 如图 5 c) 所示, 这样就实现了在控制外骨骼膝关节转动角度的同时, 控制了外骨骼髋关节的转动。由于 $l_1 \sim l_5$ 已知, $\angle BCD = \pi/2$, 所以髋关节角度和膝关节角度之间的关系可以通过几何关系导出。如下式所示。

气弹簧在实现髋关节的旋转的同时, 也起到了支撑负载的作用, 如果没有气弹簧, 因为髋关节处不加驱动, 则背包等负荷会绕髋关节产生一个旋转力矩, 这个力矩需要人来克服, 就使人感到沉重, 外骨骼也就失去了承载的目的。而有了气弹簧, 则选择合适的气弹簧可以使气弹簧在静止状态时就被负荷压缩, 产生反作用力撑起负荷, 在行走时, 这个压缩力又可以被释放, 推动髋关节转动。

4 结语

本文介绍了能量辅助骨骼服 NAEIES 原型机的

设计原理,目前可以达到的负重能力为15 kg,锂电池组可供系统工作2 h。系统中虽然仅在膝关节处使用了两个电机,但是通过巧妙的气弹簧的应用,不仅解决了负荷支撑问题,而且实现了髌关节的运动,使得骨骼服在承受负荷的同时能良好的跟踪人的步态。

参考文献:

- [1] YANG CANJUN, NIU BIN, CHEN YING. Adaptive Neuro-Fuzzy Control Based Development of a Wearable Exoskeleton Leg for Human Walking Power Augmentation[C]//Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Monterey, California, USA, 2005:467-472.
- [2] ANDREW CHU, KAZEROONI H, ADAM B ZOSS. On the Biomechanical Design of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX)[C]//Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Barcelona, Spain, 2005:4345-4352.
- [3] OKAMURA J, TANAKA H, SANKAI Y. EMG-based Prototype Powered Assistive system for Walking Aid[C]//Proceedings of Asian Symposium on Industrial Automation and Robotics (ASIAR'99). Bangkok, Thailand, 1999:229-234.
- [4] LEE S, SANKAI Y. Power Assist Control for Walking Aid with HAL-3 Based on EMG and Impedance Adjustment around Knee Joint[C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conf on Intelligent Robots and Systems (IROS 2002). EPFL, Switzerland, 2002: 1499-1504.
- [5] LEE S, SANKAI Y. Power assist control for leg with hal-3 based on virtual torque and impedance adjustment[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC). Hammamet, Tunisia, 2002.
- [6] KAZEROONI H, HUANG L H, STEGER R. On the Control of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX)[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2005). Barcelona, Spain, 2005:4353-4360.

Development of Power Assistance Exoskeleton Suit (NAEIES)

GUI Li-hua^{1a, 2}, YANG Zhi-yong^{1a, 1c}, GU Wen-jin^{1b}, ZHANG Yuan-shan³, YANG Xiu-xia^{1b}

(1. Naval Aeronautical Engineering Institute a. Graduate Students' Brigade;

b. Department of Control Engineering; c. №7 Department, Yantai Shandong 264001, China;

2. Huadong Military Materials Purchase Bureau of General Logistics Department, Shanghai, 200000, China;

3. College of Information and Electronics, Shandong Institute of Business and Technology,
Yantai Shandong 264005, China)

Abstract: Exoskeleton Suit (NAEIES) is a kind of human-machine robot that combines the human's intelligence with the powerful energy of mechanism. It can help people to carry heavy load, walking on kinds of terrains. A prototype of NAEIES is proposed in this paper. The operator controls NAEIES. When the operator wants to walk, he swings his arm, and then the motion of the arm is measured by the potentiometer instrumented on the arm. The microcontroller controls the knee joint to rotate using the signal gets from the potentiometer. A mechanism composed of gas spring makes the hip joint rotate as the knee joint move, and as a result the NAEIES matching the kinematics of the human as well as carrying the load.

Key words: power assist; human-machine; exoskeleton suit; robot; exoskeleton