

套索驱动细长机器人的初步设计与试验*

陈 林, 奚如如, 王兴松*

(东南大学 机械工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要:为了解决在地震后废墟内部搜救幸存者的问题,设计了一种细长柔软机器人。机器人采用了套索传动的方式,使机器人操作部分的尺寸和重量相对于其他搜救机器人大大减小。机器人由头部可操作部分和细长柔软身体组成,可运动的操作部分采用模块化的设计,可根据实际需要改变关节的数量。实验结果表明,机器人能初步完成搜救任务。

关键词:搜救机器人;套索传动系统;模块化关节

中图分类号:TH122;TH112;TP24

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)03-0260-05

Tendon-sheath actuated long and slender robot: preliminary design and performance

CHEN Lin, XI Ru-ru, WANG Xing-song

(College of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: In order to solve the problem of search and rescue the victims under debris, a novel designed long and slender robot was introduced. With tendon-sheath transmission mechanism, actuators and joints were separated, thus the work part of the robot is lightweight and has a small size. The robot was mainly composed of a steering head and a long and slender body. The steering head was modular designed and the number of its joints can be changed quickly according to the needs. The experiment results validate its effectiveness.

Key words: search and rescue robot; tendon-sheath transmission mechanism; modular joints

0 引 言

自古以来人类的生命就一直遭受着自然灾害的威胁。2008 年在我国四川汶川发生的大地震夺去了超过 7 万人的生命。灾难后的现场环境比较复杂,受高温、有毒气体以及狭小空间的限制,搜救人员和搜救犬无法进入废墟内部来进行搜救。有相当一部分遇难者是由于被困在废墟里没有得到及时的救助而死亡的。研制可以在废墟内部进行搜救的机器人对于提高灾后受困人员的存活率具有重要的意义。

目前灾后搜救机器人的研究大多是针对废墟表面的,应用于废墟内部的搜救机器人研究目前开展的还不多。日本有学者展开了相关的研究,一种是和机器

蛇类似^[1-2],也有采用气动驱动方式的^[3-5]。但是他们的机器人目前还存在着一些问题。在实际的灾后现场,大部分的废墟空间直径只有 10 cm 左右^[6]。由于机器蛇的关节和身体上安装了电机、驱动器以及控制器等装置,机器蛇的尺寸比较大,进入狭小的空间比较困难。而且机器蛇一般采用无线遥控,通讯发生故障后,需要保险绳来收回机器人。采用气动控制的柔软机器人直径比较小,但是前面的摄像头无法控制,不能调整姿态。

本研究设计了一种用于搜救和检测的细长柔软机器人,头部具有运动可控的操作部分,中间具有柔软细长的身体,驱动部分安装在基座中。机器人工作示意图如图 1 所示。机器人工作时,基座不进入废墟的内

收稿日期:2010-11-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50875044);江苏省自然科学基金资助项目(BK2008310)

作者简介:陈 林(1984-),男,江苏启东人,博士研究生,主要从事套索驱动机器人方面的研究. E-mail: adolfwood@hotmail.com

通信联系人:王兴松,男,教授,博士生导师. E-mail: xswang@seu.edu.cn

部。采用套索传动方式,将电机、驱动器以及控制器和机器人关节分开,减小了机器人用于检测和搜救部分的尺寸和重量。模块化设计的关节可以根据环境的不同安装成可运动的操作部分。操作人员手动将机器人送入废墟内部,通过安装于机器人头部的摄像头提供的视觉反馈来寻找被困者和确定机器人的前进方向。

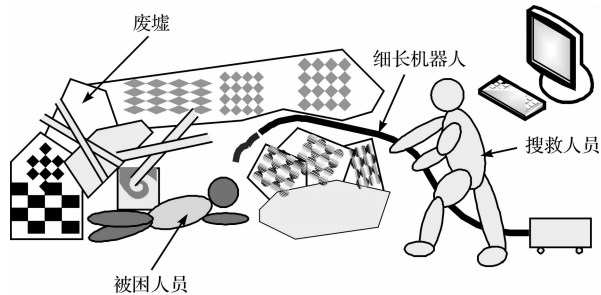


图1 细长柔软搜救机器人工作示意图

1 机器人设计

1.1 套索传动原理

套索是可弯曲且具有可相对运动硬套的钢索,自行车上的刹车线是其最常见的应用。套索传动和常见的钢索传动方式是不一样的,钢索传动时,每改变一次方向需要一个滑轮过渡,而套索传动时则只需在两端输入端设置滑轮而不需要在传动路径中间设置滑轮。在多关节机器人的设计中将会使关节结构变的更为简单小巧^[7-8]。钢索将驱动力传输到运动端,外面的柔软套管为钢索提供运动的路径。因为柔软套管的形状可以改变,传动的路径也是可以变化的。

常用的套索传动方式有两种,单套索驱动方式(如图2所示)和双套索驱动方式(如图3所示)。单套索一般用来实现直线运动,而双套索用来实现回转运动。在单套索驱动的方式中,驱动端只能提供一个方向的运动而另一个方向则由弹簧提供。输出端的线性位移 s 和输入端的转动角度 θ 有这样的关系: $s = r\theta$ 。双套索传动时,为了保证运动范围和运动均匀,两根索的两端固定在同一点并且预紧, L_1 和 L_2 保持平行, R_1 和 R_2 保持平行。两端的运动则存在着以下关系: $r_1\theta_1 = r_2\theta_2$ 。

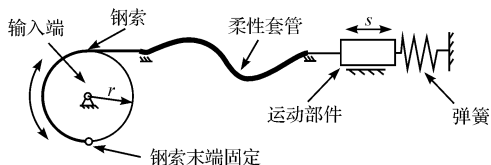


图2 单套索驱动

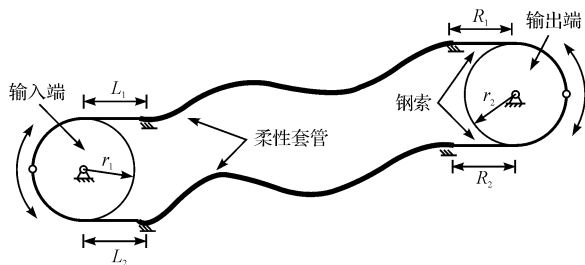


图3 双套索驱动

本研究设计的套索使用的钢索直径为 0.8 mm,套管是由直径 0.5 mm 的钢丝绕成的外径为 2.2 mm 拉伸弹簧,套管柔软可以弯曲,但是在轴向有一定刚度。

1.2 模块化关节设计

1.2.1 回转关节

回转关节的设计如图4所示,采用了图3中所示的原理,钢索固定在滑轮上,套管固定在连接板上(图4中只显示了对称布置的一半)。当电机带着驱动滑轮往一个方向拉紧钢索时,钢索驱动关节转动,另外一个方向的钢索则被放松。多个回转关节可以通过螺纹连接孔相互连接在一起,如图5所示,相互连接的关节可以是平行的也可以是交错 90°的。整个关节的长度为 43 mm,外径为 40 mm,中心孔的内径为 9 mm,运动的范围为 $\pm 45^\circ$ 。

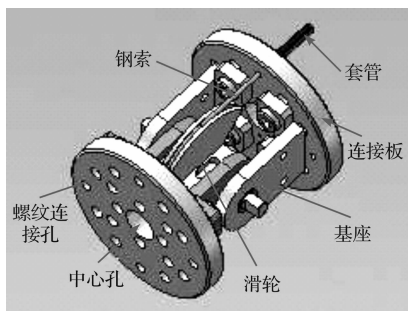
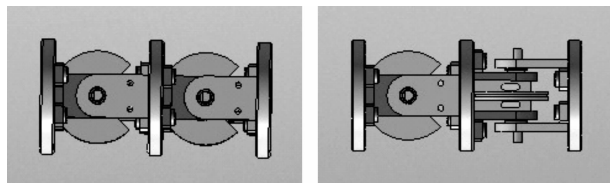


图4 回转关节结构图



(a) 回转关节平行连接 (b) 回转关节垂直连接

图5 回转关节连接图

1.2.2 直线移动关节

直线移动关节的设计如图6所示,采用了图2中所示的原理,电机带动滑轮拉动钢索时,关节随之移动,弹簧同时被压缩。当电机往相反的方向转动,钢索被放松(图6中只显示了对称布置的一半),关节在弹簧的作用下往回运动。关节的长度为 45 mm,直径

为 40 mm,中心孔为 9 mm,运动的范围为 10 mm 左右。

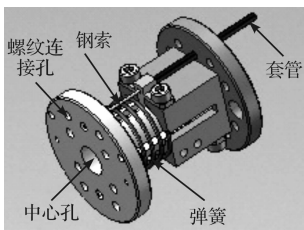


图 6 直线移动关节

1.2.3 旋转关节

旋转关节中,转轴沿着整个关节的轴向旋转(如图 7 所示)。关节也是由两根钢索来驱动的,但是在钢索的传动路径上有一对小滑轮改变方向使得套索最终能和大滑轮在轴向平行,有利于套索在关节中心通过。大小滑轮的配置类似于涡轮和蜗杆(如图 8 所示)。关节的长度为 63 mm,直径为 40 mm,中心孔为 9 mm,运动的范围为 $\pm 120^\circ$ 。

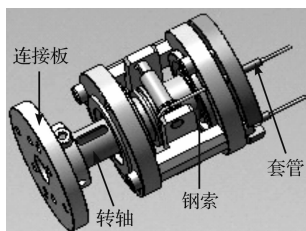


图 7 旋转关节

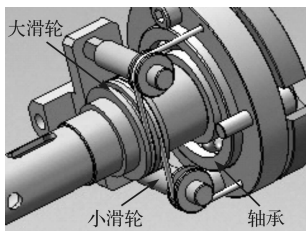


图 8 空间交错的传动路线

其他模块化连续机器人^[9-11],末端轴向姿态的调整需要多个关节相互配合才能完成,通常是多个关节一起在空间内弯曲盘旋。旋转关节就能单独实现这个功能,在狭小的空间内来调整摄像头的姿态是比较方便的。

1.2.4 二自由度关节

二自由度关节结构如图 9 所示,由 3 个锥齿轮构成的差分轮系组成,其运动原理如图 10 所示。当齿轮 1 和齿轮 2 的转向一致时,角度 θ_{21} 会发生变化, θ_{22} 保持不变;当齿轮 1 和齿轮 2 的转向相反时,角度 θ_{22} 会发生变化, θ_{21} 保持不变。

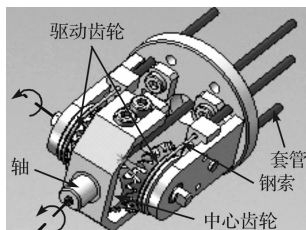


图 9 二自由度关节

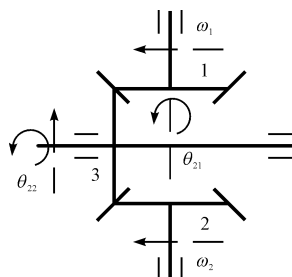


图 10 齿轮系运动原理

以上设计的所有的关节外径都是一样的,这使得关节顺序装配后机器人整体的外径保持一致,如图 14 中所示。二自由度关节安装于其他所有的关节之前,其他任意类型的两个关节都可以根据需要相互连接。各关节上的套索都从关节中心 9 mm 的通孔穿过连接到控制基座内,固定在和舵机同轴的滑轮上。

1.3 控制系统设计

和模块化关节相对应,控制系统也采用了模块化的设计方式。每一个自由度由一个舵机来控制(二自由度关节需要两个),每个舵机和一个控制单元相连,每个控制单元内部设置了一个唯一的地址。所有的控制单元的串口并联在一起和上位机通讯。上位机通过串口将包含所有地址和控制信息的数据发送到各控制单元,每个控制单元根据本机的地址来区分、接收控制信息。关节数量的变化不用修改控制单元和上位机的程序。所有的舵机和控制单元包括电源全部装于控制基座中,如图 11 所示。

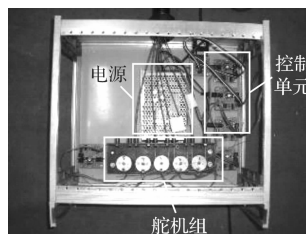


图 11 控制单元基座

操作人员手工推动机器人的前进,并根据视觉的反馈判断是否改变头部关节的方向。当机器人发现前面有障碍,需要改变前进的方向时,由操作人员在人机界面中输入合适的改变角度直至到达所需要的方向。当继续把机器人往里面送时,需要先把机器人的头部恢复到初始位置。由于套管是细长的拉伸弹簧,可以横向弯曲而在轴向不能被压缩,机器人的身体是柔性的而且具有一定刚度。当身体碰到拐弯的地方时,身体和弯角相互接触,在外界的约束力下,身体发生被动弯曲从而通过弯角。

1.4 机器人实物

装配好的搜救机器人整机的照片如图 12 所示,头部可控刚性关节上装有用于搜救的摄像头,其放大的照片如图 13 所示,中间软管为其身体,所有的套索均从其中间穿过(摄像头的电源线暂时没有放到里面)。其多个模块化关节安装在一起的照片如图 14 所示,其中两个回转关节是垂直安装的方式,最前面为单根套索驱动的微操作器,用来夹持微小物体。由图 14 可见,所有的套管和钢索都是从关节的内部通过。舵机

组和控制电路均位于基座中。操作人员通过电脑上的人机界面输入运动参数,数据通过串口传至控制单元。机器人细长部分最大处直径为 40 mm,工作部分长度为 3 m。整体的重量为 4 kg 左右(不连电脑),方便操作人员在灾难发生后第一时间携带机器人到现场。

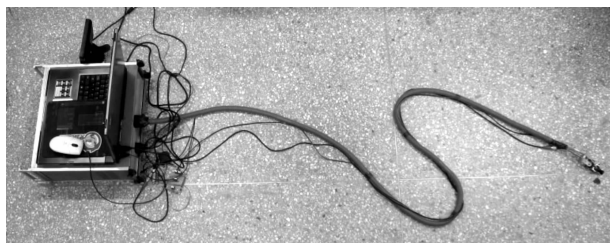


图 12 搜救机器人整机

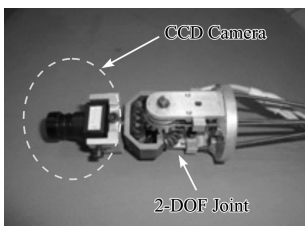


图 13 头部安装摄像头的二自由度关节

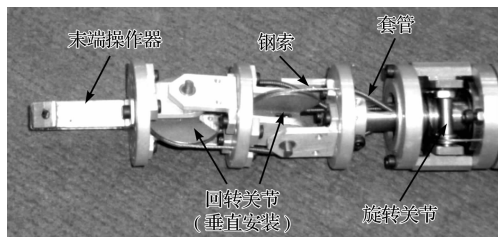


图 14 模块化关节组成的头部可控部分

2 初步搜救实验

在实验室条件下,笔者搭建了一个简单的模拟搜救环境,如图 15 所示(第 1 个图片),机器人要穿过宽为 70 mm,总长约为 0.6 m 的狭长通道来找到目标小球。整个过程中机器人需要转过约 50°和 90°的两个弯。搜救过程中机器人运动的照片如图 16 所示。

搜救时需要两个操作人员合作进行,一个操作人员推着机器人往狭长的通道里送,另外一个通过摄像头反馈的图像来确定机器人前方的环境,引导机器人的方向直至找到目标小球。由于环境比较简单,机器人头部仅由一个二自由度关节和摄像头构成(如图 13 所示)。在本次实验中,机器人顺利找到目标小球。

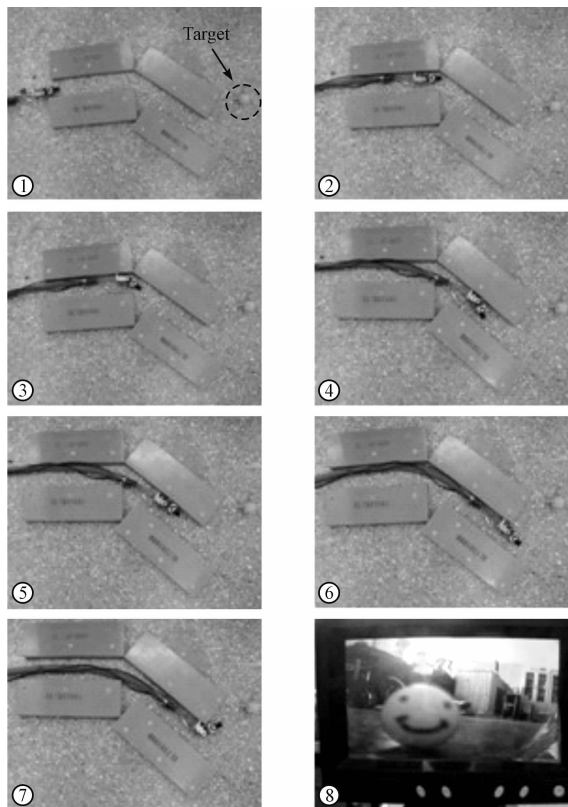


图 15 模拟搜救过程

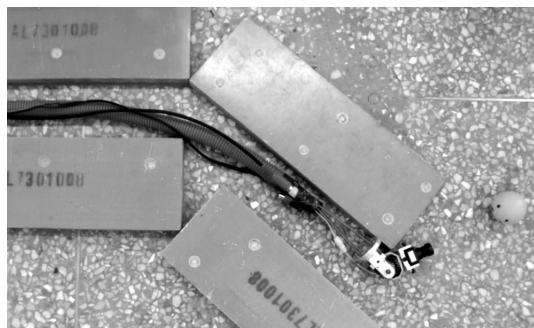


图 16 搜救过程机器人的运动

3 结束语

本研究分析了套索传动的原理和优势,根据实际灾后救援的需要,设计了细长柔软的机器人。设计了模块化的单自由度关节以及耦合的二自由度关节来组成头部的可控运动关节及其对应的控制系统。初步的实验结果表明所设计的细长柔软机器人能在简单的狭小空间环境下进行搜救。

通过改进,本机器人也能满足其他特殊环境内的检测任务,如大型桥梁、大型锅炉管道、大型电力变压器、核反应器的内部检测等。

参考文献 (References) :

[1] ARAI M, TAKAYAMA T, HIROSE S. Development of “Souryu-III” Connected Crawler Vehicle for Inspection inside Narrow and Winding Spaces [C]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Sendai: [s. n.], 2004.

[2] ARAI M, TANAKA Y, HIROSE S, et al. Development of ‘Souryu-IV’ and ‘Souryu-V’: serially connected crawler vehicles for in-Rubble searching operations [J]. **Journal of Field Robotics**, 2008, 25(1-2): 31-65.

[3] KIRYU I, TSUKAGOSHI H, KITAGAWA A. Grow-Hose-I: A Hose Type Rescue Robot Passing Smoothly through Narrow Rubble Spaces [C]//Proceeding of the 7th JFPS International Symposium on Fluid Power. Toyoma: [s. n.], 2008: 815-820.

[4] KITAGAWA A, TSUKAGOSHI H, IGARASHI M. Development of small diameter active hose-II for search and life-prolongation of victims under debris [J]. **Journal of Robotics and Mechatronics**, 2003, 15(5): 474-481.

[5] TSUKAGOSHI H, KITAGAWA A, SEGAWA M. Active Hose: an Artificial Elephant’s Nose with Maneuverability for

Rescue Operation [C]//Proceeding of 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2001: 2454-2459.

[6] HIRAYAMA A, LTO K. Development of rescue manipulator to search narrow space for victims [J]. **Artif Life Robotics**, 2008, 13(1): 331-335.

[7] PALLI G, MELCHIORRI C. Model and Control of Tendon-Sheath Transmission Systems [C]//IEEE ICRA2006, Orlando, Florida: [s. n.], 2006: 988-993.

[8] PHEE L, LOW S C, THANT Z M, et al. Robotic System for No-Scar Gastrointestinal Surgery [C]. IEEE ITAP, 2006.

[9] JONES B A, WALKER I D. Practical kinematics for real-time implementation of continuum robots [J]. **IEEE Transaction on Robotics**, 2006, 22(6): 1087-1099.

[10] CAMARILLO D B, MILNE C F, CARLSON C R, et al. Mechanics modeling of tendon-driven continuum manipulators [J]. **IEEE Transaction on Robotics**, 2008, 24(6): 1262-1273.

[11] YANG J Z, PITARCH E P, POTRATZ J, et al. Synthesis and analysis of a flexible elephant trunk robot [J]. **Advanced Robotics**, 2006, 20(6): 631-659.

[编辑:张翔]

(上接第 259 页)

(9) 仿照已有产品的设计。对于这类工作,通常采用仿型设计或反求设计等方法。目前已有专用的计算设备,用于产品零部件的仿型设计。

(10) 考虑产品维修及再制造的设计。有许多产品经过一定时间的运行以后,必须进行必要的维修,才能使产品继续工作,产品的维修与再制造,对于产品使用的经济性具有重要意义,这可使产品的有效利用时间大大延长,进而可以显著提高企业的经济效益与社会效益。所以在产品设计时,考虑产品的可维修性与再制造的方便性是十分重要的工作。

4 结束语

本研究讨论了下列几个问题:

- (1) 产品设计对产品质量、制造成本、生产周期、环境保护、售后服务等的影响;
- (2) 产品设计方法的发展趋向;
- (3) 产品的传统设计模式和现代设计模式;
- (4) 根据不同要求应该采用不同的产品设计方法。

由于产品目标存在多样性和复杂性,因而对于具体产品的设计应该结合具体情况开展,才能使产品的

研究与开发取得好的效果。

参考文献 (References) :

[1] 闻邦椿,韩清凯,姚红良.产品的结构性能及动态优化设计[M].北京:机械工业出版社,2008.

[2] 闻邦椿,周知承,韩清凯,等.现代机械产品设计在新产品开发中的重要作用—兼论面向产品总体质量的“动态优化、智能化和可视化”三化综合设计法[J].机械工程学报,2003,39(10):43-52.

[3] WEN Bang-chun, ZHANG Yi-min, HAN Qing-kai, et al. High-level design method of 1 + 3 + X for general quality of modern mechanical product [C]. Proceedings of International Conference on Mechanical Engineering and Mechanics, Nanjing. Science Press and Science Press USA Inc. ,2005.

[4] 闻邦椿.机械设计手册[M].北京:机械工业出版社,2010.

[5] 闻邦椿,刘树英,李小彭.产品的主辅功能及功能优化设计[M].北京:机械工业出版社,2008.

[6] 闻邦椿,张国忠,柳洪义.面向产品广义质量的综合设计理论与方法[M].北京:科学出版社,2006.

[7] 闻邦椿.产品全功能与全性能综合设计[M].北京:机械工业出版社,2008.

[编辑:张翔]