

# 废墟狭缝搜救机器人自动送进系统研究<sup>\*</sup>

徐 草, 章亚男<sup>\*</sup>, 沈林勇, 徐解民, 龚振邦

(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

**摘要:** 为开发一种能够在废墟狭缝中运动与探测的搜救机器人, 使之成为一种面向地震等自然灾害应用的高效救援手段, 研究了机器人柔性本体自动送进系统。针对柔性本体在废墟狭缝中的送进难题, 提出了“前拉后推”的双驱动方式, 采用了两套驱动装置, 即安装在本体头部的拉进装置和安装在本体尾部的推进装置, 研制了一种可实现柔性本体在狭小空间中自动送进的机械机构和控制系统。经样机试验表明, 该系统可较好地实现柔性本体在废墟中的自动送进, 并实现预定搜救功能。

**关键词:** 搜救机器人; 柔性本体; 送进系统

中图分类号: TH123; TP242

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2010)11-0110-05

## Automatic insertion system for a searching and rescuing robot in ruins

XV Cao, ZHANG Ya-nan, SHEN Lin-yong, XV Jie-min, GONG Zhen-bang

(School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** In order to develop a robot for searching and rescuing in cracks of ruins, and make the robot become a kind of efficient tool oriented to the disasters such as earthquakes, an automatic insertion system for the flexible robot body was investigated. A dual-drive method with a pulling device and a pushing device at both sides of the flexible tube respectively was proposed, to solve the difficulties problem of sending a flexible tube inside narrow cracks. A prototype of mechanism and control was realized for automatic insertion of flexible robot body into narrow space. Test results prove that the robot prototype can work effectively in moving through ruins and realize its rescuing function.

**Key words:** searching and rescuing robot; flexible tube; insertion system

## 0 引 言

废墟狭缝搜救机器人是一种面向地震灾难应用、能够在废墟缝隙中运动与探测、并可对废墟中的幸存者实施辅助救援的机器人系统。近年来, 地震和建筑倒塌造成人员被困于废墟之中, 成为人类所要面对的显著灾难之一, 因此废墟狭缝搜救机器人成为当今热门的研究课题<sup>[1-4]</sup>。研发出高效的废墟狭缝搜救机器人, 并使其广泛运用到灾后救援工作中, 可以降低人力物力投入, 减少救援工作中的意外伤亡, 并提高救援效率与成功率。这对提高人类自身抵抗自然灾害能力的进程具有显著的意义。

在此领域里, 国内外已出现了许多研究成果<sup>[5-10]</sup>。

其中具有代表性的有两种: 蛇形机器人和手持式生命探测仪。蛇形机器人诸如: 日本的 Hirose 教授从仿生的角度研究出的蛇形机器人 ACM-R3; 德国研制的 G-snake 蛇形机器人; 美国 Interval 研究公司的米勒研制的被机器人业界誉为最富于现实感的机器蛇 S5 Snake-robot; 以及我国国防科技大学和沈阳自动化研究所研发出的蛇形机器人。手持式生命探测仪最典型的是美国“SNAKE EYE(蛇眼)”。

以上两种技术各有所长。蛇形机器人仿照蛇的运动姿态, 利用本体的运动或装载在本体上的驱动机构实现自身送进, 驱动方式灵活, 驱动力在本体上分布均匀且效率高; 但这种驱动方式下, 本体结构复杂且体积庞大, 不适合狭小空间的应用。手持式生命探测仪体

收稿日期: 2010-06-21

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2007AA041502-6)

作者简介: 徐 草(1984-), 男, 湖北宜昌人, 主要从事智能机械与系统方面的研究. E-mail: jintian\_xc@yahoo.com.cn

通信联系人: 章亚男, 女, 副研究员, 硕士生导师. E-mail: ynzhang@shu.edu.cn

积小,深入废墟探测的本体尤其细小且实用,但其伸进废墟的过程需操作者手动,伸进距离相当有限。

废墟狭缝搜救机器人综合考虑了以上两类机器人的优缺点,提出了一种通过一套操控装置将一根管状柔性的机器人本体自动地送进废墟狭缝中完成搜救任务的机器人系统。系统保证一定的送进距离,当机器人本体伸进废墟以后不仅可实现搜寻和探测的功能,还可立即实施辅助救援。

由于废墟狭缝中的空间狭小且环境复杂,搜救机器人本体在狭小空间的送进问题是整个机器人系统研发的一大难题。本研究正是面向能使柔性机器人本体进入废墟狭缝的自动送进系统,该系统采用两套机构:一个置于废墟之外,在本体尾部可对本体实现“推进”,被称作“尾部推进机构”;另一个置于本体之上且可沿本体前后移动,工作时置于本体头部可对本体实现“拉进”,被称作“头部拉进机构”。两套机构配合使用,从而以“前拉后推”的方式实现机器人柔性本体的长距离送进功能。

1 送进机构运动原理

1.1 废墟狭缝搜救机器人总体组成

废墟狭缝搜救机器人总体组成如图 1 所示,其工作过程为:自动送进系统将柔性本体逐步送进废墟;探测头在头部偏转机构的驱动下,在废墟中探测可进路径并调整方向;由控制系统控制自动送进系统与头部偏转机构的联合工作,完成对柔性本体“停止送进—寻找路径—继续送进”的循环驱动过程;控制信号来源于探测头上的摄像头和触觉传感器等;通过光纤光栅本体形位探测传感器将本体的空间方位信息传给操作者;当探测到幸存者后,救援人员可以通过柔性本体中的供水供气系统给幸存者输送氧气、药物和液态食品,并可以通过音频对讲系统与幸存者进行对话,实时了解幸存者的状态和需要。

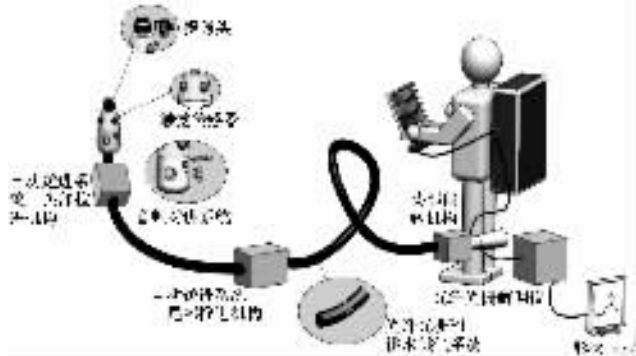


图 1 废墟狭缝搜救机器人总体原理示意图

在自动送进过程中,当本体在狭缝遇到多个转弯点,仅利用尾部推进机构推进时会发生本体卡死。这时,则需要在本体头部加一拉进力,才可使其顺利进入废墟狭缝。本研究正是对包含了尾部推进机构和头部拉进机构的自动送进系统进行研究,其组成如图 2 所示。

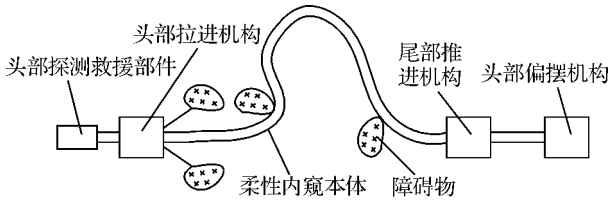


图 2 自动送进系统组成

1.2 尾部推进机构

尾部推进机构如图 3 所示。

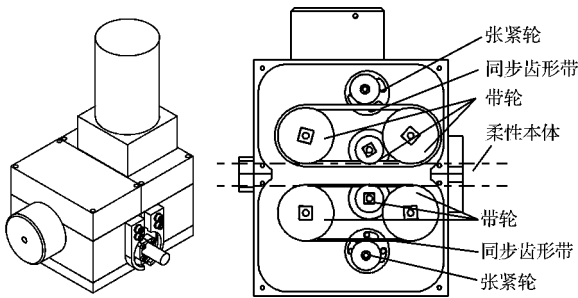


图 3 尾部推进机构结构简图

机构中采用直流电机驱动,通过由减速齿轮组构成两组相对的同步齿形带轮对,在同边的两个同步齿形带轮上套上齿形带,两个齿形带即作为用于传动的摩擦带,两者之间形成一条狭窄的路径能给柔性本体以适当的夹紧力,保证送进机构与柔性本体间的摩擦力,实现连续推进。

本机构在理想条件下直线推进本体时效果较好,但当柔性本体发生弯折之后推进效果往往大大降低。由理论分析和实验证明可知,对柔性物体其实现送进时“拉进”要比“推进”的效果好。这是由柔性体本身的力学特性所决定的:柔性体传递“拉力”的效果要比传递“压力”效果好,且柔性越强,传递“压力”的能力就越弱。尤其当柔性本体多次弯曲之后,推进就更加困难,甚至出现本体被障碍物完全卡死的“死点”状态。

1.3 头部拉进机构

为了降低或尽可能地消除“死点”对送进系统送进效果的影响,在本体前端增加了头部拉进机构,以扩展柔性本体的送进距离,提高送进系统的整体性能。

为达到上述目的,该机构采用如下方案(如图 4 所示)。

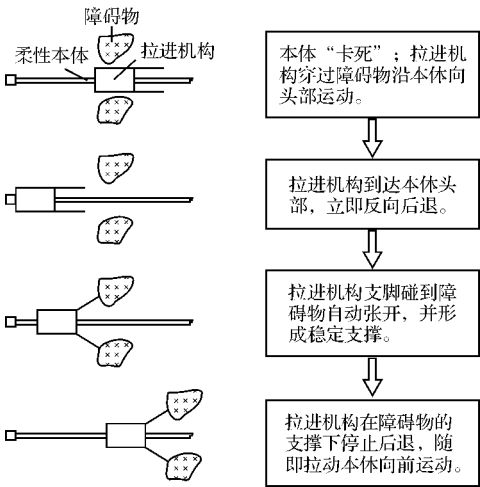


图 4 头部拉进机构工作原理图

完成上述功能的机构如图 5 所示,该机构分为两部分:驱动部分和支脚部分。两部分之间采用柔性连接,以便于柔性体转弯。

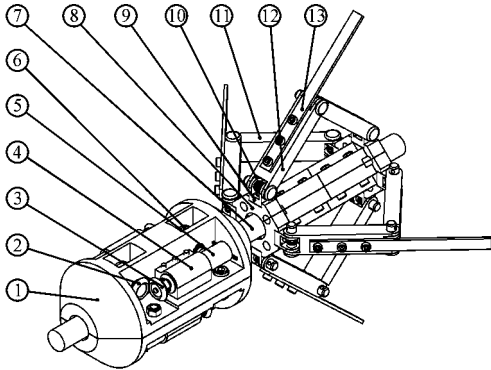


图 5 头部拉进机构结构简图

1—基座;2—齿轮轴;3—电机轴锥齿轮;4—微型高力矩直流电机;5—电机座;6—摩擦轮;7—柔性本体;8—基体;9—支架座;10—扭簧;11—后支架;12—前支架;13—伸展腿

4 个驱动小模块分装在尼龙基座上并呈对称分布,每个驱动小模块均含有一个微型高力矩电机及其固定夹座、一个电机轴锥齿轮、一个橡胶摩擦轮以及一个装在摩擦轮上并和电机轴锥齿轮啮合的齿轮轴。工作时,启动电机,电机轴转动经过齿轮组将运动和力矩传递到摩擦轮上,进而通过摩擦轮与柔性本体间的摩擦力带动本体运动。基座成两半对称,便于安装和卸载。

支架部分由 4 个相同的支脚组成,每个关节处都装有扭簧,在扭簧的力矩作用下,支脚有自动收拢复位的功能。同时在每个支脚上安装有一个延展条,以便机构在沿柔性本体后退时找到力支撑点。在本体送进过程中,如果尾部推进出现死点卡住,则头部拉进机构启动。拉进机构从柔性本体头部开始沿着柔性本体后

退,运动中支脚末端会碰到障碍物并卡住,随后支架逐渐张开,并最终形成一个稳固的支撑而停止相对于废墟的运动。之后摩擦轮继续旋转并驱动着柔性本体与拉进机构之间的相对运动,而此时拉进机构与废墟之间不再相对运动,从而实现了柔性本体相对于废墟被向前拉进,避免了死点出现。

2 样机实验研究

2.1 柔性本体送进力需求实验研究

机器人本体是一根特别定制的柔性软管,平均直径约为 14.5 mm,内含光纤光栅传感器、视频音频传输线以及供水供气管道。其表面为光滑的橡胶材质,需送进的长度为 3.5 m。在设计自动送进系统时,首先需由实验确定将本体顺利送进废墟需要多大的送进力。

柔性本体在无障碍的平地上运动时,无论地面是木质地板、水泥地或是有沙尘的土地,其受力一般很小,这部分源于本体与平地面间的摩擦力不是柔性本体送进过程中所受阻力的主要来源。在实际应用中,本体进入环境复杂的废墟中后,其所受阻力的主要来源是由障碍物构成的弯道。

设定机器人工作环境缝隙的最小缝隙为 80 mm,搭建了如图 6 所示的几个具有代表性的实验弯道模型,所搭建的障碍路径分 L 形、Z 形、M 形和几字形 4 种形状。实验步骤概括如下:首先选择本体上一个靠前端的位置用金属夹夹住,保证金属夹与本体之间不会打滑;然后借助人力将搭建障碍路径的砖头压紧地面,使处在关键点受力的几块砖头不会相对于地面打滑;最后用弹簧秤勾住金属夹,拖动本体匀速向前拉进,同时记录下弹簧秤显示的数据。

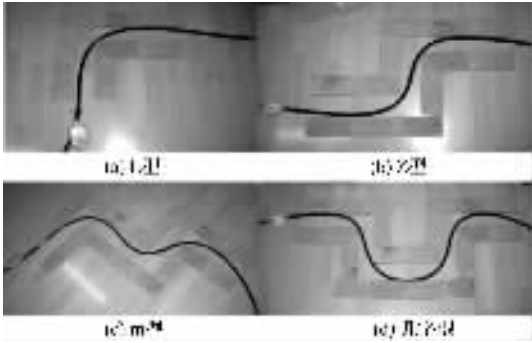


图 6 送进力需求实验研究

经多次实验,将弹簧秤测得的送进力平均值记录如表 1 所示。由此实验结果,取一定放大系数,将自动送进系统中送进力的设计指标确定为 10 kg,即约 100 N。

表 1 柔性本体所需送进力测试数据表

| 废墟形状   | L 形 | Z 形 | M 形 | 几形 |
|--------|-----|-----|-----|----|
| 送进力/kg | 0.8 | 2   | 7   | 卡死 |

2.2 尾部推进机构推进力实验研究

由系统设计过程中的理论分析与研究可知,尾部推进机构理论上可实现对柔性本体约 100 N 的推进力。实验样机制作完成后,测得尾部推进机构样机空间尺寸约为长 210 mm,宽 196 mm,高 230 mm,总重约 1.8 kg,满足了系统便携性的要求。对其推进力,笔者作了以下实验研究。

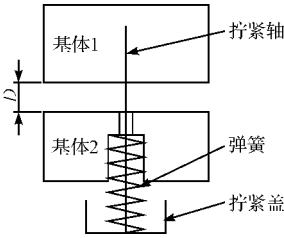


图 7 预紧力调整子机构示意图

由于机构中是采用摩擦力的形式传递推进力的,因此推进力的大小与摩擦面的正压力紧密相关。而推进机构又设置了正压力的调整机构,即预紧力调整子机构,其原理如图 7 所示。随着拧紧盖的旋进,两部分基体通过摩擦带施加在柔性本体上的正压力将越来越大,进而可产生的推进力也将越来越大。实验正是通过测试拧紧盖的累计旋进角度与产生的推进力大小之间的关系来验证其推进能力的,实验现场如图 8 所示。最终测得当拧紧盖累计旋转约 270°时,机构可获得 10 kg推进力。

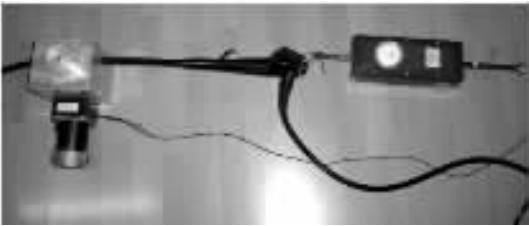


图 8 尾部推进机构推进力实验研究

2.3 头部拉进机构拉进力实验研究

头部拉进机构理论设计中通过选择高力矩电机组,从理论上实现了 100 N 的送进力,实验样机制作完成后对其进行了实验研究。首先测得头部拉进机构样机空间尺寸约为长 206 mm、直径 76 mm 的圆柱体,总重量约 0.4 kg,满足系统便携性要求。且其支脚张开/收拢时相对于柔性本体轴线的角度运动范围为 0 ~ 45°。如图 9 所示对其进行实验研究,通过调整两半基体间连接螺钉的拧紧程度,可调整摩擦轮与柔性本体

间的实际摩擦力。当螺钉拧紧至适当程度时,可获得系统所需 100 N 的送进力。



图 9 头部拉进机构拉进力实验研究

此外还对头部拉进机构进行了模拟废墟实验研究(如图 10 所示)。将其放入由木块搭建而成的模拟废墟中进行本体送进实验,测试其整体机构在模拟废墟中的实际通过性,以及支脚在模拟废墟环境中的实际伸展性。实验结果表明:由于头部拉进机构体积庞大,可顺利工作的缝隙十分有限;且在实验中还出现支脚顺利张开后由于扭簧力矩不够而无法自动收拢的情况等等。这些缺陷限制了头部拉进机构在废墟中的实际应用。因此,头部拉进机构仍需在机构尺寸及通过性上作进一步优化,才可投入实际应用。



图 10 头部拉进机构模拟废墟实验研究

2.4 机器人总体系统实地废墟实验研究

实验样机于 2009 年 9 月和 11 月两次在北京“国家地震震应急救援训练基地”的实地废墟中进行了机器人搜救演示实验,如图 11 所示。



图 11 废墟狭缝搜救机器人演示实验

操作者通过上位机控制箱对机器人本体进行操作,用摇杆控制头部偏转动作,用按钮控制本体的前进与后退以及辅助送进机构的启/停,同时 PC 屏幕上会显示出头部前方的视频信息以及头部的受力信息,还可以根据需要通过柔性本体内的专用管道向本体头部送水。利用这些操控动作,多次完成了搜寻废墟中的预定目标物的搜索任务。

### 3 结束语

本研究基于一种具有管状柔性本体的废墟狭缝搜救机器人,研究了其柔性本体的自动送进系统。该系统一方面采用了传统思路的“尾部推进”的方法,设计了尾部推进机构;另一方面又采用了一种可以前后游动于本体之上,可实现对本体循环拉进的头部拉进机构,充分利用“前端拉进”对柔性体牵引效果的优越性,弥补了推进机构对本体送进距离不足。

但本系统依然存在一些问题,主要在于头部拉进机构的结构复杂,体积庞大,不易进入狭小缝隙,且容易造成该机构在废墟中操作时易进不易出的问题。基于此,头部拉进机构的结构有待于进一步完善。

### 参考文献 (References):

- [1] YANG Zhi-xiao, ITO K, HIROTSUNE K, et al. A Mechanical Intelligence in Assisting the Navigation by a Force Feedback Steering Wheel for a Snake Rescue Robot[C]//Proceedings of the 2004 IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, Kurashiki, Okayama Japan, 2004:20-22.
- [2] BIMPAS M, NIKELLIS K, PARASKEVOPOULOS N, et al. Development and testing of a detector system for trapped hu-

mans in building ruins[C]//33rd European Microwave Conference. Munich, 2003:999-1002.

- [3] MA S, TADOKORO N, LI B, et al. Analysis of creeping locomotion of a snake robot on a slope[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2003:2073-2078.
- [4] TRANSETH A A, LEINE R I, GLOCKER C, et al. Snake robot obstacle-aided locomotion[J]. **Robotics**, 2008, 24(1):88-104.
- [5] MA S. Analysis of creeping locomotion of a snake-like robot[J]. **Adv. Robot**, 2001, 15(2):205-224.
- [6] YAMAKITA M, HASHIMOTO M, YAMADA T. Control of Locomotion and Head Configuration of 3D Snake Robot[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2003:2055-2060.
- [7] STURGES R H, LAOWATTANA S. A flexible tendon-controlled device for endoscopy[J]. **The International Journal of Robotics Research**, 1993, 12(2):121-131.
- [8] [日]宇野良治,韩英,[日]栋方昭博,等.实用大肠镜诊断及治疗学[M].北京:科学出版社,2001:31-70.
- [9] 李斌.蛇形机器人的研究及在灾难救援中的应用[J].机器人技术与运用,2003(3):22-26.
- [10] 高立明,林良明,颜国正,等.全方向蠕动机器人驱动内窥镜系统的研究[J].中国生物医学工程学报,1998,17(1):36-41.

[编辑:柴福莉]

国内邮发代号: 4-270

国外发行代号: M1227



## 微特电机

Small & Special Biomedical Machines



中国期刊方阵双月期刊  
全国优秀科技期刊  
信息产业部电子科技精品期刊  
文摘核心期刊  
中国期刊全文数据库  
中国学术期刊综合评价数据库  
来源《科学文摘》、《ISPEC》收录  
美国国际科学文摘工程技术收录

《微特电机》杂志创刊于1980年,由上海微特电机有限公司主办,是微特电机行业唯一的专业性期刊,也是国内微特电机行业唯一具有较高学术价值的期刊。该刊由国内著名微特电机专家担任编委,由上海微特电机有限公司负责编辑出版。

《微特电机》杂志创刊以来,一直秉承“立足国内,面向国际,服务行业”的宗旨,为微特电机行业提供及时、准确、权威的学术信息。同时,《微特电机》杂志也是微特电机行业的重要窗口,也是微特电机行业的重要平台。