

Research on Urban Search and Rescue Robot: Development of Amoeba II

Changlong Ye^{1,3}, Shugen Ma^{2,3}, Bin Li³

¹School of Machinery and Automobile, Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Shenyang 110034
(E-mail:clye@sia.cn)

²COE Research Institute, Ritsumeikan University, Shiga-ken 525-8577, Japan
(E-mail:shugen@fc.ritsumei.ac.jp)

³Robotics Laboratory, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016
(E-mail:libin@sia.cn)

Abstract—In order to perform the urban search and rescue task in dangerous condition, a novel robot named Amoeba II is designed based on synthesis of the snake-like robot and the tracked vehicle. It can transform its body shape to adapt to the environment. On the one hand, this robot adopts the tracked drive mechanism to acquire high performance on the climb. On the other hand, this robot is portable due to lightweight and small bulk, which benefits the quick rescue response after calamity. Amoeba II consists of two mobile units and one expanding unit. The former one is to realize the locomotion and the last one is to expand the body to adapt to the environment. The experimental results validate the capability of Amoeba II.

Keywords— snake-like robot, modular, tracked drive, rescue task

城市灾难救援机器人 USAR 的研究: 变形虫 II 的开发

叶长龙^{1,3}, 马书根^{2,3}, 李斌³

¹沈阳航空工业学院, 黄河北大街 52 号, 沈阳 110034

²日本立命馆大学 COE 研究机构 滋贺 525-8577 日本

³中国科学院沈阳自动化研究所机器人学重点实验室 沈阳 110016

摘要 为满足城市灾难后的各种勘查和救援任务的需要, 设计了城市灾难救援机器人 (USAR) ——变形虫 II。该机器人兼具蛇形机器人和履带驱动机器人的特点, 能够通过变形实现对多种环境的适应。一方面, 该机器人在驱动方式上采用履带驱动增加了机器人的越障和爬坡能力。另一方面, 该机器人体积小、质量轻、便于携带, 对于灾难过后的快速反应十分有利。在结构上, 变形虫 II 由两个运动单元和一个变形单元两部分组成, 运动单元主要完成运动任务, 变形单元驱动运动单元实现机器人的变形以适应环境。实验证明变形虫 II 具有很好的适应环境能力。

关键词 蛇形机器人, 模块化, 履带驱动, 救援任务

1. 引言

近年来频频发生的各种灾难造成了巨大的人员伤亡和

财产损失。其中有人为的恐怖事件, 例如美国的 911 事件和巴厘岛恐怖事件。也有大的自然灾害, 例如印度洋海啸、各地频频发生的地震和飓风等等。救援实践证明: 在灾难过后的 48 小时内对遇难者进行搜救, 遇难者生还的可能性非常大。当超过 48 小时后遇难者生还的机会将急速下降^[1]。

863 计划项目 (2001AA422360) 国家自然科学基金项目 (资助号: 60375029) 和 JSPS 资助项目

所以在各种灾难后的快速、有效、安全地搜救受伤人员成为救援的第一任务。面向城市抢险救灾要求的快速性、危险性、高强度性和准确性，机器人的研究人员研制了多种用于城市救灾的机器人——被统称为城市灾难救援机器人（USAR），使救灾机器人成为近年来研究比较集中的热门领域。

城市灾难救援机器人的主要任务大致分为：

- 1、替代搜救人员完成辛苦劳累的救援工作。
- 2、将传感器带入危险环境完成对幸存者的定位任务。
- 3、搜集视觉和地震数据，评估灾难损失。
- 4、携带食品和医疗物资给幸存者，争取营救时间。
- 5、引导救援工具进入危险环境，为幸存者提供氧气等必要生存条件。
- 6、确认安全的救援路线，防止二次倒塌带来的巨大损失。

城市灾难救援机器人采用的移动机构主要有轮式、腿式和履带式三种。实际应用证明：尽管履带驱动机构很消耗能量，但由于履带式移动机构能够在粗糙不平的地面上运动并能跨越障碍，而且具有运动稳定、攀爬能力强的特点，所以大多数救灾机器人采用履带移动机构作为驱动方式。典型的采用履带式移动机构的机器人有：Auriga- α 移动机器人^[2]，还有大家比较熟悉的 iRobot 的 PackBot 机器人^[3]和 Inuktun 的 MicroVGTV^[4]，该类机器人都具有很好的攀爬能力。移动机器人通常采用平行配置的履带结构来实现灵活转弯动作，而且普遍采用两到三段平行的履带结构组成机器人，以实现机器人的跨越障碍和攀爬楼梯等高难度运动。因此这类机器人一般体积较大，无法完成进入狭小空间的操作任务。而在灾难环境中大多是瓦砾纵横的狭小空间，体积较大的机器人根本无法进入。这就要求执行救援任务的机器人体积较小、越障能力强。蛇形机器人狭长体型充分满足进入狭小空间操作的要求，而且蛇形机器人对环境具有高度的适应性，展现出了较大的应用优势。蛇形机器人在结构上展现的是一种冗余的串联机构，该机构在增加机器人的环境适应性、运动稳定性和越障能力方面显示出了很大的优越性^[5,6,7]。但由于驱动和控制的原因，目前还很难将其应用到救灾环境中。为增强蛇形机器人的驱动能力，研究人员将履带安装到机器人上达到了很好的运动效果。Moria 和 Omnitread 蛇形机器人分别在机器人周身加装履带驱动机构，达到了机器人良好的运动性能和越障能力^[8,9]。

为实现机器人在各种救灾环境中的稳定运动从而完成搜救任务，本文基于履带驱动机构设计了一种新型的救灾机器人——变形虫 II。该机器人结合了模块化机器人和蛇形机器人的特点，并且具有变形能力和环境适应能力。该

机器人的设计指标为：

- 1、能够穿越狭小的空隙或管道；
- 2、能够在非常粗糙的地面运动并跨越障碍；
- 3、具有运动的灵活性、机动性和稳定性；
- 4、高的集成性，可以实现无线控制；
- 5、质量轻、体积小、便于携带，可以作为大型机器人的子机器人。

2. 变形虫 II 系统

变形虫 II 的设计理念建立在蛇形机器人机构和履带驱动机构的基础上。机器人不仅能够比较宽敞的空间中自由运动，而且能够通过变形来改变自身的形状以实现在狭小空间内的运动。研究蛇形机器人的目的主要是将其应用到抢险救灾的环境中去，但就目前蛇形机器人的机构和控制而言，实现蛇形机器人的真正应用尚需努力。其主要原因是蛇形机器人本身关节众多，而驱动力不足，控制复杂。面对蛇形机器人在近期很难投入实际应用和实际需求的迫切性之间的矛盾，一些设计人员在蛇形机器人的腹部安装了主动驱动装置来改善机器人的驱动使蛇形机器人能够实现良好运动。但这种改进使蛇形机器人本身的驱动机构过多，在控制上增加了复杂性，难以实现蛇形机器人的适应性控制。一些研究人员在蛇形机器人上安装了驱动履带来实现越障等运动，例如 MOIRA 和 Omnitread 机器人。但实际证明这种机器人机构比较复杂很难控制。因此，设计一种能够基本完成适应环境、穿越狭小空间，而且机构简单的机器人是非常必要的。这种机器人应该能够充分弥补蛇形机器人的驱动力不足的缺点，所以选择履带作为基本驱动机构。同时应该具有跨越障碍和穿越细小空间的能力，因此在机构上应该具有变形能力。Takayama 和 Hirose 等人研制的 Souryu 机器人达到了良好的运动和驱动性能^[10]，但该机器人由于机构约束使其转弯半径较大。基于以上设计理念和对蛇形机器人的深入理解，本文设计了具有新型结构的抢险救灾机器人——变形虫 II(图 1)。该机器人由两个运动主体和一个变形主体三部分组成。运动主体为履带驱动模块，变形主体主要实现在狭小空间作业时机器人的变形。图 2 所示为机器人的并行构型（称为 II 构型）和展开构型（称为 I 构型）两种状态。两种状态在适应环境方面各自特点，通过变形主体实现构型之间的转换。



图 1 变形虫 II 实体构型图

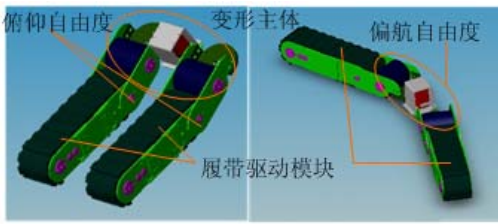


图2 变形虫 II 的 II 构型和 I 构型

运动主体主要实现机器人整体的驱动功能，要求具有较高适应地面能力和较大驱动力矩。尽管采用履带驱动在能量消耗方面的损失较大，但它能够适应地形、具有强驱动力和较大有效接触面积。因此运动主体部分采用履带驱动方式。为增大履带与地面间的作用力，在履带表面加工了带牙，可以在运动过程中抓牢地面障碍物的功能。运动主体部分采用两个高力矩的直流电机 FutabaS3305 驱动(图 3)，并加入了 2: 1 的减速比。其中一个电机驱动履带，另一个电机驱动变形主体的俯仰自由度。运动主体中预留了充分空间，以便电池和控制单元的安装，从而实现运动主体的集成性。

设计变形主体主要实现机器人整体运动尺寸调整，其目的是在保持机器人有效运动能力的前提下，实现机器人从宽敞空间到狭小空间的体形调整来适应环境。变形主体部分由一个直流驱动电机组成，增加的减速比为 2: 1(图 3)。运动主体部分的偏航自由度由变形齿轮组来实现，该齿轮组由一个直流电机来驱动(图 4)。变形齿轮组采用一对齿轮和一对半面齿轮的传动方式来调整两个运动主体的相对角度和相对距离，同时将减速比设定在 2: 1(图 5)，直流电机带动驱动齿轮，通过调整齿轮驱动转向齿轮，同时驱动齿轮直接驱动另一个转向齿轮，从而完成偏航角度的调整。在变形主体部分设计了两个从动轮，该从动轮主要实现机器人在越障过程中的攀爬能力。变形虫 II 的详细技术参数请见表 1 和图 6。

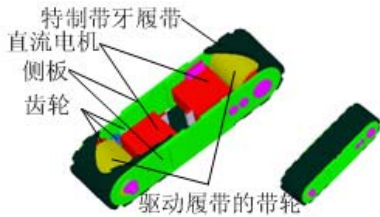


图3 变形虫 II 运动主体结构

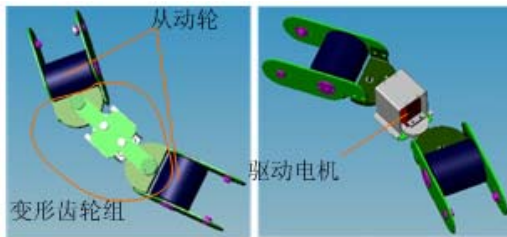


图4 变形虫 II 变形主体



图5 变形虫 II 变形主体驱动原理

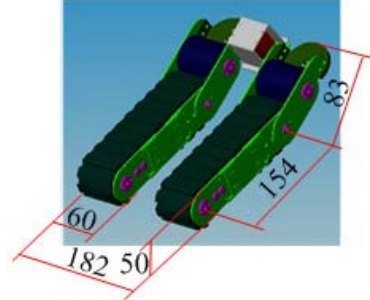


图6 机器人的尺寸

表 1 变形虫 II 的技术参数

| 驱动器 | 改装的 FutabaS3305 电机 |
|--------|------------------------|
| 材料 | 硬铝 |
| 外形尺寸 | 604X60X50 或 262X182X50 |
| 重量 | 3.2kg |
| 最大力矩 | 1.78 |
| 最大运行速度 | 0.065m/s |
| 工作空间 | 可以穿越 60X60 的孔 |
| 俯仰自由度 | -120°~120° |

目前，该机器人仍采用 Futaba 遥控器来控制。通过几个电机的协调运动控制，可以实现机器人的变形和越障动作。机器人的运动能力分析将在下面一节加以详细的分析。待完成功能实验之后将对控制系统加以改进。

3. 运动形式及运动能力分析

设计该机器人主要是面向抢险救灾的应用，适应环境和跨越障碍是衡量该类机器人运动能力的两大指标。该机器人可以通过俯仰和偏航两个自由度来实现适应环境和跨越障碍。机器人的主要工作状态为两个运动主体并列的 II 构型，在该状态下机器人可以实现直线运动，原地转弯和跨越障碍。当两个运动主体同向同速运动时，机器人实现直线运动。当两个运动主体反向同速运动时，机器人实现原地转弯运动。两个运动主体差速运动时，实现转弯动作。同时偏航自由度可以控制两个运动主体的夹角，实现机器人身形的变化以适应地面环境。偏航自由度不但控制着两个运动主体的夹角，而且控制着 I 构型状态下机器人的转弯角度。

该机器人在各种构形条件下都表现出了对环境的高度适应性。不同构形与环境的适应性各有特点，展示了该机器人在机构设计上的优越性。机器人在 II 构型配置下，双主动履带对环境具有高度的适应性。在该运动方式下机器人的运动与 PackBot 机器人非常类似，不仅可以完成所有的相关动作，而且表现出比 PackBot 更强的适应性。图 7 所示为机器人在运动过程中对各种地形的适应，与 PackBot 不同的是该机器人运动主体的两个履带单元都能够调整角度来适应环境。图 7a 是机器人的简单越障动作，机器人依靠履带驱动和变形主体从动轮的搭载来跨越障碍物。图中的黑色标识为障碍物。图 7b 所示为机器人调整两个履带的角度来适应三维地形的情况，可以看出机器人的一个履带单元在地面上运动，而另一个履带单元由于两个障碍物的存在必须调整角度来适应地形。同时从动轮搭载在另一个障碍物上，从而增加了整个机器人的驱动力和运动的稳定性。上面所叙述的机器人对地形的适应并不包含倾斜面的运动情况。如果在倾斜面上运动或者在管道内运动，该机器人可以通过调整偏航自由度来调整履带与地面的角度，尽量增加接触面积来加大驱动力。图 7c 表示机器人通过偏航自由度来调整 1、2 两个履带的角度使机器人适应 V 型地面和管道壁。

在灾难环境中最常见的平台和楼梯环境是检验抢险救灾机器人运动能力的基本指标。变形虫 II 能够跨越平台和攀爬楼梯，其运动过程如图 8 所示：机器人依靠俯仰自由度来实现攀爬功能，同时依靠履带驱动。

通过管道途径是机器人进入灾难环境的快捷方案，机器人可以完成管道内的运动不仅扩展了抢险机器人的应用领域（可以应用到管道检查和清理领域），而且能够为救援赢取大量时间。变形虫 II 可以通过构型 II 和构型 I 在管道内行进，当然构型 I 能够运动的管道半径要小得多，如图 9ab 所示。管道的内壁由于某些原因通常很滑，使机器人很难在里面行进。此时可以采用图 9c 的构型，充分增加机器人与管壁的压力来防止打滑现象的发生。

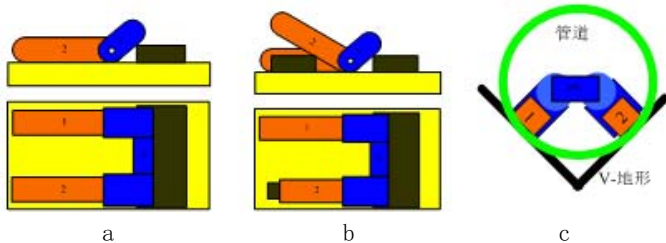


图 7 构型 II 下机器人对三维环境的适应性

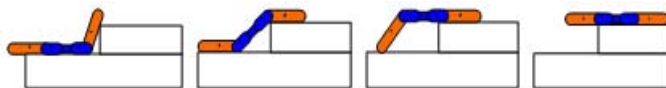


图 8 机器人攀爬楼梯的构型

变形机器人各个部分的重量对机器人的运动有很大影响，在设计过程中应该配置好机器人各个组成部分的重量，尽量增加机器人的运动能力和适应环境能力。考虑到运动主体在运动过程中与地面接触的必要性，在设计中保证了极限变形和运动条件下的重量安排。当只有一个运动主体与地面接触，而另一个运动主体在垂直地面的状态对整体平衡不起作用时，机器人在此条件下应该不至于倾翻。则：

$$m_1 L_1 > m_3 L_2 \quad (1)$$

其中变形虫 II 的 $m_1 = m_2 = 1.2\text{kg}$ ， $m_3 = 0.8\text{kg}$ ， $L_1 = 77\text{mm}$ ， $L_2 = 35\text{mm}$ ，充分满足(1)式，保证了机器人在运动过程中的稳定性。如果由于运动惯性和地面原因机器人出现图 10 所示的倾翻状况，机器人可以通过调整两个运动主体的姿态使整个机器人恢复到正常的工作状态。当然图 10 所示的极限情况在机器人的实际运动过程中是不应该出现的，因为在该构形情况下，机器人只有一个运动主体完全与地面接触，无法完成转弯动作。

履带机器人在变形过程中要克服比普通轮式驱动更大的地面摩擦阻力。为减小变形阻力，本文采用动态变形的办法，即在变形过程中使两个履带单元相对运动来配合变形主体的运动来产生变形，实验证明这是一种非常有效的方法。如图 11 所示，当运动主体的速度为零时，变形主体很难驱动两个履带单元产生变形。而当两个履带单元运动时，特别是其运动的驱动力有利于变形主体的运动时，变形动作将很容易实现。

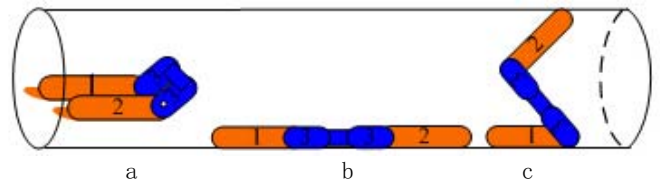


图 9 机器人在管道中的行进方式

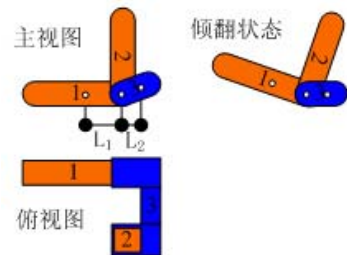


图 10 机器人倾翻状态

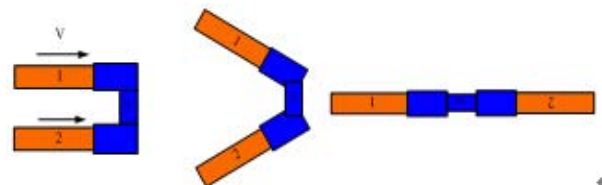


图 11 机器人从构型 II 变形到构型 I

此外，变形虫 II 还能够执行侧向翻滚动作，该动作能够调整机器人与地面的接触面。当机器人因执行某些动作翻倒时，该动作可以使机器人恢复到正常的工作状态。当然，该动作也能够实现机器人的侧向运动。侧向运动的动作顺序如图 12 所示，前进方向为由下向上，其中红色关节表示在该状态下该关节是活动关节，即在该状态下驱动该关节角变化。黑色关节表示不动关节，即在该状态下保持该关节角度不变。按照图 12 所示的驱动顺序和角度变化，机器人就可以实现侧向翻滚运动。

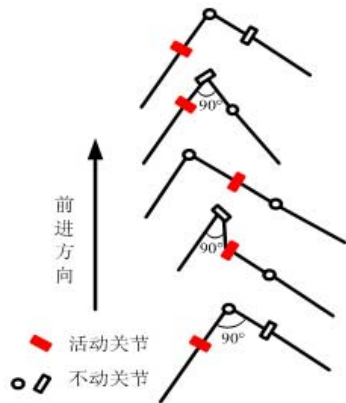


图 12 机器人的侧向翻滚运动

4. 运动实验

运动实验充分展示了变形虫 II 的运动特性。图 13 展示了机器人从构型 II 变形到构型 I 然后钻洞的运动过程。图 14 展示了机器人在各种构型中对地面的适应特性。图 15 展示了机器人的攀爬楼梯能力。图 16 展示了机器人的翻滚运动能力。



图 13 机器人展开后钻洞实验



图 14 机器人对复杂环境的适应



图 15 机器人上楼梯实验



图 16 机器人翻滚运动实验

5. 结论

为将机器人应用在抢险救灾中，本文设计了具有环境适应性、越障能力强、便于携带的可变形机器人。该机器人具有三个自由度，能够组成两种构型。并行的工作构型运动灵活，展开构型能够在狭小空间中运动。实验证明该机器人能够完成比较复杂的动作，适合在各种不同的环境中运动。

参考文献

- [1] Robin R.M., "Marsupial and shape-shifting robots for urban search and rescue," *IEEE Intelligent systems*, March/April, pp.14-19, 2000
- [2] Martínez J.L., Mandow A., Morales J., A. García-Cerezo and S. Pedraza, "Kinematic modelling of tracked vehicles by experimental identification," in *Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Sendai, Japan, September 2004, pp.1487-1492
- [3] www.army-technology.com
- [4] Roboprobe.com/products/p03-MVGTV.HTML
- [5] Hirose, S. and Morishima, A., "Design and control of a mobile robot with an articulated body," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 9, No. 2, pp. 99-113, April 1990
- [6] Hirose, S., "Design of practical snake vehicle: articulated body mobile robot KR-II," *Fifth Int. Conf. on Advanced Robotics, Robots in Unstructured Environments*, Vol.1, Pisa, Italy, June, 1990, pp. 833-838
- [7] Kamegawa T., "Development of the snake-like rescue robot KOHGA," in *Proceedings of 2004 IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation*, New Orleans, LA, pp. 5081-5086, April, 2004
- [8] Koichi O. and Hiroshi K., "Development of mobile inspection robot for rescue activities: MOIRA," in *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, Nevada, pp.3373-3377, October 2003
- [9] Johann B., Grzegorz G. and Malik H., "The Omnitread serpentine robot-design and field performance," in *Proceedings of the SPIE Defense and Security Conference, Unmanned Ground Vehicle Technology VII*, Orlando, FL, pp.1-9, March 28 to April 1, 2005
- [10] Takayama, T.; Hirose, S., "Development of Souryu-I connected crawler vehicle for inspection of narrow and winding space." *26th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2000*, Nagoya, Aichi, Japan, pp.143-148, Oct. 22-28, 2000