

文章编号 1004-924X(2009)12-3001-08

基于嵌入式视觉的移动式自重构微小型机器人

孙立宁, 钟 鸣, 李满天

(哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 为了提高微小型移动机器人作业能力, 提出了一种新型移动式自重构机器人。机器人包含若干可独立执行任务的移动子机器人, 单元子机器人由若干模块化组件(中央处理模块、通信模块、驱动模块、弯举模块、超声模块、视觉模块等)构成, 并可通过展开结构进行简单变形以增强自身机动性能与越障能力。多个子机器人可以在微型 CMOS 相机及其它传感器协作下自主对接为整体机器人, 并可自重构为蛇形、环形等构形完成越障。在任务完成后, 各子机器人可以彼此脱离, 形成分布式机器人系统。为实现机器人微小型化, 在模块化设计过程中大量采用了紧凑机械结构, 设计了基于微型 CMOS 数字相机的嵌入式图像处理模块用于视觉自重构, 以及基于 ARM、FPGA 的嵌入式中央控制器进行低能耗高效率的全局控制。单元机器人通过了完整的功能测试, 在两个单元机器人中心线夹角为 30° 的情况下, 完成对接耗时为 15 s, 满足机器人自重构要求。

关键词: 自重构机器人; 模块化; 机动性; 嵌入式视觉; 对接

中图分类号: TP242.6 **文献标识码:** A

Mobile miniature self-reconfigurable robot based on embedded vision

SUN Li-ning, ZHONG Ming, LI Man-tian

(*State Key Laboratory of Robotics and System,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China*)

Abstract: To enhance the capabilities of mobile miniature robots, a novel mobile self-reconfigurable robot is presented. This robot consists of several independent units. Each unit is composed of modular components including ultrasonic sensors, cameras, communication, computation and mobility parts, and can be simply reconfigured to enhance its mobility by expanding itself. Several units can be linked into a united whole robot with the help of a camera or other sensors autonomously and can also be reconfigured into snake or ring structures to realize the obstacle climbing. After missions, these units are disjointed to be separated robots. To achieve a small overall size, compact mechanical structures are adopted in modular component designing. An embedded image processing module based on a CMOS digital camera is designed for the self-reconfiguration, and a miniature ARM & FPGA-based embedded controller is developed for the minimal power consumption and efficient global control. Fully functional units have been tested, and the docking experiment between the two units has also been implemented. The docking course cost 15 s with the separate angel of 30° , which satisfies the requirement of the self-reconfiguration.

Key words: self-reconfigurable robot; modularity; mobility; embedded vision; docking

收稿日期: 2008-12-22; 修订日期: 2009-02-23.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2009AA04Z206)

1 引言

自 1988 年名古屋大学首次提出自重构机器人 CEBOT^[1]以来,自重构机器人技术得到迅速发展,涌现了大量原型。基于不同的重构方式,这些原型可归为 3 种类型:点阵式自重构机器人(Lattice Type),如 G. Chirikjian 提出的 Metamorphic Robot^[2], S. Murata 提出的 Fracta^[3], M. Jorgensen 提出的 ATRON^[4]等;链式自重构机器人(Chain Type),如 M. Yim 提出的 Polybot^[5-6], A. Castano 提出的 CONRO^[7-8], S. Murata 提出的 M-Tran^[9-10]等;移动式自重构机器人(Mobile Type),如 T. Fukuda 提出的 CEBOT^[11], H. Benjamin 提出的 Millibot Trains^[12]等。

在上述 3 种自重构机器人类型中,点阵式和链式由于机器人整体结构不可分割,较易实现自重构,但是存在单个子模块运动能力有限而无法独立执行任务的缺点。相反,移动式自重构机器人结合了分布式机器人与自重构机器人的优点,它由若干可自由移动的独立子模块组成,易于定位和操控;当子模块呈分散状态独立执行任务时可构成分布式机器人系统,当遇到单个子模块无法克服的障碍时,可根据需要与邻近的模块自重构为整体机器人。

然而,如何从分布式的离散模块过渡到自重构的整体机器人这一可逆过程较难实现。现有的典型移动式自重构机器人如 CEBOT 和 Millibot Train 都存在一些缺点:CEBOT 将各功能部件分割成为独立的移动单元,但每个单元无法独立于系统工作;Millibot Train 由若干独立单元模块组成,但是囿于结构形式与尺寸限制而无法集成多功能传感器用于高效自主重构。针对现有原型的不足,本文研制了一种新型移动式自重构机器人。

2 机器人模块化设计

本文设计的机器人由若干相同的单元模块组成。每个单元模块可作为独立机器人执行任务,多个单元模块可完成自主重构,设计完成的最终单元模块如图 1 所示。

由于本机器人的应用背景定位于反恐、灾难

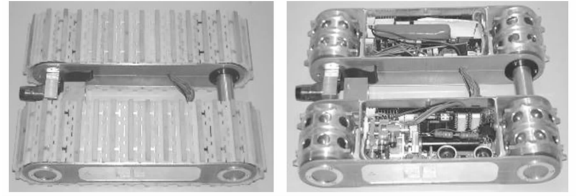


图 1 自重构机器人的单元模块

Fig. 1 Unit module of self-reconfigurable robot

搜救等领域,因此体积越小越好,这就需要在机器人机动能力和整体尺寸之间取得合理平衡。最终完成的单元机器人外形尺寸为 225 mm×168 mm×60 mm,重量为 1 023 g,最大移动速度为 80 cm/s,最长续航时间约为 30 min。

考虑到互换性、装配性,以及最小单元控制等原则,单元机器人的机械系统主要可分为以下 5 个模块:履带模块、行进模块、对接机构、弯举模块和超声传感器驱动机构。

2.1 履带模块

履带模块用于确保机器人地面移动的平稳性和越障运动的顺滑性,因此滑移、精度、效率是设计重点。如图 2 所示,履带模块主要由同节距履带和圆形驱动轮组成:其中履带由 90 片 ABS 工程塑料履带块通过 1.5 mm 钢钎连接而成,履带的触地面进行挂胶处理以提高抓地能力;驱动轮采用双排齿导向结构,其齿距与履带节距相同以保证传动精度,履带轮中部的环形导向槽用于确保履带不发生侧向偏移。

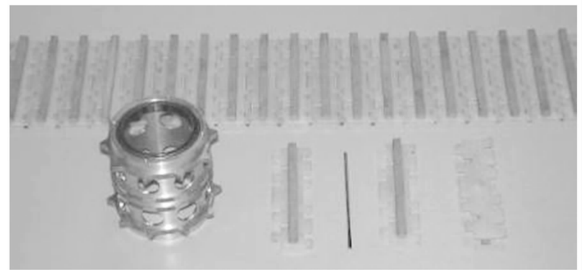


图 2 履带模块组件

Fig. 2 Components of track system

2.2 行进模块

行进模块需提供足够的输出扭矩以驱动机器人。单元机器人两条履带相距 32 mm,分别由两个无刷直流电机驱动。功率消耗最大的情况发生在单元机器人非差动转向时,此时两个履带驱动

电机只有一个工作。以此极端情况计算所需的电机输出扭矩选择合适电机,确保单元机器人的机动性能。

如图 3 所示,驱动电机和减速器被整体封装于杯套中,减速器轴与水封配合后输出,具有防水防尘功能。驱动电机通过密封杯套与外框间接固定,输出轴与履带轮侧面端盖连接后由固定于外框的轴承座支撑。工作时电机驱动履带轮旋转,机器人随之移动。

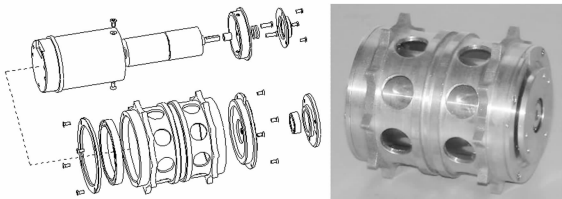


图 3 驱动系统结构示意图

Fig. 3 Assembly diagram of driving mechanism

2.3 对接机构

对接机构是准确完成单元模块间对接与可控锁定的关键所在,其对于结构强度、外形尺寸要求苛刻。如图 4 所示,对接机构由一个多曲面重构销和重构孔组成,销、孔配合之后完成五个自由度的限制。对接时,重构销随着单元机器人的相向运动插入重构孔中,销、孔复合曲面间的接触力自动校正彼此位置,使销、孔轴线对齐,从而降低对单元机器人初始位置精度的要求,提高机器人自重构效率。

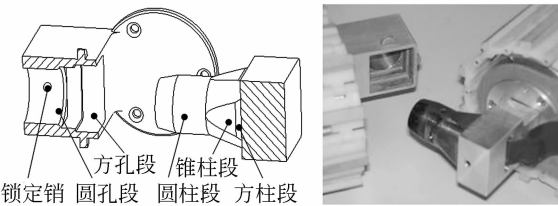
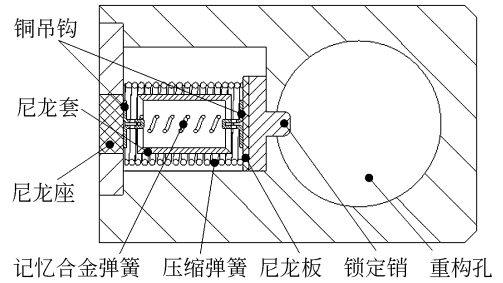


图 4 对接机构及其完成模块

Fig. 4 Structure of docking mechanism & finished module

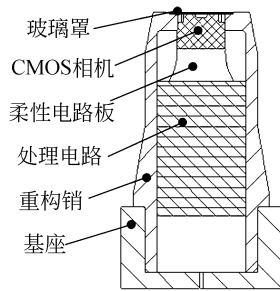
如图 5(a)所示,在重构孔径向放置一个由丝径 0.3 mm 记忆合金弹簧驱动的可控锁定销,其通过压缩弹簧的张力及记忆合金弹簧的拉伸实现可控往复运动,用于执行上位机命令,锁定和释放两个参与对接的单元机器人。此外,如图 5(b)所示,为实现自重构,且在单元机器人运动中进行同

步探测和监控,中空的重构销内放置一个尺寸为 7 mm×7 mm×4 mm 的微型 CMOS 数字相机。



(a) 锁定销

(a) Structure of controllable lock pin



(b) 重构销

(b) Structure of docking pin

图 5 锁定销及结构剖面图

Fig. 5 Cross-section view of controllable lock pin & docking pin

2.4 弯举系统

弯举系统主要用于改变单元或整体机器人的构形以适应各种复杂地形。每个单元机器人具有两个弯举模块,一个用于自身的简单重构,另一个用于弯举与之对接的相邻模块。

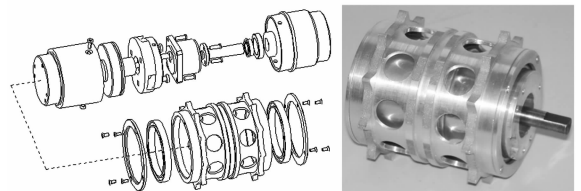


图 6 弯举系统结构示意图及完成模块

Fig. 6 Assembly diagram of lifting mechanism

如图 6 所示,一个盘式直流电机通过谐波减速器变速后输出弯举动力。为了实现防水功能,动力部件被封装在密封杯套内,被动履带驱动轮经两个薄壁轴承支承后置于密封容器的两侧轴肩,与减速器相连的钢轴与水封配合后输出力矩。

当机器人运动时,被动履带轮随履带旋转,杯套内弯举模块与之隔离,可独立动作。

2.5 超声传感器驱动机构

单元机器人内集成了可全方位扫描的单个超声传感器,用来取代传统的阵列方式。为获得良好的扫描效果,超声传感器需要保持一定高度的直立状态。由于机器人被履带包围,因此采用折衷方法将传感器置于舱体内,通过机构将之推出并直立,再由步进电机驱动传感器旋转完成全局扫描(如图 7 所示)。

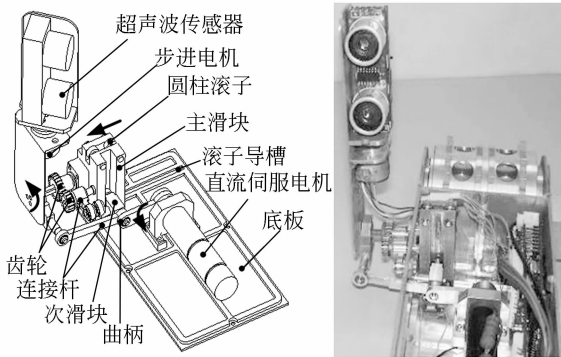


图 7 超声传感器驱动机构示意图及完成模块
Fig. 7 Assembly diagram of sonar mechanism

基于以上模块化设计,单元机器人具有了完整的功能模块可用于独立执行任务,克服了 CE-BOT 移动单元功能不全的缺点;另外,放置于重构销内的微型 CMOS 相机可用于自动对接过程的监控和反馈,相比 Millibot Train 更易于完成自重构。

3 机器人功能规划

根据前述机器人设计,单元机器人主要由两个履带模块组成。弯举模块动作后,任一履带模块可绕另一履带模块旋转,单元机器人长度得以增大,如图 8 所示。即单元机器人可完成简单重

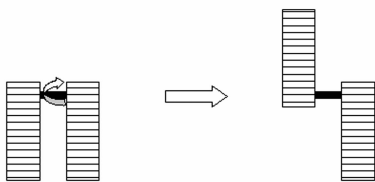
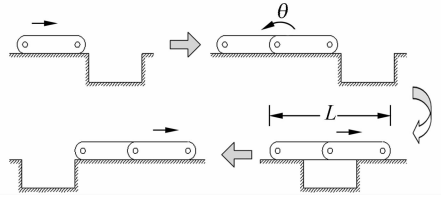


图 8 单元机器人简单重构示意图

Fig. 8 Simple self-reconfiguration of unit robot

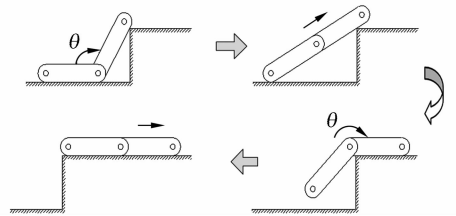
构变形,以此增强机动性能。

当单元机器人遇到较小障碍时,可通过简单重构功能增加机体长度,从而跨越 $0.4L$ 宽度的沟壑(图 9(a)),或通过调整两个履带模块间的夹角 θ ,攀越 $0.4L$ 垂直高度的凸起(图 9(b))。



(a) 跨越 $0.4L$ 宽度的沟壑

(a) Overcoming ditch with the width of $0.4L$

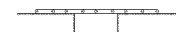


(b) 攀越 $0.4L$ 高度的凸起

(b) Climbing stair with the height of $0.4L$

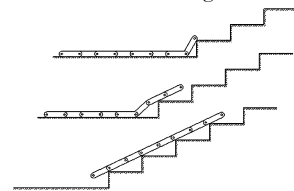
图 9 单元机器人越障示意图,其中 L 为展开后机器人总长, θ 为两履带模块间夹角

Fig. 9 Capabilities of unit robot, where L is length of the expanded module, and θ is the separate angle



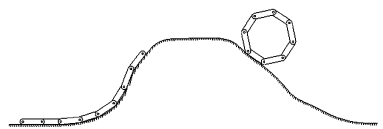
(a) 链形跨越沟壑

(a) Overcoming ditch



(b) 链形攀越楼梯

(b) Climbing stair



(c) 环形克服地形障碍

(c) Rolling slope

图 10 自重构机器人越障功能示意图

Fig. 10 Capabilities of self-reconfigurable robot

当单元机器人遇到无法独自克服的较大障碍时,可与邻近单元自主对接,而后自重构为链形或环形机器人进行越障。链形机器人可以跨越宽度沟壑(图 10(a)),或攀越标准楼梯(图 10(b));环形机器人可针对坡形障碍顺势滚动,以节省驱动能源(图 10(c))。

4 嵌入式视觉模块设计

为实现上述功能,自重构机器人需要完善的控制系统来完成多个单元机器人之间的定位、对接、重构、越障和信息处理。

本文采用如图 11 所示的双层控制系统对各个子系统进行并行控制。其中,基于 ARM 的中央控制器完成任务规划以及子系统协调;各子系统的设计遵循模块化原则,执行终端命令和信息采集反馈。中央控制器与各子系统之间通过基于 FPGA 的串行总线进行通信,从而满足大量信息实时交换的要求,同时也便于后续模块扩展。

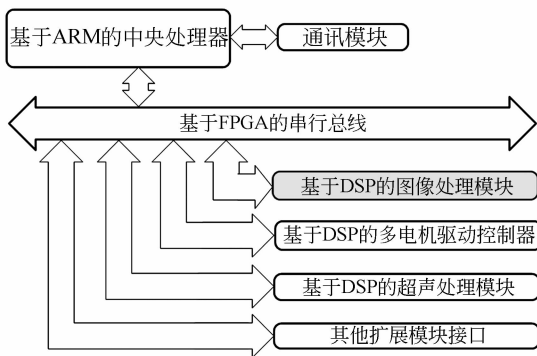


图 11 电气系统结构示意图

Fig. 11 Composition diagram of electrical system

自主对接是移动式自重构机器人的关键技术,需要多种传感器进行信息融合协作完成,而视觉模块是其中最重要的环节。本文提出的自重构机器人体积较小,容纳电气硬件的空间极其有限;另外,为了便于自重构,CMOS 相机被放置于内径为 $\phi 11$ mm 的重构销内,这些都是嵌入式视觉模块电气设计的难点。

根据空间和像素约束,选用 STMicroelectronics 公司的型号为 VS6524 的 CMOS 相机,其

具有 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ 分辨率;选用 ADI 公司的 ADSP-BF533 处理芯片,基于 ITU656 协议进行数据处理。当相机捕获图像后,DSP 通过串口总线将数据传递给 ARM 中央处理器做进一步处理^[13],如图 12 所示。

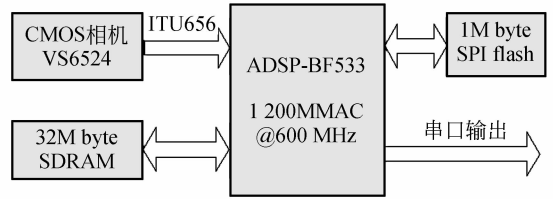


图 12 嵌入式视觉模块工作流程

Fig. 12 Schematic diagram of image processor module

ADSP-BF533 外扩的 SDRAM 时钟频率高达 133 MHz,另外,VS6524 需要较长的柔性电路板与主电路连接,因此,在电路设计过程中,必须解决由于传输线效应造成的信号数字竞争和冒险、信号完整性等问题。如图 13 所示,当信号在柔性 PCB 上传输时,PCB 表面会产生电场和磁场,可等效为 RLCG 单元。

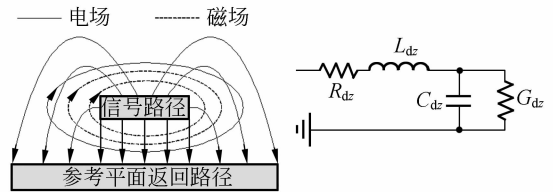


图 13 PCB 截面场图及等效 RLCG 电路

Fig. 13 Section view of wire on PCB and equivalent RLCG unit

从而可推导出其特性阻抗为:

$$Z_0 = \sqrt{Z/Y} = \sqrt{(R + j\omega L) / (C + j\omega C)} \quad (1)$$

若传输线、负载的特性阻抗不一致,便会发生信号反射(反射比 $\rho = (Z_1 - Z_2) / (Z_1 + Z_2)$,其中 $Z_{0,1}$ 为负载特性阻抗);当源阻抗和导线阻抗不匹配时,则反射在导线上不断进行,从而直接影响数字信号的完整性。本文考虑到 VS6524 信号线较长,且传输频率为较高的 24 MHz,因此采用源阻抗匹配的方法来确保信号的完整性,并使用 HyperLynx 进行 PCB 仿真^[14]。

图 14 为阻抗匹配前后,PCLK 信号完整性的变化,可见阻抗匹配后的信号完整性明显优于

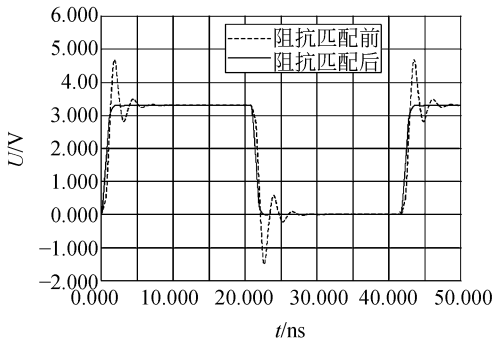


图 14 阻抗匹配对 PCLK 信号完整性的影响

Fig. 14 Effect of impedance matching on signal integrity

匹配前。最终设计完成的 ADSP-BF533 电路板集成 32 MB 的 PC133SDRAM, 如图 15 所示, 外形尺寸为 50 mm×30 mm, 实测最大功耗仅为 584 mW, 完全满足微小型机器人应用要求。

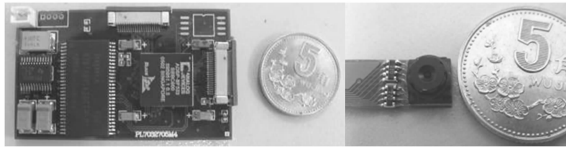


图 15 嵌入式图像处理模块

Fig. 15 Embedded image processing module

5 基于视觉的自重构实验

5.1 自重构策略

相对于点阵式和链式自重构机器人, 移动式自重构机器人实现自重构较为困难, 因此需要制定完善的自重构策略以实现预期功能。

当执行对接任务时, 本文首先初始设定参与对接的两个单元机器人具有不同优先级: 优先级较高的为主动模块, 优先级较低的为被动模块。

其次, 以两单元机器人中心线夹角 α (如图 16 所示) 为参考设定阈值 Δ_T :

(1) 当 $\alpha > \Delta_T$ 时, 不满足对接条件, 需进一步调整单元机器人姿态;

(2) 当 $\alpha < \Delta_T$ 时, 满足对接条件, 单元机器人可以开始执行对接。

两个独立单元机器人执行对接时, 应当遵循以下设定顺序:

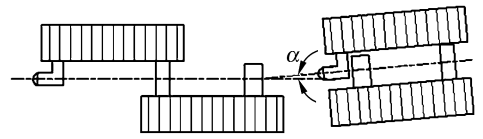


图 16 对接单元机器人之间的夹角

Fig. 16 Separate angle between two docking modules

(1) 通过全方位超声传感器侦测彼此位置, 并相互接近至大约 10 cm 左右距离;

(2) 经驱动电机码盘和超声旋转电机码盘反馈数据获得两个单元机器人对称中线的夹角 α ;

(3) 对指定的被动单元机器人进行简单重构, 展开机体以露出重构孔;

(4) 主动机器人通过 CMOS 微型相机获得重构孔的精确位置, 并反馈至电机驱动模块进行姿态调整, 直至两单元机器人夹角 α 小于设定阈值 Δ_T ;

(5) 对主动机器人进行简单重构展开机体, 两单元机器人相向移动, 重构销插入重构孔;

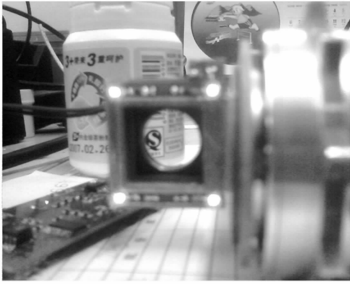
(6) 重构孔内径向锁定销弹出, 将两单元机器人连接锁定, 完成对接。

5.2 嵌入式图像处理强化措施

在对接过程中, 许多因素如尘雾、光线等都会影响数字相机获取图像的质量。为加强重构孔的可见性, 将 4 个红色 LED 呈正方形放置于重构孔四周 (图 17(a)), 进行对接时, LED 上电发光。相机获得的初始图像经 ADSP-BF533 处理后转化为亮度和红色的二值图像, 经过异或处理并中值滤波后, 便可获得 4 个 LED 的清晰图像 (图 17(b))。然后将 4 个亮点投影到水平轴和垂直轴, 获得矩形的两个边长 L_H 和 L_V (图 17(c))。

由于初始设定机器人在同一水平地面上进行对接, 因此 L_V 为常值, 而 L_H 在两模块夹角 α 不同的情况下则长度随之变化。通过比较 L_V 和 L_H 的大小对夹角大小进行对接条件判断: 当两者差值小于设定阈值时, 认为两个单元机器人已经对齐, 满足对接条件; 反之, 则需对单元机器人进行位姿调整, 首先由主动机器人向左或向右随机偏航一个角度, 若差值变大, 则向另一个方向偏

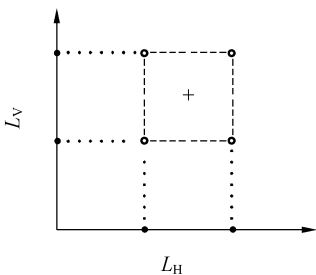
航,逐渐进行角度调整,直至满足 $\alpha < \Delta_T$ 。



(a)LED 布置形式
(a)Placement of LEDs



(b)经 DSP 处理后的 LED 图像
(b)Image of LEDs processed by DSP



(c)LED 在坐标系上投影
(c)Projection of LEDs

图 17 嵌入式图像处理措施

Fig. 17 Enhanced methods for embedded vision

5.3 单元模块对接实验

根据前述自重构策略,进行了两个单元机器人基于嵌入式视觉的近距离对接实验,如图 18 所

参考文献:

[1] FUKUDA T, NAKAGAWA S. Dynamically reconfigurable robotics system [C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and*

示。两单元机器人中心线初始夹角为 30° ,对接过程耗时约 15 s。对接完成后,两单元机器人顺利重构为蛇形。

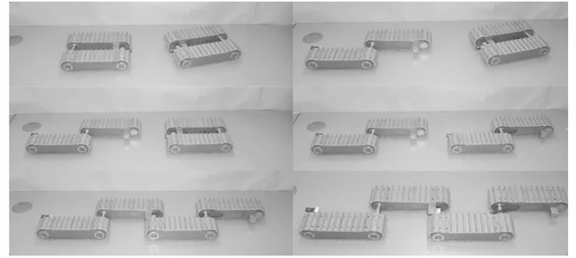


图 18 两个单元机器人对接试验

Fig. 18 Docking experiment between two modules

如 5.1 节设定的对接顺序,视觉接管对接任务之前,两单元机器人的初始中心线夹角 α 的大小直接取决于超声传感器负责的单元机器人姿态调整结果。但是在另外的实验中发现,由于单元机器人在转向过程中存在履带滑转和滑移现象,仅依靠驱动超声传感器的步进电机码盘反馈与超声传感器自身的测量数据,不足以获得足够精度的两单元机器人间的相对位置夹角 α 。

由于对接效率直接决定自重构机器人的整体性能,为解决当前机器人对接效率偏低的缺点,下一步工作将通过集成基于 MEMS 陀螺的嵌入式组合导航模块实现单元机器人的精确定位,然后对自重构机器人的整体越障性能进行完整测试。

6 结 论

本文提出了一种用于搜索、侦察、救援的模块化移动式自重构微型机器人。其单元机器人的机械、电气系统均采用模块化设计,并将微型设计思想贯彻始终,实现了小尺度机电综合。研制的单元机器人通过了机动性能验证,并可独立执行简单变形进行越障;另外,在两个单元机器人夹角 $\leq \pm 30^\circ$ 的情况下,顺利执行了基于嵌入式视觉的自主对接实验。随着今后对接效率的不断提高,再加以工程实用化,此种移动式自重构机器人将具有广泛应用前景。

Automation, 1988;1581-1586.

[2] CHIRIKJIAN G S. Kinematics of a metamorphics robotic system [C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*,

- 1994:449-455.
- [3] MURATA S, KUROKAWA H, KOKAJI S. Self-assembling machine [C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1994:441-448.
- [4] JORGENSEN M, OSTERGAARD E, LUND H. Modular ATRON: modules for a self-reconfigurable robot [C]. *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2004:2068-2073.
- [5] YIM M. A reconfigurable modular robot with many modes of locomotion [C]. *Proceedings of JSME International Conference on Advanced Mechatronics*, 1993:283-288.
- [6] YIM M, ZHANG Y, ROUFAS K, et al.. Connecting and disconnecting for chain self-reconfiguration with Polybot [J]. *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics*, 2002,7(4):442-451.
- [7] CASTANO A, WILL P. Mechanical design of a module for reconfigurable robots [C]. *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Robotics and Autonomous Systems*, 2000:2203-2209.
- [8] SHEN W, SALEMI B, WILL P. Hormone-inspired adaptive communication and distributed control for CONRO self-reconfigurable robots [J]. *IEEE Transaction on Robots and Automation*, 2002,18(5):700-712.
- [9] MURATA S, YOSHIDA E, KAMIMURA A, et al.. M-tran: self-reconfigurable modular robotic system [J]. *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics*, 2002,7(4):431-441.
- [10] YOSHIDA E, MURATA S, KAMIMURA A, et al.. A self-reconfigurable modular robot: reconfiguration planning and experiments [J]. *International Journal of Robotics Research*, 2003,21(10-11):903-916.
- [11] FUKUDA T, KAGA T. Distributed decision making of dynamically reconfigurable robotic system [C]. *Proceedings of Conference on Robotics and Autonomous Systems*, 1997:1604-1609.
- [12] BROWN H B, VANDE W, BERERTON C A, et al.. Millibot trains for enhanced mobility [J]. *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics*, 2002,7(4):452-461.
- [13] 赵峰, 袁东风, 张海霞, 等. 多 DSP 图像压缩实时并行处理系统 [J]. *光学精密工程*, 2007,15(9):1451-1455.
ZHAO F, YUAN D F, ZHANG H X, et al.. Multi-DSP real-time parallel processing system for image compression [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(9):1451-1455. (in Chinese)
- [14] 郭伟, 卢贤资, 钟鸣. 一种微小型嵌入式图像处理平台的研究 [J]. *传感器与微系统*, 2008, 27(4):52-54.
GUO W, LU X Z, ZHONG M. Research on embedded image processing platform for docking piloting of micro self-reconfigurable robot [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2008, 27(4):52-54. (in Chinese)

作者简介:



孙立宁(1964—),男,黑龙江鹤岗人,教授,分别于1985年,1988年,1993年在哈尔滨工业大学获得学士、硕士、博士学位,主要从事纳米级微驱动及微操作机器人、高速高精度机构、工业机器人技术、并联机器人、医疗机器人、微小型机器人、仿人手臂及机器人机构与控制方面的研究。E-mail: lnsun@hit.edu.cn



钟鸣(1981—),男,湖南常德人,博士研究生,分别于2003年,2005年在哈尔滨工业大学获得学士、硕士学位,主要从事微小型机器人、自重构机器人和移动机器人等方面的研究。E-mail: zhongming@hit.edu.cn



李满天(1974—),男,湖南邵阳人,副教授,分别于1998年,2000年,2006年在哈尔滨工业大学获得学士、硕士、博士学位,主要从事微小型机器人、仿生机器人、移动机器人和特种机器人等方面的研究。E-mail: limt@hit.edu.cn