

文章编号: 1002-0446(2007)05-0479-06

基于多传感器的可变形机器人自主控制方法研究*

曹会彬^{1,2}, 李斌¹, 刘金国^{1,2}

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学重点实验室, 辽宁 沈阳 110016)

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 将 GPS 电子罗盘、倾角仪、码盘传感器等应用到可变形机器人自主运动控制中. 针对可变形机器人自身结构特点, 提出了一种基于多传感器信息融合的可变形机器人在野外环境中自主控制的方法. 该方法主要实现了在非结构环境中机器人的自主变形、自主避障和自主导航定位等功能. 实验验证了该方法的有效性.

关键词: GPS 电子罗盘; 倾角传感器; 非结构环境; 自主导航; 自主变形

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

Multi-Sensor-Based Autonomous Control for a Shape-Shifting Robot

CAO Huibin^{1,2}, LI Bin¹, LIU Jinguo^{1,2}

(1. Robotics Laboratory, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Several sensors including GPS, electronic compass, inclinometer and encoder are used to realize the autonomous motion control of a shape-shifting robot. Based on multi-sensor information fusion, an autonomous control method for the shape-shifting robot in the field environment is proposed according to the structure features of a small shape-shifting robot. The method mainly realizes the functions of autonomous shape-shifting, autonomous obstacle avoiding and autonomous navigation for the robot in unstructured environments. Experiments on the prototype validate the effectiveness of the proposed method.

Keywords GPS, electronic compass, inclinometer, unstructured environment, autonomous navigation, autonomous shape-shifting

1 引言 (Introduction)

随着机器人技术的不断发展,机器人在社会服务、野外作业以及有害、危险环境作业中的应用越来越广泛^[1-2]. 在机器人的自主运动过程中,传感器起着举足轻重的作用^[3]. 探针式传感器、电感式传感器、力学传感器、光电传感器等都在实际系统中得到广泛的应用. 机器人通过各种传感器感知外界环境和自身状态,在非结构环境中自主移动并完成相应的任务^[4-6]. 在非结构环境中,地形往往比较复杂,包括斜坡、沟壑、障碍等等,这就要求机器人不但要具有完备的传感器系统,而且要具有较强的环境适应能力. 传统的移动机器人因其构形单一,很难达到这样的要求. 因此,可变形机器人技术研究成为国内外机器人研究领域的热点^[7-10]. 可变形机器人是一种

具有较强环境自适应能力的机器人,它可以根据环境变化和任务要求而改变自身的构形来完成不可预知的作业任务. 目前,我们研制的机器人已经实现了无线遥控下的自动变形,但机器人还不具备自主变形的能力,为此本文提出了一种基于多传感器(GPS、电子罗盘、码盘、倾角传感器)信息的可变形机器人自主控制方法.

该方法主要实现以下几个方面的功能:(1)自主变形. 在遇到较小障碍物情况下,机器人会通过传感器获得障碍物信息,然后自动变成越障能力最强的构形,越过障碍物;(2)自主避障. 在遇到大障碍物情况下,即使机器人处于越障能力最强的构形也无法通过,这时机器人会利用倾角仪、电子罗盘、码盘传

* 基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2001AA422360).

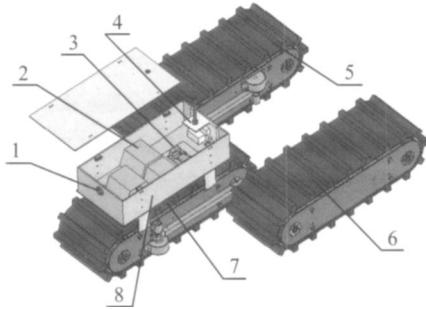
收稿日期: 2006-11-14

传感器信息, 绕过障碍物; (3)自主导航和定位. 在 GPS 信号接收正常情况下, 机器人会利用 GPS、电子罗盘自动完成导航定位任务; 在 GPS信号丢失情况下, 机器人会利用自身的惯性元件 (码盘、电子罗盘、倾角传感器)推算出当前的位置, 继续完成相应任务. 所以, 与传统机器人相比, 基于多传感器的可变形机器人可以不需要外界的帮助自主地改变自身的构形, 适应外部环境, 更好地完成所要求的任务.

2 可变形机器人系统 (The shape-shifting robot system)

2.1 可变形机器人平台

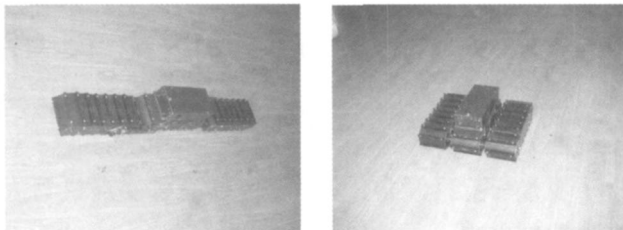
本文以我们研制的可变形机器人为实验平台, 其结构如图 1所示. 变形机器人采用履带式结构, 能够通过构形的改变适应各种地形环境. 它有 9种构形, 其中直线、三角和并排是机器人最基本的三种对称构形, 如图 2所示.



1 摄像头; 2 电源; 3 主控单元; 4 无线控制模块; 5 模块 3 6 模块 1; 7. 模块 2 8 云台

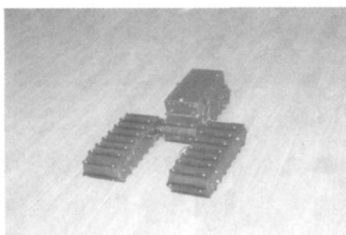
图 1 可变形机器人结构

Fig 1 Structure of the shape-shifting robot



(a) 直线构形

(b) 并排构形



(c) 三角构形

图 2 可变形机器人的对称构形

Fig. 2 Symmetrical configurations of a shape-shifting robot

2.2 控制系统结构

机器人控制系统由主控系统、电机控制系统和传感器反馈控制系统组成. 它采用上、下位机结构. 其控制系统结构如图 3所示.

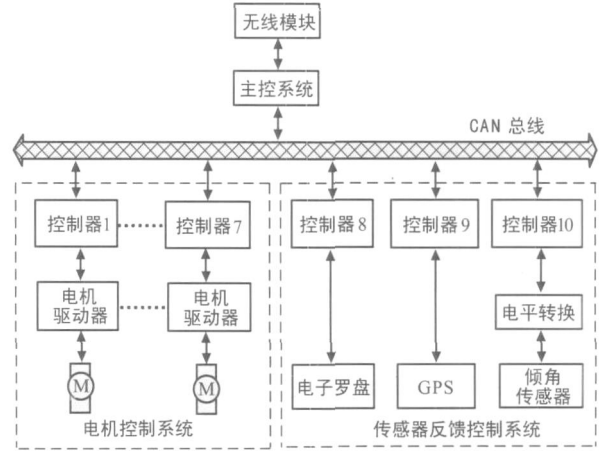


图 3 控制系统结构图

Fig 3 Structure of the control system

主控系统是机器人的决策系统. 其功能是根据传感器反馈控制系统提供的信息, 判断机器人的自身位置和周围环境, 调用相应的控制算法, 来对机器人的运动进行规划. 其次, 主控系统是机器人与监控平台的通信接口, 它可以把传感器返回的数据通过无线模块实时传送给监控平台. 电机控制系统主要用来实现机器人的运动功能.

传感器反馈控制系统包括控制器 8~10、倾角传感器、电子罗盘、GPS和电平转换器. 其功能是通过传感器探测周围环境, 将得到的信息数据传送给各自的控制器, 控制器调用预先制定的算法, 把采集到的信息进行处理, 然后传送给上位机. 电平转换器采用 MAX232芯片, 它是 RS232电平和 TTL电平的双向转换器.

3 可变形机器人的自主控制方法 (Autonomous control method of the shape-shifting robot)

3.1 机器人的自主变形规则

通过实验, 验证了变形机器人在不同环境中的运动性能, 如表 1所示. 其中“ A ”表示最好, “ B ”表示居中, “ C ”表示较差. 由表 1可知, 在直线构形下, 机器人不但具有很强的攀爬障碍物的能力, 而且能够穿过狭长空间, 大大提高了环境适应能力; 在三角构形下, 机器人的稳定性能和爬坡能力都非常好; 在并

排构形下, 机器人可以实现零半径转弯, 运动非常灵活, 消耗的能量最少.

表 1 三种对称构形的运动性能比较

Table 1 Comparison of motion performance of three symmetrical configurations

环境类型	直线构形	三角构形	并排构形
野外不平地面	B	A	C
障碍物	A	B	C
坡度	A	B	C
楼梯	A	B	C
平地	C	B	A
转向	C	B	A
狭长空间	A	C	B
狭小空间	C	B	A

考虑到机器人大多在平地运动, 机器人的初始构形采用并排形态. 对不同的地面和环境, 机器人通过以下方法进行识别并采用相应的最佳构形. 我们以野外不平地面、障碍物、坡度三种环境为例, 基于多传感器信息的机器人变形规则如下:

(1) 野外不平地面

野外不平地面中, 主要考虑倾角仪的信息, 倾角幅值在 10° 以内, 我们将它定义为一般不平地面, 根据倾角仪的反馈, 有 2 种状态:

- 1) 坡度变化慢 (连续采样 10 次, 均方差在 20 之内), 判断为地面条件为平地, 采用并排构形;
- 2) 坡度变化快 (连续采样 10 次, 均方差大于 20), 判断地面条件为不平地, 采用三角构形.

(2) 障碍物

遇到障碍物时, 机器人主要根据码盘、电流值判断障碍物的信息, 以此来决定形状的变化, 分 3 种状态:

- 3) 并排构形状态: 10 s 内码盘信息变化, 电流值出现阶跃且持续居高, 可以判断机器人遇到障碍物, 而且当前构形不能通过该障碍环境, 机器人构形变化为三角构形;
- 4) 三角构形状态: 10 s 内码盘信息变化, 电流值出现阶跃且持续居高, 可以判断机器人遇到较大障碍物, 而且当前构形不能通过该障碍环境, 机器人构形变化为直线构形;
- 5) 直线构形状态: 10 s 内码盘信息变化, 电流值出现阶跃且持续居高, 可以判断机器人遇到很大障碍物, 而且机器人不能通过该障碍环境, 利用电子罗盘、码盘等信息绕开障碍物行走.

(3) 坡度环境

机器人翻越具有坡度的障碍物时主要根据倾角仪的信息来决策, 具有以下 4 种运动状态:

- 6) $0\sim 10^\circ$, 不用改变构形, 采用当前构形运动;
- 7) $10\sim 20^\circ$, 采用越障性能较强、稳定性能较好的三角构形;
- 8) $20\sim 30^\circ$, 采用越障能力最强的直线构形;
- 9) $> 30^\circ$, 利用电子罗盘、码盘等信息绕开坡度行走.

机器人通过传感器返回的信息, 能够准确地判断所处的环境, 以此来采用不同的构形适应环境, 最终完成任务.

3.2 机器人的自主导航方法

机器人通过 GPS 系统确定其地理坐标^[10], 计算出机器人当前位置和目标位置相对于某一方向的偏差角 (本文偏差角是相对于磁北方向的角度), 然后把此偏差角作为电子罗盘的基准角, 控制机器人向目标位置趋近.

如图 4 所示, O 点为移动机器人的初始位置, 经纬度坐标为 (L_0, B_0) , P 点为目标点, 经纬度坐标为 (L_P, B_P) , 虚线圆表示机器人在误差范围内可能停止的地理位置. A 为机器人运动一段时间后的调整方位点, 经纬度坐标为 (L_A, B_A) , B 点为机器人进入盲区点, 经纬度坐标为 (L_B, B_B) , C 点为在盲区的方位调整点, 经纬度坐标由惯性元件推出, D 为机器人出入 GPS 盲区点, 经纬度坐标为 (L_D, B_D) , E 为机器人检测障碍物信息点, 此时机器人不再受导航的控制, 会自动转入越障或避障子程序, 直到机器人越过或绕过障碍物, F 为机器人变形的点, G 为机器人变回原形的点, 机器人经纬度坐标为 (L_G, B_G) , H 为机器人的最终到达点, 经纬度坐标为 (L_H, B_H) .

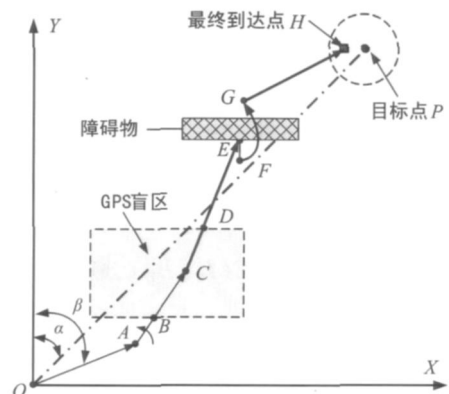


图 4 机器人自主导航示意图

Fig 4 Autonomous navigation of the robot

设置目标点以后, 可以确定 OP 方向角 α :

$$\alpha = \frac{L_P - L_0}{B_P - B_0} \cos B_0 \quad (1)$$

机器人在初始位置的偏转角度 (与 Y 轴的夹角)

γ 是由电子罗盘测出的.

机器人需旋转的角度 θ 为:

$$\theta = \alpha - \gamma \quad (2)$$

当 $\theta > 0$ 时, 机器人左转; 当 $\theta < 0$ 时, 机器人右转.

假设机器人运动几个周期 (周期为机器人采集两次 GPS 值的时间间隔) 后到达 A 点, 判断 GPS 值无效后便采用惯性元件推算定位信息. 机器人运动一个周期到达 B 点, 则

$$B_B = B_A + \frac{vt \cos \gamma}{K_1} \quad (3)$$

$$L_B = L_A + \frac{vt \sin \gamma}{K_2} \quad (4)$$

式中 v 代表机器人的运动速度, γ 是机器人与 Y 轴的夹角, t 为机器人运动的一个周期. K_1 取 30.8 m/s 表示在同一经度下地理纬度变化 $1''$ 时地球表面实际变化的距离.

$$K_2 = K_1 \cos B_A \quad (5)$$

K_2 表示在纬度为 B_A 的情况下经度变化 $1''$ 时地球表面实际变化的距离. 然后再由 (1)、(2) 式判断机器人的旋转方向. 这样, 即使在机器人不能正常接收 GPS 信号时, 也能由惯性元件推算出其位置, 等机器人走出盲区以后, 再重新利用 GPS 系统进行定位.

$E-F-G$ 是机器人通过变形以后越过障碍物或者直接绕过障碍物的路径. 机器人在 E 点检测障碍物信息后, 发现即使是越障能力最强的构形也不能翻越障碍物, 这时机器人会采取避障子程序, 绕过障碍物; 如果发现当前构形不能越过障碍物但变成越障能力较强的构形后能翻越, 则会退回一段距离变成越障能力较强的构形, 当越过障碍物一段距离以后, 会变回运动性能较好的构形, 重新定位, 向目标点进行.

机器人向目标点运动一段时间后, 就会检测所处点是不是目标点, 判断依据是目前所处点与目标点的距离值, 如式 (6) 所示.

假设机器人所处点为 $C(L_C, B_C)$, 则 C 点与目标点 P 距离为:

$$L = \sqrt{[K_1(B_P - B_C)]^2 + [K_2(L_P - L_C)]^2} \quad (6)$$

判断 P, C 的距离 L , 因为 GPS 测量本身存在误差, 所以若 L 的误差在允许范围之内, 则认为机器人到达目标点; 若不在, 则用 C 点坐标取代 B 点坐标, 重新

计算 α , 按照上述判断继续进行, 直到 L 满足要求.

3.3 机器人的自主控制流程图

机器人在野外作业时, 由于环境原因导致无法接收 GPS 信号或者遇到障碍物不能按预定的路线行驶, 这时必须采用相应的措施来保证机器人能够顺利地完成任务. 机器人的自主控制流程如图 5 所示. 由图 5 可知, 机器人在正常接收 GPS 信号和没有遇到障碍物的情况下, 会根据由 GPS 确定的方位角以并排构形前进, 不会有变形动作; 当机器人遇到障碍物后, 会根据倾角仪检测到的信息采取自主变形越障或者直接避障的行为; 当机器人无法接收 GPS 信号时, 会自动执行惯性元件定位程序, 由码盘、电子罗盘、倾角仪和先前获得的 GPS 值推算机器人当前的地理位置信息, 保证机器人的正确导航.

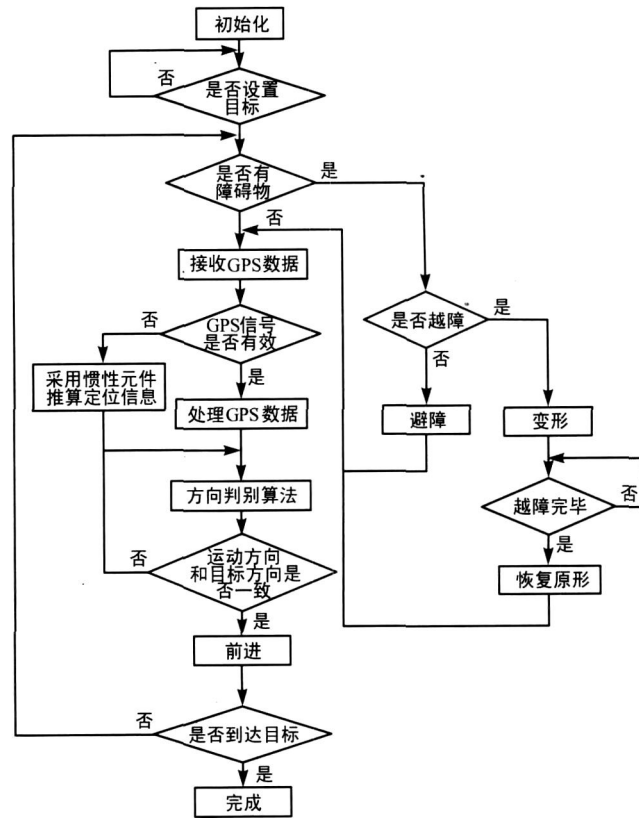


图 5 自主控制流程图

Fig 5 Flow chart of autonomous control

4 实验与分析 (Experiments and analysis)

作者分别做了无障碍物情况下的自主导航实验和通过自主变形翻越小障碍物的导航实验. 图 6 展示了机器人在无障碍物情况下的自主导航过程. 目标点地理位置为北纬 $41^{\circ} 45.6950'$ 、东经 $123^{\circ} 26.5642'$. 图 6 中, (a) 表示设置目标点前机器人的方

位, GPS 数值为北纬 $41^{\circ}45.6945'$ 、东经 $123^{\circ}26.5345'$, 电子罗盘数值为 135° (顺时针偏北方向); (b) 表示设置目标点以后机器人自动调整自己的方向, 使其朝向目标点; (c) 表示机器人途中调整方向的地点, 在自主导航过程中, 由于 GPS 本身测量存在误差 ($< 15\text{ m}$) 和电子罗盘存在误差 ($-3^{\circ} \sim 3^{\circ}$), 机器人会多次调整自己的方位; (d) 表示机器人到达目标点停止的方位, 地理位置为北纬 $41^{\circ}45.6948'$ 、东经 $123^{\circ}26.5340'$.

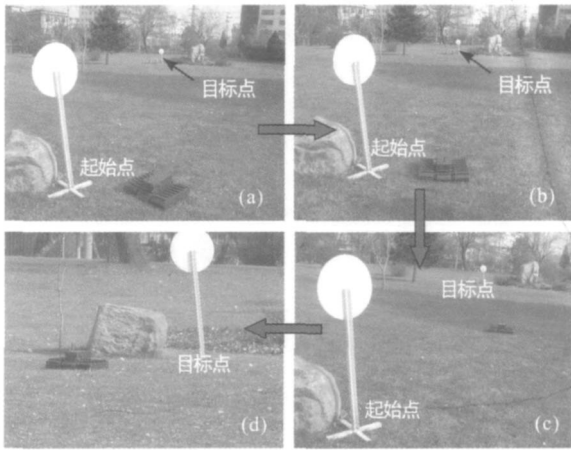


图 6 无障碍物情况下机器人自主导航过程
Fig 6 Process of autonomous navigation of the robot in no obstacle situation

图 7 是自主导航和自动变形越障的实验系统和环境。



图 7 实验系统和实验环境

Fig 7 Experimental system and environment

台阶障碍的高度 $h = 17\text{ cm}$, 起始点地理坐标为北纬 $41^{\circ}45.6915'$ 、东经 $123^{\circ}26.5195'$; 目标点地理坐标为北纬 $41^{\circ}45.6963'$ 、东经 $123^{\circ}26.5635'$. 机器人初始采用转弯性能好的并排构形。

图 8 是机器人自主导航和自动变形越障的过程。其中, (a) 机器人处在起始点位置; (b) 爬上障碍物后检测到并排构形不能越过, 退回开始变成越障能力较强的三角构形, 如 (c) 和 (d) 所示; (e) 机器人通过三角构形越过障碍物的过程; (f) 机器人检测目前地面坡度 $< 10^{\circ}$, 重新变成拐弯性能好的并排构形, 如 (g) 和 (h) 所示; (i) 机器人调整方向的点; (j) 机器人到达目标点, 完成自主导航过程。

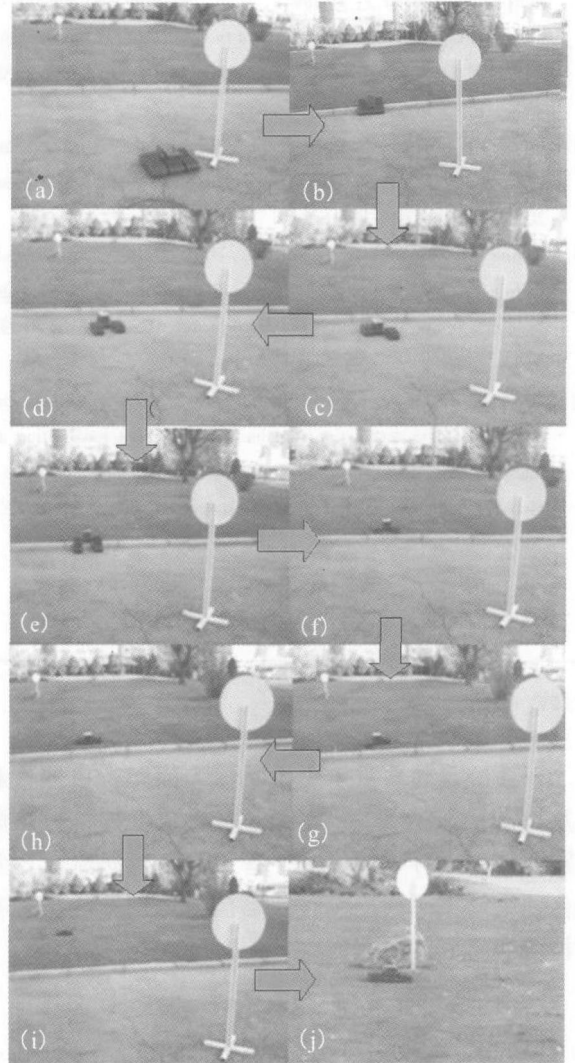


图 8 机器人自主导航和变形越障的过程

Fig 8 Process of the robot's autonomous navigation and shape shifting

实验结果表明, 机器人在自主导航中, 遇到角度垂直的小障碍物或者是具有坡度的障碍物时, 能够及时做出反应, 自动变成越障能力较强的其它构形直接越过障碍物朝目标点逼近。

5 结论 (Conclusion)

结合可变形机器人的平台和运动环境的特点, 本文提出了一种基于多传感器的适于在野外环境运动的机器人自主控制方法, 并通过实验验证了该方法的有效性. 这为以后移动机器人在复杂环境中自主运动奠定了基础, 对下一步自主控制的研究有重要参考价值.

参考文献 (References)

- [1] Murphy R, Casper J Hyans J *et al*. Mobility and sensing demands in USA[R]. Proceedings of the 26th Annual Conference of the IEEE Electronics Society [C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 2000. 138-142.
- [2] Murphy R R. Marsupial and shape-shifting robots for urban search and rescue [J]. IEEE Intelligent Systems and Their Applications, 2000, 15(2): 14-19.
- [3] Yeung S K, Math W S, Korba L, *et al*. Multi-sensor system for mobile robot navigation[A]. Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium [C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 1993. 455-460.
- [4] Perera L D L, Wijesoma W S, Adams M D. On multidimensional assignment data association for simultaneous robot localization and mapping[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 2004. 860-865.

- [5] Lasky T A, Ravani B. Sensor-based path planning and motion control for a robotic system for roadway crack sealing[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2000, 8(4): 609-622.
- [6] Wile P, Saffioti A, Bothe H H. Environment exploration: An autonomous sensory systems approach[J]. IEEE Instrumentation and Measurement Magazine, 1999, 2(3): 28-32.
- [7] Liu J G, Wang Y C, Li B, *et al*. Link-type shape shifting modular robot for search and rescue[J]. High Technology Letters, 2004, 10(Sup): 179-183.
- [8] Liu J G, Wang Y C, Ma S G, *et al*. Analysis of tipover stability for novel shape shifting modular robot[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 19(2): 181-186.
- [9] 王靖, 李斌, 马书根, 等. 模块化可变形机器人控制系统设计与变形方法研究[J]. 机器人, 2006, 28(5): 457-462.
- [10] 王田苗, 邹丹, 陈殿生. 可重构履带机器人的机构设计与控制方法实现[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(7): 705-708.
- [11] 刘大杰. 全球定位系统(GPS)的原理与数据处理[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.

作者简介:

曹会彬 (1980-), 男, 硕士生. 研究领域: 可变形机器人控制方法.

李斌 (1963-), 男, 研究员. 研究领域: 机器人学.

刘金国 (1978-), 男, 助理研究员. 研究领域: 机器人学.

(上接第 478页)

本系统目前着重于飞机蒙皮表面爬行机器人载体及运动控制的研究, 故仅对基于视觉的铆钉缺陷识别算法进行了初步研究. 基于瞬态电涡流及视觉融合理论的飞机蒙皮裂纹缺陷检测识别算法将是本项目后续研究的重点内容.

参考文献 (References)

- [1] AC-91-56 General Structures Harmonization Working Group Report Damage Tolerance and Fatigue Evaluation of Structures FAR/JAR Sec. 25.571[S]. 2003.
- [2] Abers C J, Carroll C W, Kaufman W M, *et al*. Automatic Inspection of Aircraft [EB/OL]. <http://www.tc.faa.gov/its/workshop/techrpt/ar97-69.pdf> 1998.
- [3] Yan W Z, Goebel K F, Evers N. Algorithms for partial discharge diagnostics applied to aircraft wiring[A]. Proceedings of the 8th Joint NASA/FAA/DoD Conference on Aging Aircraft [C/OL]. http://best.berkeley.edu/~goebel/publications_files/AgingAircraft05_r.pdf 2005.
- [4] Xing Z W, Gao Q J. Defects recognition algorithm on magnetogr-

atic image of aging aircraft skin [A]. Multiconference on Computational Engineering in System Applications [C]. Beijing: China Tsinghua University Press, 2006. 921-937.

- [5] Bar-Cohen Y. In-service NDE of aerospace structures—emerging technologies and challenges at the end of the 2nd millennium [J/OL]. <http://www.ndt.net/article/v04n09/bcohen/bcohen.htm>, 1999-09-15.
- [6] Buckley J M, Smith R A, Skramstad J A. Transient eddy currents for aircraft structure inspection—an introduction [A]. Proceedings of the 42nd Annual British Conference on NDT [C/OL]. <http://joe.buckley.net/papers/MB%20200309%20Transient%20Eddy%20currents%20introduction.pdf> 2003-09.
- [7] 袁小芳, 王耀南. 一种模糊支持向量机控制器的研究[J]. 控制与决策, 2005, 20(5): 537-540.

作者简介:

邢志伟 (1970-), 男, 博士, 副研究员. 研究领域: 民航特种机器人, 民航特种设备与系统.

高庆吉 (1966-), 男, 博士, 教授. 研究领域: 机器视觉, 全自主移动机器人.