

文章编号: 0253-2239(2005)09-1233-5

适用于实时避障的新型智能化机器人 敏感皮肤的研究*

王树国 曹政才 付宜利 靳保

(哈尔滨工业大学机器人研究所, 哈尔滨 150001)

摘要: 在未知环境中,实时避障是实现智能化机器人自主工作的关键技术。敏感的皮肤可以使智能机器人具有环境感知和实时决策的能力。研制的敏感皮肤由模块化和带有强数据处理能力的微型红外传感器阵列构成,可以粘贴在机器人表面,依赖于皮肤上的红外传感器来感知外部环境。系统采用了几何光学模型法来测量敏感皮肤与障碍物间的距离。实验结果表明,在感知区域内,敏感皮肤能够实时准确地给出多关节机器人周围的障碍物存在和距离信息,为解决机器人避障问题提供新的范例。同时敏感皮肤的研制也是机器人在传感和控制领域中应用的一次尝试,对促进机器人和各相关科学的发展及提高机器人智能化的水平具有深远的意义,并将有着广阔的应用前景。

关键词: 实时避障; 敏感皮肤; 红外传感器阵列; 测距; 多关节机器人

中图分类号: TP24 文献标识码: A

Study on the Novel Intelligent Robotics Sensitive Skin Suitable for Real-Time Obstacle Avoidance

Wang Shuguo Cao Zhengcai Fu Yili Jin Bao

(Robotics Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract: In an uncertain environment, real-time obstacle avoidance is key technology for a intelligent robot to work autonomously. Sensitive skin endows intelligent robot carrier with an ability to sense surrounding and the ability of real-time decision. The developed robotics sensitive skin is a large-area, flexible, mini-type array of infrared sensors with dataprocessing capabilities, which can be used to cover the surface of robot. Depending on the array of infrared sensors, it endows robot carrier with an ability to sense its surrounding. Distance between sensitive skin and obstacle is measured by using geometric optics model. Experimental results show that the sensitive skin can real-time provide existence and distance information about obstacles for multi-joint robot within sensory area. The development of the sensitive skin means an attempt in sensing and control. It presents a new paradigm in solving problems such as obstacle avoidance for multi-joint robot. It will promote the development of robot and related science in our country and improve intelligent level. This will be of far-reaching significance to the promotion of robot and will have a wide application and promising prospect.

Key words: real-time obstacle avoidance; sensitive skin; array of infrared sensors; measure distance; multi-joint robot

1 引 言

智能化是机器人科学研究主要发展方向之一,机器人的智能主要表现在未知障碍环境中自主工作能力,这是在空间和海洋探索、军事作战、危险环境作业,甚至在未来的服务业中工作的机器人都必须

解决的理论与技术。机器人在未知环境中自主工作必须具有环境感知和实时决策能力:一方面实时采集外界环境信息,另一方面快速进行信号处理^[1~3]。机器人敏感皮肤的研究正是在这种需求上发展起来的,它可以极大地改善机器人的环境感知能力,提高

* 国家自然科学基金(50105002)和哈尔滨工业大学基金(HIT. 2001. 14)资助课题。

作者简介: 王树国(1958~),男,博士生导师,哈尔滨工业大学校长,主要从事机器人机构学、机器人动力学控制与仿真的研究。E-mail: giftczc@163.com

收稿日期: 2004-10-13; 收到修改稿日期: 2004-11-21

其自主工作能力。目前这一领域研究十分活跃。国内,重庆大学李平研制了由理想智能的石英压电材料所构成一种智能化机器人敏感皮肤^[4];张玲研制了一种聚偏氟乙烯(PVDF)仿生皮肤^[5];哈尔滨工程大学理学院林晓艳研制一种光纤智能皮肤^[6];国外,日本佐贺大学信太教授研究室利用压感导电橡胶研制触觉传感系统,检测温度、硬度、热传导特性,并根据检测的数据识别物体^[7]。在1992~1993年间耶鲁大学(美)电子工程系 Cheung 等^[8]提出了一种机器人敏感皮肤系统。剑桥大学人工智能实验室 Antonio Bicchi 等^[9]详细介绍了各种接触式力敏传感器。意大利比萨(Pisa)临床生理学研究所和莫德纳(Modena)大学物理系分别提出一种压电材料触觉传感器阵列^[10]及基于压电特性的高精度谐振压力传感器^[11]。日本农业科技大学 Shinoda H 和 Oasa 研制的无线式传感皮肤,该皮肤是由大量的无线触觉传感器构成^[12]。以上这些“皮肤”用来检测与外界物体相互作用时的接触力或感受外界温度,不能用来测距的。能够实时给出外界障碍物距离、位置信息的这方面敏感皮肤国内外尚罕见到报道。

本文主要研究了基于微型红外传感器机器人敏感皮肤研制的方法,采用模块化结构方式,利用高速数字信号处理器(DSP)和复杂的逻辑器件(CPLD)进行并行信号处理及应用几何光学模型法进行实时测距。实验结果表明,该敏感皮肤提高了机器人对未知环境的感知能力,以实时地给出外界环境中的障碍物存在、特性和距离信息,解决了机器人实时避障的首要问题。

2 敏感皮肤的研制

2.1 系统总体要求

敏感皮肤需要为多关节机器人避障系统实时地提供三种信息:1)短距离障碍物存在的信息;2)障碍物与敏感皮肤间的距离信息;3)实时性好(能够实时检测到以速度 $V \leq 10$ cm/s 行进的障碍物)。敏感皮肤需要设计成接近觉的方式,测距准确,来满足系统要求。由文献[1]可知:较常用的距离传感器包括电容耦合传感器、电涡流传感器、超声波传感器和红外传感器等。每种传感器都有各自优点和缺点,通过折衷考虑设计敏感皮肤时,选用微型红外传感器。

红外传感器发光的波长为 880 nm,属于近红外线,其传感器的输出中包含有可见光成分。实验表明:可见光对敏感皮肤测距影响很大,误差为 5 cm 左右。为了去除可见光对红外传感器测距的影响,通过

如图1的硬件来实现,图中 A1~A5 为运算放大器 OP07。接收信号中的可见光成分主要通过 A2 及相应的元器件来滤掉;其输出信号通过 A3 调制把脉动信号变成直流信号;最后通过 A4 和 A5 所组成的三阶巴特沃兹(Butterworth)滤波器进行滤波,可输出无纹波的直流电压信号。选用的调制频率为 30 kHz 用于滤掉周围可见光的干扰,提高测距的精确性。

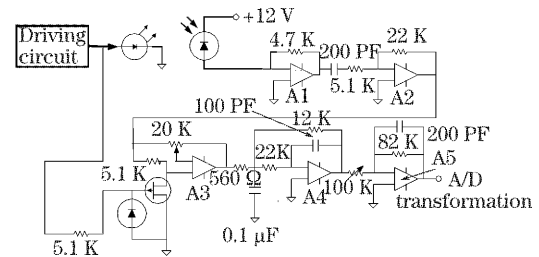


图1 抑制可见光硬件电路图

Fig. 1 Hardware circuit diagram of visible light suppression

2.2 红外传感器的特性

微型红外传感器由发光元件(红外发光二极管 OD8810)和接受元件(光电晶体管 SFH205)两部分组成。传感器的作用是测量红外发光二极管经障碍物反射回能量的大小。传感器输出信号大小受红外发光二极管发射能量、接受光电晶体管检测范围和障碍物表面特性这三种因素决定,所以传感器测量范围受到限制。当传感器与障碍物表面垂直距离为 3.5 cm 时,光电晶体管的输出开始饱和,传感器不能再检测到额外的能量。反之,传感器与障碍物距离超过 23 cm 时,光电晶体管接收信号微弱,且分辨率低,不可以区分出距离信息;在 3.5~23 cm 范围内,红外传感器的输出与距离间呈现单调关系,因而在红外传感器感知范围内,可以利用光电晶体管的输出值来测距。

2.3 敏感皮肤的硬件结构

将研制的机器人敏感皮肤粘贴在多关节机器人表面,依赖于皮肤上的微型红外传感器实时给出未知环境下,机器人周围近距离环境信息。图2为系统硬件结构图,大致包括如下几部分:

- 1) 传感器模块:用来固定传感器和相应处理电路;
- 2) 传感器接口模块:用来实现传感器数据处理逻辑控制;
- 3) DSP+CPLD 模块:执行数据处理任务,另外采用的 DSP+CPLD 进行信号处理可以减少控制电路的体积且提高控制精度;
- 4) 信号变换模块:处理机器人手臂控制器与计

算机(PC)机间的通讯;

5) 计算机:为操作者提供工作界面/开发环境。

6) 译码器接口电路:用于控制外部的输入/输出(I/O)口,来选通传感器模块工作。

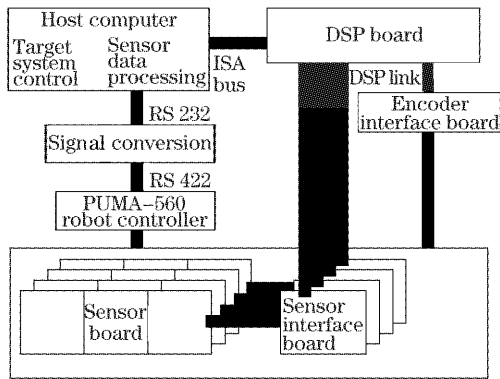


图 2 系统硬件框图

Fig. 2 Hardware diagram of system

2.4 敏感皮肤信号处理方法的确定

实际上敏感皮肤传感阵列的分布范围是很大的,传感阵列输出信号可以是大面积的分布信号或数十甚至上百个离散信号,且多数为非线性,因此计算与分析工作量很大。传统的信号处理方法大都是采用模拟的方法,计算与分析很费时。另外采用模拟处理方法,硬件实现也比较复杂,并且参量调整和稳定性也受到一定限制。显然不能满足系统实时性和准确性的要求。

针对上述问题,为了简单方便地获得理想的输出信号,可以采用一种基于数字信号处理器的数字信号处理的方法。该处理技术具有简单、灵活、误差小和可以消除采用模拟电路引起随机漂移弊端的特点。另外采用数字信号处理器芯片,极大地提高了信号的实时处理速度。首先传感器输出的电信号经过相对简单的放大和滤波;对交变信号进行采样获得数字信号;最后采用快速傅利叶(FFT)变换对信号进行处理。为了能达到工程上要求的精度,提出了相位差法加汉宁(Hanning)窗对误差进行补偿。实验表明,该技术可以提高测量精度,减少随机漂移(特别是温度漂移),改善系统的整体性能。

该系统采用模块化结构,该设计目的是为了实现在并行采集皮肤中传感信息。系统的数据处理仅采用一个中央处理器(CPU)来完成,几个独立的传感器接口模块信息通过共享中央处理器时间来实现,可以大大提高运行速度。中央处理器时间共享机制是通过公平轮循环调度算法来实现的。机器人敏感皮肤处理系统中,该算法将中央处理器处理时间分

为时间片(Time slice),系统会给每一个进程(如:每个传感器模块信息采集、数据处理、多传感数据融合和数字信号处理器模块与计算机间的数据通讯等进程)分配若干个时间片。被调度选中的进程在系统分配的时间片内任务已经完成,系统就会自动发生调度;如果该进程还未完成要求的任务,则调度程序暂时停止该进程的执行,将它排到就绪队列的末尾,等待下一次调度。同时,调度程序会调度当前就绪队列中的下一个进程。这样可以保证就绪队列中的所有进程在一个给定的时间均能得到执行。

3 敏感皮肤测距机理

红外传感器测距常用的方法大致有三种,即光强法、相位法、光学三角法。但这些方法常受被测物体表面的光学特性的影响,测距精度不高。为了提高测量精度,简化外围电路,采用了几何光学模型(基于改进的 Phong 照明模型^[13])。这种模型可以应用在未知环境中,通过红外传感器矩阵可以实时给出外界环境的信息。

红外传感器使用几何光学模型进行测距的过程大致分为三个步骤:1)计算出障碍物的性质;2)确定传感器与障碍物表面的角度或方位;3)根据以上的信息,利用几何光学模型就可以计算出距离。

几何光学模型提供光的能量与物体表面的特性之间简单的定性关系。当光照到物体表面时,在表面会发生散射、吸收或反射。不同的颜色、粗糙度的表面对光的散射、吸收或反射都不同。几何光学模型给出统一的表达式:

$$I = C_0(\mu_s \cdot \mu_n) + C_1(\mu_r \cdot \mu_v)^n + C_2, \quad (1)$$

其中 C_0, C_1, C_2 和 n 为常量,描述不同物体表面的特性; I 为物体表面反射能量强度; μ_s 为光源(红外发光二极管); μ_n 为表面法线; μ_r 为反射量; μ_v 为观测量(红外接收管)。

如图 3 所示为典型的几何光学模型。 μ_s 与 μ_n 的

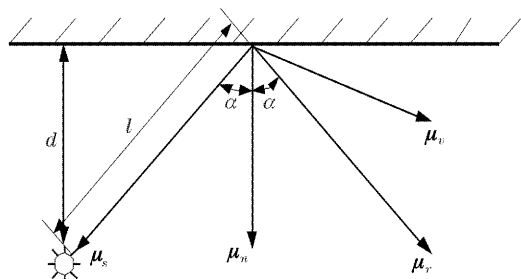


图 3 几何光学模型

Fig. 3 Geometric optics model

夹角为 α 。由于敏感皮肤中的红外传感器的发光二极管与光电晶体管排列近似在同一位置上 ($\mu_s \approx \mu_r$)， μ_s 与 μ_r 的夹角为 2α 。由图 3 整理(1)式，得

$$I = C_0 \cos \alpha + C_1 \cos^n(2\alpha) + C_2, \quad (2)$$

此外，光电二极管吸收的能量 E 是光强 I 、距离 $2l$ 和光电二极管面积 A 的函数：

$$E = IA/(2l)^2, \quad (3)$$

由(2)式，(3)式得

$$E = \frac{[C_0 \cos \alpha + C_1 \cos^n(2\alpha) + C_2]A}{(2l)^2}, \quad (4)$$

由文献[14]可知

$$i = kE, \quad (5)$$

其中 i 为短路电流， k 为常量；

$$d = l \cos \alpha, \quad (6)$$

整理(4)式、(5)式、(6)式得

$$d = \frac{1}{2} \sqrt{kA} \times \sqrt{\frac{C_0 \cos \alpha + C_1 \cos^n(2\alpha) + C_2}{i}} \cos \alpha. \quad (7)$$

在(7)式中， n 常用来描述反射光的反射程度，例如：如果物体表面为镜面，则应用几何光学模型时 n 最好选的值大于 1。常见的物体绝大部分物体表面

是不光滑，会发生漫反射。经多次实验可知公式中 n 取 1； C_2 取 0，可以满足工程上的需要。 $\sqrt{kA}/2 = \epsilon$ 为常数。

$$d = \sqrt{\frac{C'_0 \cos \alpha + C'_1 \cos(2\alpha)}{i}} \cos \alpha, \quad (8)$$

式中 $C'_0 = C_0 \epsilon^2$ 和 $C'_1 = C_1 \epsilon^2$ 用来描述障碍物表面的特性。

4 实验结果

为了验证理论正确性，设计一块 $30 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 敏感皮肤，由 $8 \times 8 = 64$ 套红外传感器构成。首先使用离障碍物最近的传感器模块(所用传感器模块输出的电流值最大的为离障碍物最近的传感器模块)的 4 对红外传感器输出值及利用传感器之间几何关系(每套传感器之间的距离为 2.5 cm)和(8)式联立来计算出 C'_0 和 C'_1 。一旦障碍物表面的特性确定了，又由于敏感皮肤制作的特点(不存在死区)公式中 α 取 0，就可以利用距离公式(8)和传感器输出电流值来计算出 d 。图 4 为测量值(敏感皮肤测量的距离值)与计算值(实际距离值)的比较示意图。

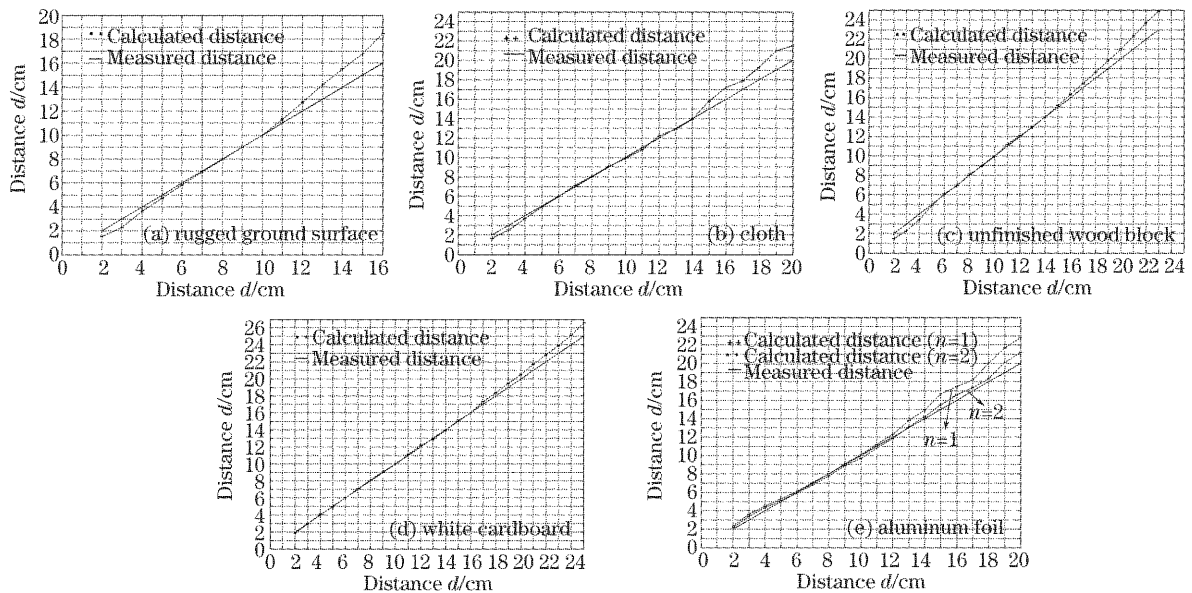


图 4 计算值与测量值对比。(a)粗糙地面，(b)布，(c)未经处理木块，(d)白色硬纸板，(e)铝箔
Fig. 4 Comparison of calculated versus measured distance. (a) Rugged ground surface, (b) cloth, (c) unfinished wood block, (d) white cardboard, (e) aluminum foil

测距的范围为 $2 \sim 23 \text{ cm}$ ，距离超过 23 cm 。当物体与敏感皮肤的距离接近 3.5 cm 时，离物体最近的敏感皮肤中的传感器模块输出开始饱和，可以通过相邻传感器模块输出来测量距离，这样可以补偿

单个红外传感器测距的局限性，提高系统测距的范围。从整个曲线可知在 $6 \sim 15 \text{ cm}$ 范围内测量是较准确的。此外，从图中可以看出敏感皮肤对障碍物为粗糙地面、布、未经处理的木块和白色硬纸板所

测量的曲线大体上是一致的。对粗糙地面的测距较短, 主要由于地面的粗糙度高且不是均匀一致的, 吸收的能量多, 反射率低的缘故, 而金属的铝箔的作为障碍物测量误差比较大, 主要由于 n 选择 1, 其表面比较接近与镜面应该选择 $n > 1$, 即 $n = 2$ 如图 1(e), 其误差缩小了, 可以满足系统的要求。

表 1 给出不同物体表面的特性的描述, 从表中可知光滑的表面, 反射系数 C'_1 高; 反之, 红外光照射到粗糙表面, 光发生了漫反射, 所以粗糙表面物体, 漫反射系数 C'_0 高。通过实验可知, 采用几何光学模型可对测试物体表面定性给出准确的描述。

表 1 不同物体表面特性

Table 1 The reflective properties of various surface

Obstruction	Diffuse coefficient C'_0	Specular coefficient C'_1	n
Rugged ground surface	203.11	0	1
Cloth	190.88	41.12	1
Unfinished wood block	100.77	92.69	1
White cardboard	51.11	105.66	1
Aluminum foil	0	105.22	1
Aluminum foil	0	95.21	2

5 结 论

研制敏感皮肤粘贴在多关节机器人的手臂上能够实现在未知环境下, 机器人地自主工作, 这样可以大大提高了机器人的智能化。

该敏感皮肤有如下特点: 1) 通用性: 理论上, 研制的皮肤可以粘贴在所有运动的机器或机器人上; 2) 重构性: 在外形和尺寸上, 皮肤可以在小范围的变动, 来满足系统要求; 3) 扩展性: 模块化皮肤可以使设计者按照实际需要进行扩展; 4) 灵活性: 单个传感器模块外形标准化, 可以很好的满足复杂机器人外形的需要; 5) 测距方面, 在感知范围内, 利用了几何光学模型来测距, 精确度会大大提高。此模型是红外传感器与障碍物间联系的有效而简单的描述。

参 考 文 献

1 Fu Yili, Cao Zhengcai, Wang Shuguo *et al.*. The application of

- sensors in multi-joint robot system for real-time obstacle avoidance[J]. *Robot*, 2003, **25**(1): 73~79 (in Chinese)
- 付宜利, 曹政才, 王树国等. 传感器在多关节机器人系统实时避障中的应用[J]. *机器人*, 2003, **25**(1): 73~79
- 2 Vladimir J. Lumelsky, Michael S. Shur, Sigurd Wagner. Sensitive skin[J]. *IEEE. Sensors J.*, 2001, **1**(1): 41~51
- 3 Tu Mengfu, Yu Gang. A method of generation for 5-axis robotic laser manufacturing system[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(4): 364~368 (in Chinese)
- 涂孟夫, 虞钢. 五轴框架式机器人激光加工系统轨迹算法研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(4): 364~368
- 4 Li Ping, Wen Yumei. A new tactile sensor array for sensitive skin system of intelligent robot[J]. *Robot*, 1996, **18**(6): 364~367 (in Chinese)
- 李平, 文玉梅. 一种新型智能机器人敏感皮肤的触觉传感器阵列[J]. *机器人*, 1996, **18**(6): 364~367
- 5 Zhang Ling, He Wei, Jiang Yang. Study on the property of bionic skin sensor suitable for robot[J]. *Robot*, 1999, **21**(4): 309~320 (in Chinese)
- 张玲, 何伟, 蒋阳. 一种适合于机器人仿生皮肤传感器的性能研究[J]. *机器人*, 1999, **21**(4): 309~320
- 6 Lin Xiaoyan, Liang Yijun, Zhen Weiji *et al.*. The theoretical and experimental research on fiber-optic intelligent skin [J]. *J. Harbin Engineering University*, 2000, **21**(1): 84~87 (in Chinese)
- 林晓艳, 梁艺军, 郑伟绩等. 光纤智能皮肤的理论与实验研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2000, **21**(1): 84~87
- 7 Dngan Um. Fault tolerance system for modularized sensitive skin [D]. Dissertation of the university of Wisconsin-Madison, 1999
- 8 Antonio Bicchi, J. Kenneth Salisbury, David L. Brock. Contact sensing from force measurements[J]. *Robotics*, 1993, **12**(3): 249~262
- 9 Edward Cheung, Vladimir Lumelsky. A sensitive skin system for motion control of robot arm manipulator [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 1992, **10**(1): 9~32
- 10 Claudio Domenici, Danilo DeRossi. A stress-componet-selective tactile sensor array[J]. *Sensors and Actuators A*, 1992, **13**: 97~100
- 11 B. Morten, G. de Cicco, M. Prudenziati. Resonant pressure sensor based on piezoelectric properties of ferroelectric thick fillms[J]. *Sensors and Actuators A*, 1992, **31**: 153~158
- 12 Hiroyuki Shinoda, Hideki Oasa. Passive wireless sensing element for sensitive skin[C]. *Proc. the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2000, **2**(2): 1516~1521
- 13 P. M. Novotny, N. J. Ferrier. Using infrared sensors and the Phong illumination model to measure distances[C]. *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1999, **2**: 1644~1649
- 14 Li Kejie. *New Edition Sensor—Technology Manual* [M]. Beijing: National Defence-Industry Publishing Company, 2002. 191~235 (in Chinese)
- 李科杰. *新编传感器技术手册* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 191~235