

基于视触觉功能替代的穿戴式触觉导盲技术研究^①

帅立国^{②*} 郑竹林* 张志胜** 周芝庭**

(* 河南科技学院机电学院 新乡 453003)

(** 东南大学机械工程学院 南京 210096)

摘 要 针对视障人群的自主行走课题进行了研究,研制了基于视触觉功能替代的穿戴式触觉导盲装置。该装置通过导盲眼镜上的迷你光学摄像头采集周围环境的视觉图像信息,视觉图像经二值化处理后转换为触觉图像。借助触觉显示器,视障操作者能够在其胸前的虚拟显示平面上以主动触觉方式感知该图像,从而实现对外围环境信息的触觉感知。原理性实验表明该装置能够有效帮助视障者感知路况和识别环境目标,实现自主行走。

关键词 触觉显示,穿戴触觉,视触觉功能替代,二值化图像

0 引言

近年来,随着科学技术的发展,国内外导盲技术研究取得一些成果,相继出现了无线电导盲系统、电波导盲系统、盲人电子眼睛、超声波导盲系统、语音导盲仪等电子导盲设备^[1]。但这些设备存在一些不足:有些功能过于单一,不能满足实际需要;有些稍显笨重,不适合日常携带;有些则价格昂贵,使用成本较高,不能普及使用^[2]。另外,基于红外、声波探测的导引装置虽能给出障碍物的距离和方向等信息,但如果目标很小或很远,则很难准确获取目标信息^[3]。利用电磁和超声测距的装置也能够实现导盲,但大都尺寸较大,不易检测出水平地面的障碍物,不适合动态环境下的导盲^[4]。因此,导盲技术必须有新的发展。

考虑到盲人通常具有敏锐的触觉感知能力,触觉几乎是失去视觉能力的盲人认识三维世界和建立空间概念的唯一信息通道,是获得信息的极为有效的方式^[5],研究人员注重了触觉导盲技术研究,将如何充分开发和利用触觉通道帮助盲人实现自主行走作为导盲技术研究的热点和重要方向。本研究组从事了这方面的研究,并基于视触觉功能替代方法研制了一种穿戴式触觉导盲装置。基于视触觉功能替代的触觉导盲技术通过图像获取装置采集原本应该由视觉器官看到的环境图像信息,并以物理刺激的

方式通过安装于盲人皮肤表面的触觉显示器作用于触觉感受器官,从而让盲人以触觉方式“看”到其周围环境^[6]。

1 原理

视触觉功能替代的技术关键在于如何实现视觉图像的触觉表达。其技术实现主要包括控制中心、视觉图像采集、视触觉图像转换及触觉图文显示等几个模块。控制中心是视触觉功能替代系统的核心,通常采用嵌入式系统,其作用主要包括系统控制和算法处理。图像采集模块通常可以采用价廉物美的普通摄像头作为图像采集传感器,图像采集传感器能够将视觉信号转换成电信号并传输至控制中心。视触觉图像转换模块的载体为嵌入式微处理器,通过它实现一个针对图文数据的算法处理过程,其表现形式为图像处理程序,其功能在于利用数学形态学和边缘检测算法等对视觉图像进行处理,在合理丢弃无用信息的前提下,尽可能降低图文数据量,实现视觉图像的触觉重构,并将图文数据转换成满足当前触觉显示器所要求的触觉图像数据格式。触觉图文显示器是一个物理刺激装置,其功能在于将触觉图像转换成人类触觉感官能够感知的触觉刺激,使人能够通过触觉形式感知图文信息。

图 1 为基于上述视触觉功能替代方法的穿戴式触觉导盲装置原理图。图中,目标物体的光学图像

^① 国家自然科学基金(60475033)和江苏省自然科学基金(BK2007514)资助项目。

^② 男,1968年生,博士,教授;研究方向:触觉显示技术;联系人,E-mail: liguo.shuai@126.com
(收稿日期:2009-05-18)

由摄像头采集后传送至微处理器,微处理器中的图像算法程序对其进行处理后成为触觉图文,并依据杆组传感器信息将相关图文像素数据传送至触觉刺激器,触觉刺激器以物理刺激方式将图文像素数据作用于盲人指端触觉感受器,使其以触觉方式感知到当前位置处的触觉图文的像素点的灰度值,盲人移动手指能够改变当前手指在胸前虚拟坐标平面上的位置,杆组传感器能够将这一位置改变传送至微处理器控制中心,微处理器据此计算出新的指端位置信息,并将新位置处的触觉图文灰度值传送至触觉刺激器,从而使盲人获得新指端位置处的触觉图文信息。如此循环,盲人移动和探索更多的位置后将能够获得前方目标物体的视觉图像信息,从而“看”到目标物体。

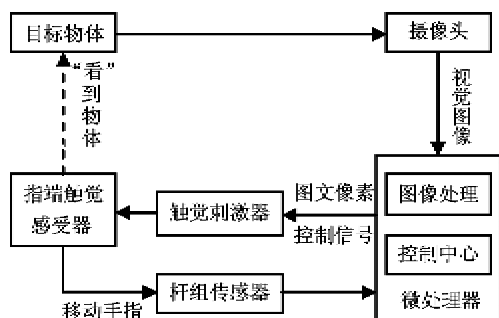
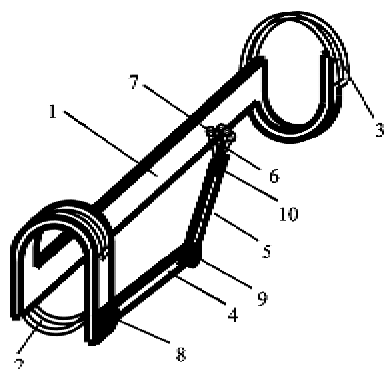


图1 触觉导盲原理

2 系统设计

2.1 机械结构

图2为穿戴式触觉导盲装置的触觉显示器机械结构示意图。如图所示,在结构上该触觉显示器主要包括支架体、左肩尼龙扣带、右肩尼龙扣带、上位



1—支架体; 2—左肩尼龙扣带; 3—右肩尼龙扣带;
4—上位臂; 5—下位臂; 6—指臂; 7—触点; 8—
上位臂角度传感器; 9—下位臂角度传感器; 10—
指臂角度传感器

图2 机械结构示意图

臂、下位臂、指臂、触点、上位臂角度传感器、下位臂角度传感器和指臂角度传感器等。其中,支架体为水平置于操作者双肩上的刚性结构,并通过左侧的右肩尼龙扣带和右侧的右肩尼龙扣带扎紧固定在双肩上,从而为触觉显示提供坐标基准。上位臂、下位臂和指臂以顺序级联的方式连接在支架体上,指臂的末端为触点。支架体和上位臂之间由上位臂角度传感器以测量其位置关系,上位臂和下位臂之间由下位臂角度传感器测量其相互位置关系,指臂和下位臂之间由指臂角度传感器测量其位置关系。

基于上述方案的触觉显示器结构不影响盲人正常的掏衣服口袋、拉开衣服或解开纽扣以及吃饭等动作,人的手臂是自由活动的,不需要固定连接在杆系结构上,其外在形象与常人也基本没有差别,而且便于穿戴,易于为盲人所接受。

2.2 虚拟显示平面

盲人胸前区的虚拟触觉显示平面如图3所示。图中 O 为坐标基准, OA 为上位臂, AB 为下位臂, BC 为指臂, α 为上位臂 OA 与支架体水平轴方向的夹角, β 为上位臂 OA 与下位臂 AB 之间的夹角, γ 为下位臂 AB 与指臂之间的夹角。 OA 、 AB 和 BC 顺序级联构成一个围绕 O 点转动的杆组。触觉显示器可以采用 OA 和 AB 构成的二臂杆组,也可以采用 OA 、 AB 和 BC 构成的三臂杆组,或者其他更为复杂的杆组。由触觉刺激点(即触点)构成的触觉刺激器即安装于杆组的末端。



图3 虚拟触觉显示区域

如果触点设置在 B 处,则触点可以到达的空间范围为以 $|AB - OA|$ 和 $|AB + OA|$ 为半径的扇形圆环,此时,触觉显示可取图中点状填充的区域为虚拟触觉显示平面。如果以过 O 点水平向右的方向为 X 轴,以过 O 垂直向上的方向为 Y 轴,则触点 B 的

坐标为

$$X_B = OA \times \cos\alpha + AB \times \cos(\pi - \alpha - \beta)$$

$$Y_B = AB \times \sin(\pi - \alpha - \beta) - OA \times \sin\alpha$$

当以指臂末端 C 为触觉刺激点,触点 C 的坐标可表示为

$$X_C = OA \times \cos\alpha + AB \times \cos(\pi - \alpha - \beta)$$

$$+ BC \times \cos(\alpha + \beta + \gamma)$$

$$Y_C = AB \times \sin(\pi - \alpha - \beta) - OA \times \sin\alpha$$

$$- BC \times \sin(\alpha + \beta + \gamma)$$

当有个指臂和多个触觉刺激点时,可照此类推算计算出各触点的位置坐标。

上述虚拟触觉显示平面为一矩形区域,因而能够与触觉图像之间建立如图 4 所示的图文映射关系。当操作者用指端带动触觉刺激器和杆组在胸前移动时,微处理器能够依据杆组角度传感器参数实时计算出触觉刺激点的当前坐标,并依据当前位置及触觉显示区域和触觉图像之间的映射关系得到当前位置处的触觉图文像素点的参数,即“0/1”,进一步,系统可据此驱动触觉刺激器使盲人感知到该触点位置处的触觉图文参数,当盲人移动指端时,其感知到的触觉图文参数也随之改变,当指端遍历更多的位置时,盲人将能够以主动触觉方式感知目标物体的视觉图像。

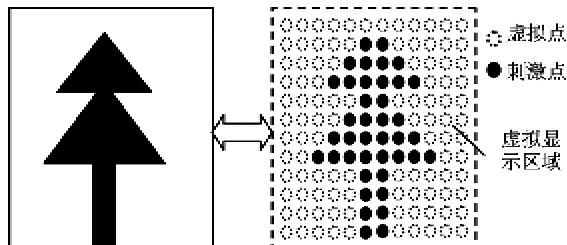


图 4 触觉图像与显示区域映射关系

2.3 触觉刺激器

触觉刺激器是通过物理刺激使人获得触觉感知的装置,触觉刺激器可以是阵列式结构,也可以只有一个刺激点。触觉刺激装置的设计原则首先是要满足人的感觉需求,即感觉不仅要温和舒服,对皮肤无损伤,而且还要具有较宽的频率响应和较大的动态范围,其次是要做到体积小、重量轻、低电池能耗,且便于和计算机连接。

目前国内外实现人工触觉的物理刺激方式主要包括气动刺激、振动刺激、神经肌肉刺激、电刺激、射流刺激、顶针刺激、电流变液、磁变液体、热刺激和表面声波等^[7]。其中振动刺激、气动刺激和电刺激较

为普遍。气动刺激的最大缺点在于其带宽较小,约 10Hz。电刺激体积小,便于安装和与计算机连接,深受研究人员青睐,其缺点在于易引起不舒服的感觉(如刺痛感),动态范围小,一致性较差。其他的触觉刺激方式也均存在着这样或那样的不足,实际应用中常结合应用需求进行选用。

本课题研究中采用振动刺激方式为盲人提供感觉,它具有体积小、价格低廉、能耗低和便于控制的优点。振动刺激器安装在结构中的指臂末端,人的指尖附在指臂末端,通过不断地移动感知整幅图像。现有触觉刺激器大都为点阵结构,不仅成本高昂,而且功耗也较大等,本课题采用基于虚拟平面的触觉显示模式,仅在盲人指端所在区域为其提供感觉,因而仅用有限的几个触觉刺激器即能够实现更大阵列的触觉图文显示,从而提高图像的分辨率。通过映射计算使触觉刺激参数与处理后的图像像素相对应,这种触觉显示方法可以显示任意分辨率的图像,分辨率较点阵式的触觉显示结构要高。该方法不仅成本低廉,而且功耗也较低,大大增强了触觉导盲装置的实用性。

2.4 图像处理

人类的视觉感知过程和触觉感知过程存在着很大的不同。在视觉感知过程中,人们用眼睛观察到图像的细节越多,获得的图像信息就越多,对图像的理解也就越深刻,所以在图像中保留的细节越多越好。而在触觉过程中,过多的细节则可能混淆人们的感受,弱化人们特别是盲人的触觉能力,甚至会导致错误的判断。因此,视觉图像到触觉图像的处理过程本质上是一个视觉图像的二值化过程,但又不同于传统意义上的二值化过程。视触觉图像处理不仅要保留和强化图像中目标对象的边缘轮廓,而且还要弱化和删减细节成分,以最大限度地帮助盲人识别图像中的目标对象。

图像二值化是一项基本技术,其技术关键在于如何结合应用背景确定合理的阈值。现有的阈值选取方法虽然很多,但大都具有较强的针对性和局限性。本课题研究中采用获得广泛应用的 Canny 算子作为边缘检测方法。传统的 Canny 算子具有信噪比高、定位准确和单边响应的优点^[8],但当整幅图像使用固定的高、低阈值进行分割时,无法消除局部噪声干扰,而且在检测出假边缘的同时还会丢失一些灰度值变化缓慢的局部边缘。为改善效果,课题组对传统的 Canny 算法进行了改进^[9]。改进后的边缘检测方法主要包括以下几个步骤:

- (1)采用高斯滤波器平滑图像;
- (2)采用一阶偏导的有限差分计算梯度幅值和方向;
- (3)对梯度幅值进行非极大值抑制;
- (4)采用阈值分割方法估算出合理的阈值 h ,以此控制在梯度图中边缘检测的起始点,并通过对 8 个方向上的梯度值进行比较实现边缘跟踪。

对于 3×3 矩阵,即

$$A = \begin{bmatrix} a_{i-1,j-1} & a_{i-1,j} & a_{i-1,j+1} \\ a_{i,j-1} & a_{i,j} & a_{i,j+1} \\ a_{i+1,j-1} & a_{i+1,j} & a_{i+1,j+1} \end{bmatrix}$$

其中 $a_{i,j}$ 为像素点坐标 $[i,j]$ 的梯度值, $a_{i,j}$ 和相邻的像素点共形成 8 个方向上的梯度,其中必然存在一个最大梯度值 $a_{\max}$:

$$a_{\max} = \text{Max}\{e_1^T A e_1, e_1^T A e_2, e_1^T A e_3, e_2^T A e_1, e_2^T A e_3, e_3^T A e_1, e_3^T A e_2, e_3^T A e_3\} \quad (1)$$

其中:

$$e_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, e_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, e_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{i-1,j-1} & a_{i-1,j} & a_{i-1,j+1} \\ a_{i,j-1} & a_{i,j} & a_{i,j+1} \\ a_{i+1,j-1} & a_{i+1,j} & a_{i+1,j+1} \end{bmatrix}$$

当对应最大梯度值 $a_{\max}$ 的像素点为 1 个时,以该点作为下一次跟踪的中心点,并重复步骤(4),进行下一次边缘跟踪。当存在多个像素点对应最大梯度值 $a_{\max}$ 时,同时以这些像素点作为下一次跟踪的中心点,重复步骤(4),直至找到所有的边缘像素点,最终完成图像边缘轮廓的提取。

对 Canny 算法的改进能够较好地确定下一跟踪点的位置,提高抑制噪声的能力,避免以低阈值 h_1 带来的下一检测点发散的可能性,从而避免弱边缘强化和边缘像素结块的现象。

2.5 控制单元

控制单元主要完成图像采集、图像处理和控制在触觉刺激器以实现实时触觉显示等任务,由于图像处理工作涉及大量图像数据的实时计算,所以控制单元采用了数字信号处理器(DSP)与 ARM 控制器相结合的架构。

图 5 为控制单元的原理框图。图中,ARM 选用带有 ARM7TDMI-S 核的微控制器 S3C4510B, S3C4510B 片内资源非常丰富,可以为系统提供工业标准的 UART、定时器、IIC 接口、丰富的 I/O 口资源、

以太网控制器和高容量外部存储器接口^[10]。DSP 选用 TI 公司生产的具有较强图像处理能力的 TMS320DM642,该芯片基于改进的 C6x+ 内核并进一步集成了视频音频接口、以太网接口和 PCI 接口等片上接口,具有多个处理单元,在同一个周期内最多可执行 8 条并行指令,大大提高了运行速度。

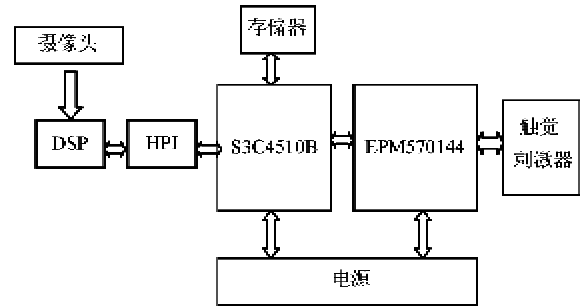


图 5 控制单元设计框图

触觉导盲任务中,摄像头获得的图像信息通过 DSP 处理器 TMS320DM642 进行图像采集和处理,从而得到能够用于触觉显示的二值化图像,进一步地, DSP 通过主机接口(HPI)把二值化图像信息传送到 ARM 控制器 S3C4510B,从而完成触觉图像采集过程。ARM 控制器获得触觉图像后,依据预先建立的触觉图像和虚拟触觉显示区域之间的映射关系,以及当前触点位置,驱动触觉刺激器完成触觉显示控制。为达到较好的触觉显示效果,触觉刺激器控制单元选用 Altera 公司生产的复杂可编程逻辑器件(CPLD) EPM570 芯片。EPM570 具有 570 个逻辑单元,借助于 Quartus II 软件,能够方便地把 EPM570 设计成所需要的脉宽调制(PWM)逻辑,和方便地管理自己的设计,从而通过对 PWM 频率和占空比的调节非常方便地实现触觉刺激器振动频率和强度的调节。

3 实验

为验证触觉导盲装置的有效性,课题组进行了以“WC”为环境目标的识别实验。图 6 为“WC”环境目标的图像处理结果比较,其中(a)为原始图像,(b)为传统 Canny 算子的处理结果,(c)为改进的 Canny 算子的处理结果。由图可见,(c)的效果明显好于(b),噪声明显减少,基本满足视触觉图像处理要求,也更适合于触觉图文显示。

实验结果表明,盲人通过该实验装置可以有效

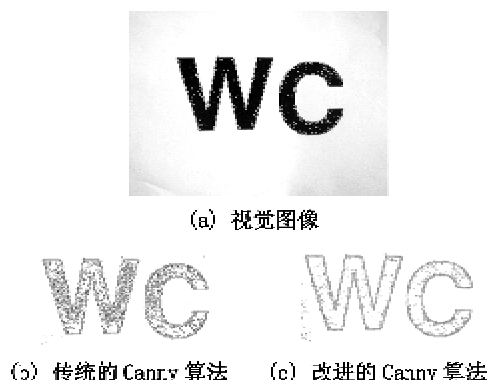


图 6 图像处理结果比较

地识别摄取到图像信息。图 7 为盲人识别“WC”指示牌的触觉显示过程。

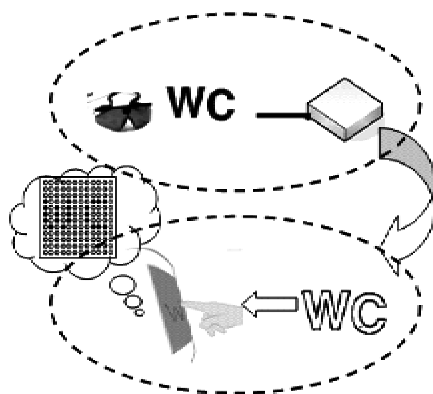


图 7 触觉导盲示例

4 结论

本文基于视触觉功能替代方法设计了穿戴式触觉导盲装置,成功实现了触觉对视觉的功能替代,使盲人借助触觉显示器即能够有效识别和感知视觉图文对象。装置在技术方案上以盲人胸前区作为虚拟

触觉显示平面,触觉刺激器只有有限的几个触点,避免了阵列式触觉显示器价格昂贵的缺点,并具有体积小、重量轻、成本低、能耗低、穿戴方便等优点,能够较好地满足盲人自主行走的需求,并广泛应用于盲人群体。

本文视触觉功能替代技术除应用于盲人自主行走外,还可进一步应用于助老助残、盲教和娱乐等相关领域。

参考文献

- [1] Blasch B B, Long R G, Griffin-Shirley N. National evaluation of electronic travel aids for blind and visually impaired individuals: implications for design. In: Proceedings of the 12th Annual Conference of Rehabilitation Engineering Society of North America, New Orleans, USA, 1989. 133-134
- [2] Brabyn J A. New developments in mobility and orientation aids for the blind. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 1982, 29 (4): 285-289
- [3] 张臻,于海勋,刘芳.基于人机交互的红外探测式智能导盲装置设计.现代生物医学进展,2007,7(10):1588-1590
- [4] 曹玉华.超声测距系统设计及其在机器人模糊避障中的应用:[硕士学位论文].青岛:中国海洋大学通信与信息系统系,2007.7-9
- [5] 孙建刚.基于视触融合的机器人物体识别系统的研究:[硕士学位论文].西安:河北工业大学机电电子工程系,2006.10-11
- [6] Weiss P. The seeing tongue: In-the-mouth electrodes give blind people a feel for vision. *Science News*, 2001,160(9): 140
- [7] Shimoga K B. A survey of perceptual feedback issues in dexterous telemanipulation: part II, finger touch feedback. In: Proceedings of the IEEE Virtual Reality Annual International Symposium, New York, USA, 1993. 271-279
- [8] 贾永红.数字图像处理.武汉:武汉大学出版社,2003. 138-140
- [9] 韩丽娟,帅立国,古春笑.图像转换技术在动态触觉中的应用.中国科技论文在线,2008,6(290):1-6
- [10] 李驹光.ARM 应用系统开发详解—基于 S3C4510B 的系统设计.北京:清华大学出版社,2003.74-77

Research on the wearable blind guiding technique based on touch-vision substitution

Shuai Liguó^{***}, Zheng Zhulin^{*}, Zhang Zhisheng^{**}, Zhou Zhiting^{**}

(^{*} School of Mech-Electronics, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang, 453003)

(^{**} Department of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract

To realize the autonomous walking for visually impaired people, a wearable blind guiding device based on the touch-vision substitution technique was proposed and developed. The device can collect environmental images by a mini optical monitor fixed on the guiding glasses, and convert the vision images into the tactile images in a binary format. The binary tactile image array can be perceived by the visually impaired operators in an active way with a tactile display on the virtual screen in front of their chest, and thus they can understand road conditions and identify the environmental objects. The experimental results show that this blind guiding device can help visually impaired users walk independently and effectively.

Key words: tactile display, wearable device, touch-vision substitution, binary image