

DSP 技术在砂轮地貌三维重构中的应用*

龚俊锋, 祁 辉

(三明学院 物理与机电工程系, 福建 三明 365004)

摘要:为了检测砂轮的磨损状况,提出了一种线结构光检测方法,对砂轮的地貌进行了三维重构。为满足工程应用需求,将数字信号处理器(DSP)应用到砂轮的结构光检测中,利用 DSP 强大的数值运算能力,对摄像机采集得到的图像数据进行了实时处理分析,并基于 Snake 算法提取出了结构光投射在砂轮表面上的光条边缘的连续轮廓,使用定标矩阵将连续轮廓的图像坐标转换成物理坐标,从而提取出了砂轮表面上的高度数据,重构出了砂轮的三维地貌,最后对砂轮地貌特征进行了分析,为研制商品化的砂轮在线检测装置打下了基础。

关键词:砂轮地貌;线结构光;数字信号处理器;Blackfin

中图分类号:TH117.1;TH393;TG70

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2010)10-0025-05

Application of DSP in 3D reconstruction of grinding wheel

GONG Jun-feng, QI Hui

(Department of Physics and Mechanics and Electronics, Sanming University, Sanming 365004, China)

Abstract: For grinding wheel wear measurement, the linear-structured light method was used to reconstructing 3D morphology of grinding wheel. In order to meet the need of engineering, digital signal processor(DSP) was applied into vision detecting of grinding wheel. By the powerful computation of DSP, images from camera were real-time analyzed, and based on the Snake algorithm, continuous edge of structured light which projected on the surface of grinding wheel was extracted. The image coordinates were transformed to physical coordinates, according to the calibration matrix. And then the 3D morphology was reconstructed. At last the feature of grinding wheel was analyzed, which make a base for the development of commercial products.

Key words: morphology of grinding wheel; linear-structured light; digital signal processor(DSP); Blackfin

0 引 言

砂轮的磨损是磨削加工中经常遇到的问题之一,砂轮的钝化通常会导致磨削效率的下降,磨削温度的上升,进而导致工件的烧伤。要避免砂轮磨损所带来的问题,除了开发在线自动修整技术外,如 ELID 磨削,另一个途径就是对砂轮的磨损进行检测。目前,砂轮磨损的检测方法主要分为直接检测和间接检测两类。直接检测是直接对砂轮表面的地貌进行检测,通常是使用轮廓仪、扫描电镜、印迹法等手段进行检测。

间接检测是利用在磨削过程中所产生的二次信号进行检测,如:磨削力、温度、功率、声发射信号或多种信号的融合等。

间接检测方法快捷简便,不需要中断磨削过程,可实现在线监测。但是由于是利用的二次信号,其结果不够直观。直接检测方法直接对砂轮表面进行检测,结果准确可靠,但是通常需要将砂轮从机床上拆卸下来,检测过程较为繁琐。

近年来,一些基于机器视觉的方法被提了出来,如基于图像处理的砂轮磨粒的磨平面面积检测^[1]、金属碎屑物检测^[2]、基于激光三角测距的砂轮地貌测

收稿日期:2010-06-21

基金项目:福建省青年人才创新资助项目(2007F3091);福建省服务海西重点资助项目(HX200804);三明学院科学研究基金资助项目(B0829/Q)

作者简介:龚俊锋(1978-),男,湖北秭归人,博士,主要从事检测、机器视觉、嵌入式系统等方面的研究. E-mail: dida-gongjunfeng@sohu.com

通信联系人:徐西鹏,男,教授,博士生导师. E-mail: xpxu@hqu.edu.cn

量^[3]、基于聚焦融合的三维重构^[4]、双目视觉检测^[5]、线结构光扫描^[6]等,这些方法兼具了直接与间接方法的特点,但都存在着处理速度慢,效率低下的问题,尚不能达到实际应用的要求。

本研究基于线结构光测量原理,对砂轮的地貌进行直接的三维重构。利用 DSP 处理器的高速数字信号处理能力,设计了一套砂轮地貌的三维地貌重构装置。该装置直接以砂轮地貌为对象进行检测,得到砂轮地貌的高度数据,并对结果进行了分析。嵌入式 DSP 系统结构紧凑,且适宜于深度数字信号处理。相比于基于 PC 的处理系统,在体积和处理速度上具有一定的优势,在 DSP 系统上实现结构光测量算法,为研制能附加在磨床上的、成本低廉的砂轮磨损的视觉检测装置打下了基础。

1 基于线结构光的砂轮测量装置

1.1 测量原理

结构光视觉三维检测^[7-8]是一种将具有已知空间几何分布的单个或多个光束投射到被测物体表面,通过恢复投射点的空间位置来计算物体深度分布的方法。本研究采用的测量方法如图 1 所示,激光器投射出一窄的激光平面,当与砂轮相交时可以在物体表面产生一明亮的光条,该光条由于受砂轮地貌起伏变化而受到调制,从而使投射在砂轮表面的激光光条蕴含了砂轮表面的深度信息。通过标定激光平面与摄像机成像的图像坐标之间的对应关系,可以提取出砂轮表面各点的相对高度。

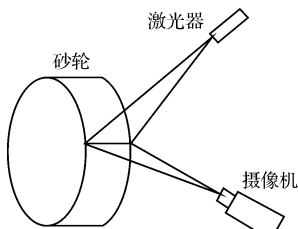


图 1 结构光测量示意图

1.2 系统硬件结构

整个硬件系统如图 2 所示,本研究采用了以 Blackfin DSP 处理器为核心控制器的硬件结构,包含了功率为 30 mW,波长为 650 nm 的线激光器, PAL 制式摄像机,带减速器的步进电机, Blackfin537 EZ-kit 开发板, AV-Extender 视频扩展卡等部件。

在本研究中,所有的开发工作是在砂轮机上完成的。带减速器的步进电机固定在砂轮机工作台上,以直径为 20 mm 的滚轮与砂轮接触,带动砂轮转动。摄

像机与激光器通过夹具固定保持一定的几何关系。并通过三脚架放置在砂轮机前方适当的位置,以便使摄像机能够对准激光束在砂轮上投射的光条。摄像机采集的信号通过视频线输出,接入到视频扩展卡,视频扩展卡上的视频转换芯片 AD7183 将视频信号转换成数字信号,再通过 Blackfin 的通用并行接口 (PPI) 输入到 Blackfin 处理器。处理器对采集得到的图像进行处理,提取光条边缘的起伏信息,并通过事先标定得到的定标矩阵,将其转换成砂轮地貌的相对高度信息。在完成一帧图像的处理后, Blackfin 处理器向步进电机发出指令,驱动电机带动砂轮转动一定角度,来测量下一位置的砂轮地貌。

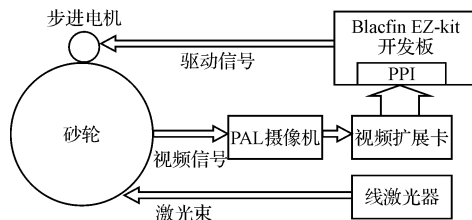


图 2 系统硬件结构框图

1.3 系统软件结构

测量系统在 Blackfin 处理器控制下完成了图像的采集、处理以及摄像机与步进电机动作的配合。Blackfin^[9]是一款集成 DSP 和 MCU 功能的新型处理器,并且为图像处理作了专门的优化,能很好地完成图像处理与电机控制的任务。整个处理程序在 VisualDSP++ 上进行开发,通过采用 ADI 提供的系统服务程序和驱动程序框架,简化了访问控制底层硬件方法,加快了程序开发过程,程序编译链接完成生成 DXE 文件,并下载到 EZ-kit 开发板上进行执行。控制程序的流程图如图 3 所示。

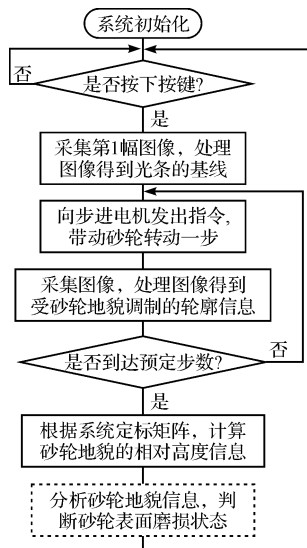


图 3 程序流程图

1.3.1 系统初始化

初始化包含了两个部分:一部分是系统本身的初始化过程,包含有设置处理器和 SDRAM 运行频率,为所用到的系统服务程序^[10]如中断管理器、DMA 管理器、标志控制等分配内存空间等。这部分属于例行化操作,几乎所有的应用都需要运行这些步骤。另一部分则是与应用密切相关的初始化过程,主要包含设置视频转换芯片 AD7183 的运行参数,在内存中为采集的图像开辟缓冲区等。

本研究采用了 PAL 制式视频信号的摄像机,摄像机的模拟 PAL 信号输入到视频扩展卡,由 AD7183 将其转换成 ITUR 656 标准的数字视频格式,并通过 PPI 接口输入到 Blackfin。本研究采用了 ADI 的设备驱动程序框架以完成相关的设置。设备驱动程序是一组标准的 API,它将底层对硬件寄存器的操作简化为对 `adi_dev_Control` 函数的调用,并赋予相应的命令参数。本研究对 AD7183 采用了默认参数进行初始化。

PPI 接口是视频扩展卡与 Blackfin 的数据通道,它可以设置成直接支持 ITUR656 模式的数据输入,而且可以设置对视频数据的选择性输入。由于 ITUR656 视频数据中,有不少冗余信息,为了减小后续的数据传输和处理工作量,本研究设置 PPI 只接收有效视频 (Active Video),并且只接收奇场像的亮度信息,而不接收色度信息,这样可以使原本要传输一帧 (Frame) 的数据量由 1728×625 字节减小为 720×288 字节,数据量减少了 5 倍。

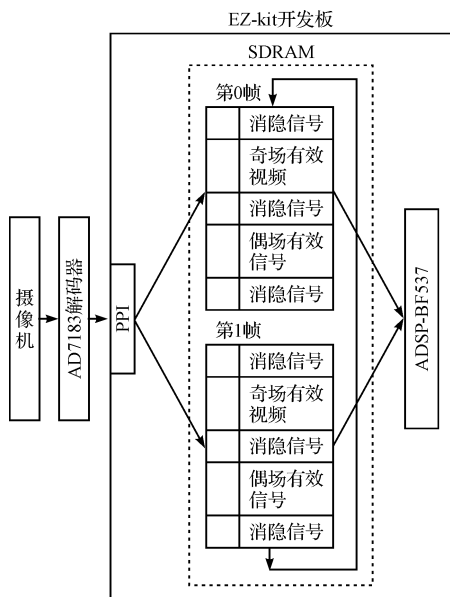


图 4 视频信息流程图

采集的图像数据会存储在 SDRAM 开辟的缓冲区中,在视频应用中,通常会有多个缓冲区,以确保不会

覆盖尚未处理完的视频帧。本研究开辟了两块缓冲区,并采用了一种“环回链接”技术,交替填充两块缓冲区,以形成“乒乓缓冲”模式。其示意图如图 4 所示。

1.3.2 图像处理

由于砂轮地貌的起伏相对于线激光投影到砂轮上的光条来说很小,所以不能使用常规的检测光条中心的方法来得到线结构光投影轮廓。这里采用了一种提取光边缘的方法来检测砂轮地貌。本研究以两步得到砂轮表面的线结构光投影轮廓:

(1) 利用 Hough 变换得到光条的基线。

Hough 变换^[11]是一种有效的检测直线的算法。设采集一帧图像为 $f(x,y)$,首先通过 Otsu 阈值分割方法得到二值图像 $f'(x,y)$ 。对于图像 $f'(x,y)$ 上的值为 1 的点 (x,y) ,根据下式进行变换可得到一系列的 ρ 和 θ :

$$x \cos(\theta) + y \sin(\theta) = \rho \quad (1)$$

其中, θ 是图像中可能存在的直线与 x 轴夹角, ρ 是直线与原点的距离,每对参数都唯一的表征了二值图像上一条可能的直线,由此可以将二值图像 $f'(x,y)$ 转换成 ρ 和 θ 坐标上的函数 $R(\theta,\rho)$,由 $R(\theta,\rho)$ 的最大值可以得到最长的直线的位置。

如图 5(a)所示,光条中的黑色直线就是 Hough 变换得到的图像最长的直线,此直线近似在光条的中心。所以,砂轮地貌的起伏信息就可以此基线为基础演化得到。由于光条的位置在砂轮转动的时候基本不变,所以每次检测的时候只需要检测一次基线。

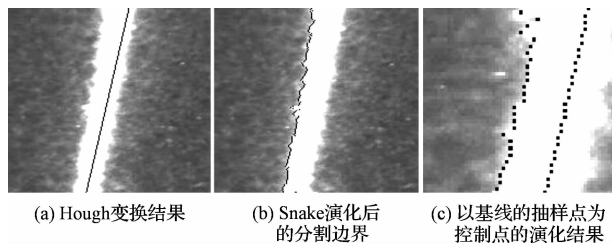


图 5 光条边界的分割

(2) 利用 Snake^[12]方法演化得到砂轮地貌信息。

本研究利用光边缘的变化来提取高度信息,与常规的提取光条中心线的方法相比,可以大大提高测量的分辨率,适宜于对砂轮表面微刃的测量。在这里笔者采用了 Snake 演化方法进行光条边缘的检测。Snake 演化方法是以一条完整的曲线为基础,让曲线上的控制点在图像场和曲线内部能量的双重约束下,演化到最终的边缘。该方法的最大优点是可以比较方便的得到一条完整连续的分割曲线。

在这里使用上一步得到的基线为 Snake 演化的初始曲线,定义曲线上每个控制点的能量函数为:

$$E_{\text{snake}}(v) = \alpha E_{\text{int}}(v) + \beta E_{\text{image}}(v) \quad (2)$$

式中 $v(s) = (x(s), y(s))$ —曲线的参数方程; (x, y) —坐标; α, β —各项的权重系数; E_{int} —曲线内部能量; E_{image} —图像控制能量。

E_{int} 由两部分决定:一部分取决于曲线各点相互距离的均匀性,在本研究中笔者让曲线各点都只沿着平行于 y 轴方向演化,所以这部分可以不予考虑;另一部分是曲线的曲率。由于固定了各点的演化方向为 y 轴方向,所以曲线内部能量,用差分法可以表示为:

$$E_{\text{int}}(v) = |y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1}| \quad (3)$$

E_{image} 一般根据实验者根据情况规定,由于光条的亮度均匀而且比其他地方明显明亮,所以 E_{image} 定义如下:

$$E_{\text{image}} = f_{\text{max}}(x, y) - f_i(x, y) \quad (4)$$

式中 $f_i(x, y)$ —图像中 snake 曲线当前控制点的灰度值; $f_{\text{max}}(x, y)$ —图像中最亮处的灰度值。

这种定义简化了图像对 Snake 影响的计算,有利于提高系统的响应速度。

在确定好 Snake 曲线演化的能量函数后,规定 Snake 演化只沿着负 y 轴方向运动,以基线为初始演化曲线,计算每个控制点的 E_{snake} 能量,设定一阈值 T ,当 $E_{\text{snake}} > T$ 时,停止该点演化,当所有控制点停止演化时,即可得到最终演化边界。

如图 5(a) 所示,黑线是采用 Hough 变换得到的基线,并以此作为 Snake 演化的初始曲线,Snake 演化最终的分割边界如图 5(b) 所示。以基线的抽样点为控制点的演化结果如图 5(c) 所示,图中结果经过了局部放大。

使用 Snake 演化可以得到一条完整连续的分割线,该线受到砂轮地貌的调制,蕴含了砂轮地貌的高度信息。使用定标得到定标矩阵,可以将分割线的上每个点的图像坐标转换成物理坐标,从而得到砂轮表面的高度数据。

2 砂轮地貌重构与分析

实验采用的砂轮为 60# 碳化硅砂轮,大小为 $\phi 200 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 32 \text{ mm}$,线激光垂直于圆周方向投射到砂轮表面,步进电机在通过滚轮带动砂轮转动,摄像机连续拍摄下一系列的图像,在 Blackfin 处理器的处理下,可得到一系列的连续的 Snake 演化曲线,利用这些曲线,可以得到砂轮表面上的三维点云,从而可以进行砂轮地貌的重构。

步进电机采用了 5 线 4 相混合步进电机,步距角为 5.625° ,自带 1:64 减速器,通过直径为 22 mm 的滚轮带动砂轮转动,所以步进电机每步带动砂轮转动 $15 \mu\text{m}$ 。由于摄像机视野在光条方向上距离约为 20 mm,沿光条方向上的采样点为 288,点距为 $75 \mu\text{m}$,为了使沿圆周方向上采样周期与光条方向上的采样点一致,设定步进电机每次连续走 5 步,摄像机拍摄一幅图像,即摄像机在圆周方向的采样点距也为 $75 \mu\text{m}$ 。通过连续拍摄 288 次,最后可以得到一个 288×288 大小的矩阵 M ,该矩阵就是砂轮的三维地貌数据。

本研究没有实现嵌入式系统的显示与分析模块,为了能够显示存在 SDRAM 上的三维地貌数据,本研究使用了 VisualDSP++ 的内存查看功能,将 M 直接从嵌入式板卡内存中拷贝到 PC 上。通过 Matlab 来查看得到的结果。使用 surf1 命令显示的砂轮三维地貌如图 6 所示,为了分析显示方便,截去了有明显错误的数数据,最后重构所用的点云矩阵的大小为 288×240 ,其所对应的实际砂轮表面范围为 $22 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$ 。

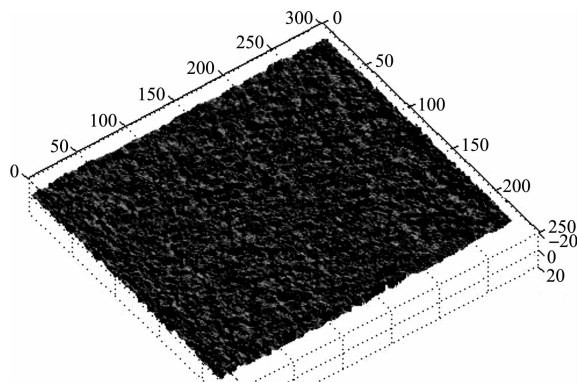


图 6 砂轮三维重构图

得到砂轮地貌的三维重构图后,可以通过分析三维地貌来评价砂轮地貌状态,进而可以用来预测磨削效果,理想的砂轮地貌需要满足均匀性、等高性与微刃性要求,因此评价砂轮地貌需要从这 3 个方面入手,来评估砂轮地貌的状态。本研究从磨粒的均匀性和等高性方面来进行分析,以间接评价砂轮地貌的质量。

为了评定砂轮表面的磨粒分布的均匀性,本研究从砂轮宽度方向予以分析。沿宽度方向将砂轮重构区域分为 n 等份,对每一等份上的磨粒数进行统计,用 Matlab 进行一元线性回归分析,得到的统计结果如图 7 所示。

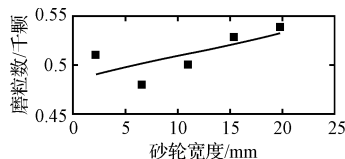


图 7 磨粒在砂轮宽度方向上的分布趋势曲线

表 1 回归结果

	Coefficients	标准误差	t Stat	P-value	下限 95.0%	上限 95.0%
Intercept	0.485 75	0.017 085	28.430 63	9.55E-05	0.431 376	0.540 124
砂轮宽度/mm	0.002 917	0.001 652	1.765 184	0.175 716	-0.002 34	0.008 175

由图 7 的分布趋势和如表 1 所示的回归分析结果可以看出,磨粒在砂轮宽度方向上近似成均匀分布。

为了分析磨粒的等高性,对高度点云数据采用拟合的方法,得到了砂轮表面的平均高度拟合平面,并以此平面为基准,来统计磨粒在高度方向上的分布,得到了 $N(0.1, 0.068 5)$ 的正态分布,其分布图如图 8 所示。

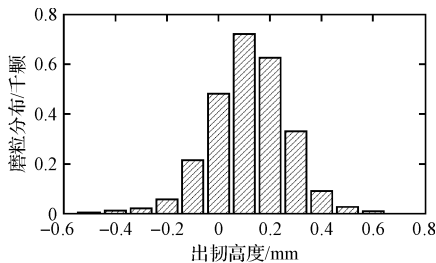


图 8 不同出刃高度下的磨粒分布图

由图可见,不同出刃高度下的磨粒分布近似成正态分布,其中 92.03% 的磨粒分布在偏离基准面 $-0.1 \text{ mm} \sim 0.3 \text{ mm}$ 范围内,表现出良好的等高性。由于所研究的砂轮是新的砂轮,所以以上分析结果基本反映了砂轮尚未开刃时的实际状况。

3 结束语

本研究采用线结构光方法对砂轮地貌的三维重构进行了研究,为了提高砂轮三维地貌重构速度,将 Blackfin DSP 处理器引入到三维重构应用中来,以 Blackfin 处理器为基础设计了一套测量砂轮地貌的机电一体的测量装置,其特点是充分利用了 Blackfin 的特有的 MSA 微信号架构,结合了 DSP 处理与控制能力,使得电机控制与数据处理的应用能在同一个开发环境下进行开发,降低了开发难度。另外,通过对 PPI 接口的设置,降低了待处理的数据量,通过设计较为简化的分割算法,降低了算法复杂度。最后使得运算处理速度大大提高。另外针对砂轮地貌细节比较小,对

线结构光的测量原理进行改造,采用提取光条的边缘变化而不是光条中心走向来提高测量的分辨率。最后对生成的三维地貌进行了分析。本研究完成了砂轮三维地貌分析装置的初步研究,为研制商品化的砂轮地貌扫描装置打下了基础。

参考文献(References):

- [1] LACHANCE S, BAUER R. Application of region growing method to evaluate the surface condition of grinding wheels [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004, 44(7-8): 823-829.
- [2] FENG Z, CHEN X. Image processing of the grinding wheel surface [J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2007, 32(5-6): 452-458.
- [3] 王红军,李改利. 基于激光的砂轮地貌检测技术研究[J]. *制造技术与机床*, 2008(12): 105-108.
- [4] 龚俊锋,徐西鹏. 基于聚焦合成的砂轮表面重构方法[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2006, 154(4): 14-16.
- [5] 王孟浩,刘宴兵,张小锋. 利用立体视觉的砂轮地貌三维表面重构[J]. *光电工程*, 2005, 32(2): 26-29.
- [6] 龚俊锋,吴耀宇. 基于线结构光的砂轮地貌测量技术研究[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2010, 30(1): 46-49.
- [7] 张广军. 视觉测量[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [8] 丘永亮,彭明仔,符浩. 基于单幅图像的三维视觉测量与缺陷检测技术研究[J]. *机电工程技术*, 2009, 38(7): 64-65.
- [9] Analog Device, Inc.. ADSP BF537 Blackfin processor Hardware Reference. Revision 3.2 [Z]. Analog Device, Inc., 2009.
- [10] Analog Device, Inc.. VisualDSP ++ 5.0 Device Drivers and System Services Manual for Blackfin Processors. Revision 3.2 [Z]: Analog Device, Inc., 2009.
- [11] GONZALEZ R C, WOODS R E. 数字图像处理[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
- [12] 李培华,张田文. 主动轮廓线模型(蛇模型)综述[J]. *软件学报*, 2000, 11(6): 751-757. [编辑:柴福莉]