

· 电子机械工程 ·

快速Curvelet变换在实时机器视觉系统中的应用

田 申¹, 胡 勇², 廖俊必¹, 黄丹平¹

(1. 四川大学测量与控制工程系 成都 610065; 2. 四川理工学院 四川 自贡 643000)

【摘要】机器视觉系统已成为现代工业生产生活中重要环节之一,为使机器视觉系统在螺钉自动分选机工作过程中能够达到稳定、实时地监测螺钉的头径、头杆等几何参数,该文应用Curvelet变换增强图像边缘以及检测稳定性,减少裂纹及划痕对边缘提取的影响,并使用MMX、SSE指令和IPP函数进行优化处理以提高图像处理速度。经实验验证,螺钉自动分选机机器视觉系统在工业应用中的图像处理速度可达25 ms/帧、重复精度为8 μm ,达到了稳定、实时监测几何参数的要求。

关键词 实践应用; 视觉系统; 快速Curvelet变换; 实时系统; 稳定性

中图分类号 TH741

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.04.036

Application of Fast Curvelet Transform in the Real-Time Machine Vision System

TIAN Shen¹, HU Yong², LIAO Jun-bi¹, and HUANG Dan-ping¹

(1. Department of Measurement and Control, Sichuan University Chengdu 610065;

2. Sichuan University of Science & Engineering Zigong Sichuan 643000)

Abstract The key issues of machine vision system is the speed, accuracy and stability of image processing. To make the machine vision system of automatic screw-classifying devices to monitor the geometric parameters, the image edge and its detection stability are enhanced by the Curvelet transform and the speed of image processing is accelerated by the program optimized by MMX, SSE, and IPP functions. The application shows that the image processing speed of the system can reach 25 ms per frame with repeat accuracy of 8 μm . So the system can meet the requirements of stability and real-time monitoring geometric parameters.

Key words applications; computer vision; fast Curvelet transform; real time system; stability

在现代化工业生产中,机器视觉技术往往是不可缺少的环节。如飞机零件的外观、产品包装的正误、IC字符印刷的质量、电路板焊接的好坏等,都需要众多的检测工人通过肉眼或结合显微镜进行观测检验。大量的人工检测不仅影响工厂效率,而且带来不可靠的因素,直接影响产品质量与成本。另外,许多检测工序不仅要求检测外观,同时需要准确获取检测数据,如零件的宽度、圆孔的直径以及基准点的坐标等,靠人眼很难快速完成。用摄像机代替人眼对目标进行识别、跟踪和测量等的机器视觉系统由此而迅速发展。在视觉检测过程中,要求机器视觉系统能准确、实时地对图像进行处理并分析判断。

在图像处理中,边缘是最重要的特征。但是在实际应用中,由于被噪声覆盖等因素的影响,边缘

往往被削弱,此时,必须要滤除噪声、增强边缘,而且不损失图像的边缘细节。在图像处理中,小波变换不适合检测各向异性的图像元素,而且用小波增强还会平滑掉图像的部分细节^[1-2]。而Curvelet变换是各向异性的,对方向敏感,因此在图像的边缘增强中有很大的优势^[3-4]。曲波变换从提出至今短短的几年里,其理论研究取得了很好的发展,主要的应用领域有图像去噪、图像融合和SAR去噪声等。目前这些应用普遍采用的数字Curvelet变换算法都基于传统结构。即先对图像进行预处理,然后采用Ridgelet变换实现,该算法具有较高的冗余度。目前,基于新的快速离散变换的应用研究还处于实验阶段。国内基于Curvelet变换的研究,现主要集中于第一代Curvelet变换在图像处理方面的研究,和原有的传统小波算法相比,有了很大的改进,体现了小波

收稿日期: 2008年07月30日; 修回日期: 2009年02月21日

基金项目: 部级预研项目(402050101)

作者简介: 田 申(1980年),男,博士生,主要从事传感器及智能系统方面的研究。

变换的优越性,对于第二代Curvelet变换的应用研究将会有很大的发展空间。

本文为了消除前景照明方式对所得图像质量的影响,在螺钉自动分选机机器视觉系统中采用第二代Curvelet变换进行滤波和边缘增强处理,并利用MMX、SSE等指令和高速图像处理开发包IPP函数进行优化,这不仅能满足实时性要求,而且能够准确提取边缘。

1 Curvelet变换原理

1.1 Curvelet变换简介

小波变换理论对一维分段平滑点奇异信号的处理具有很好的性能,即能很好反映奇异点的性质和特征。然而它由于各向同性的特征,在线奇异的二维图像信号中,面对图像边缘如各种直线和曲线特征,不能精确表达图像中目标物体边缘的方向,应用小波理论进行图像处理,会在图像边缘产生一定程度的模糊,因此并不适宜处理二维图像信号^[5]。

为了克服小波的这种缺陷,文献[6-7]提出了一种新的多尺度变换——Ridgelet变换,该变换能有效地描述二维空间上具有直线奇异性的信号。针对高维空间中的曲线奇异性信号,在Ridgelet变换的基础上,文献[6-8]提出了第一代Curvelet变换,它是由Ridgelet变换理论衍生而来,是由一种特殊的滤波过程和多尺度Ridgelet变换组合而成的,该变换能够有效地描述具有曲线奇异性的二维图像信号。与小波变换不同,除了尺度和位移参量,Curvelet变换还增加了一个方向参量,因此,它具有方向识别能力。二维图像信号目标物体边缘的基本组成单位为“直线段”或“曲线段”,Curvelet变换在所有可能尺度上进行分解,以微线段作为基本的信号表达单位,因此能够很好地处理二维图像信号中的一维线奇异性,和图像中目标物体边缘的平滑特征。因此,对方向敏感的Curvelet变换,在二维图像信号处理中比小波变换更具有优势。

但是,第一代Curvelet变换的数字实现复杂,而且Curvelet金字塔的分解也带来巨大的数据冗余量,因此,文献[9]提出了实现更简单、更容易理解的快速第二代Curvelet变换,并大大减少了传统实现算法带来的冗余。第二代Curvelet变换与第一代Curvelet变换在构造上已经完全不同。第一代Curvelet的构造思想是通过足够小的分块将曲线近似到每个方块中的直线来看待,然后利用局部的Ridgelet分析其特性;而第二代Curvelet和Ridgelet理论没有关系,实

现过程无需用到Ridgelet理论。两者相同点只是在于紧支撑、框架等抽象的数学定义^[10]。

1.2 连续Curvelet变换的定义

和小波变换一样,连续Curvelet变换通过利用Curvelet基函数与二维图像信号的内积来实现。定义mother Curvelet为 $\psi_{j,l,k}(x)$,二维信号为 $f \in L^2(\mathbb{R}^2)$,则Curvelet系数可以表示为:

$$c_{j,l,k} = \langle f, \psi_{j,l,k} \rangle = \int_{\mathbb{R}^2} f(x) \overline{\psi_{j,l,k}(x)} dx \quad (1)$$

式中 j 为尺度参量; l 为方向参量; k 为位置参量。定义光滑、非负、实值的“半径窗”和角度窗分别为:

$$W(r), r \in \mathbb{R}^2, 2^{-j} \leq |r| \leq 2^{-j+1} \quad (2)$$

$$V(t), t \in \mathbb{R}, |t| \leq 1 \quad (3)$$

它们都满足容许性条件:

$$\int_{\mathbb{R}^2} W^2(2^j r) dr = 1 \quad (4)$$

$$\int_{\mathbb{R}} V^2(t) dt = 1 \quad (5)$$

则mother Curvelet $\psi_{j,l,k}(x)$ 的傅里叶变换为:

$$U_j(r, t) = 2^{\frac{2j}{4}} W(2^j r) V\left(\frac{2t}{|r|}\right) \quad (6)$$

U_j 的支撑区间是受 W 和 V 的支撑区间限制的楔形区域,如将它看作是一个长方形区域,它的长和宽大致成平方关系,因此,具有各向异性的特征。已知 j 尺度上的 $\psi_{j,l,k}(x)$, 其他尺度 2^k 尺度上的Curvelet均可由 $\psi_{j,l,k}(x)$ 通过旋转和平移获得。

与小波变换一样,Curvelet变换也有粗尺度和精细尺度之分。在粗尺度下Curvelet不具有方向性,整个Curvelet变换是由精细尺度下的方向元素 $\psi_{j,l,k}(j \geq j_0, l, k)$ 和粗尺度下各向同性的小波 $\psi_{j_0,k}$ 组成的。

1.3 离散Curvelet变换

第二代Curvelet变换可采用USFFT技术或频率域Wrapping技术来实现,但是USFFT技术计算量要比Wrapping技术大,为了满足实时图像处理的要求,快速Curvelet变换选择Wrapping技术来实现。对已知二维数字图像函数 $f(t_1, t_2) (0 \leq t_1, t_2 \leq n)$, 其离散Curvelet变换的系数可表示为 $f(t_1, t_2)$ 和离散Curvelet波 $\psi_{j,l,k}^D$ 的内积:

$$c^D(j, l, k) = \langle f, \psi_{j,l,k}^D \rangle = \sum_{0 \leq t_1, t_2 \leq n} f(t_1, t_2) \overline{\psi_{j,l,k}^D(t_1, t_2)} \quad (7)$$

式中 $\psi_{j,l,k}^D$ 是离散Curvelet波。

根据连续Curvelet变换的分析可知, Curvelet变换是用楔形基函数来逼近二维图像信号中曲线奇异的位置。由内积表达式可知, 当逼近 $\psi_{j,l,k}(x)$ 的方向与 f 中奇异性的集合形状匹配时, 才有较大的Curvelet系数。因此, 对于图像, 在目标物体边缘处, 如直线、曲线特征处, 用较大的Curvelet系数, 有利于跟踪和分析图像的重要特征^[11]。

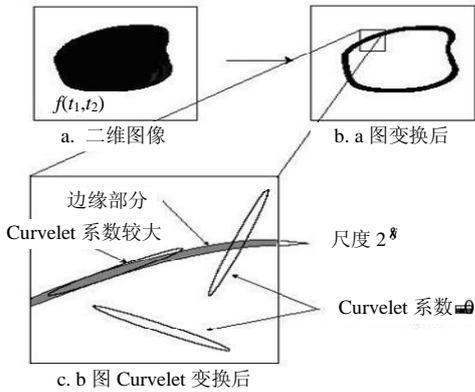


图1 曲波变换系数与边缘的联系图

图1所示是曲波变换系数与边缘的联系图。图1a中的二维图像 $f(t_1, t_2)$, 存在边缘信息, 图1b是图1a在尺度 2^j 下进行带通滤波将边缘细节保存下来的二维图像。在尺度 2^j 下, 对图1b做Curvelet变换, 如图1c所示。由Curvelet变换式(1)可知, 当边缘轮廓方向与Curvelet波方向一致时, 将有较大的Curvelet系数, 反之, 则curvelet系数接近于0。当有斑点噪声, 或者是尺寸远比目标物体小的杂物出现在图像中时, 应用curvelet变换, 能很容易将其滤掉, 而且不损失边缘细节, 有利于准确提取边缘。快速离散Curvelet变换在频域中进行, 这样, 可以利用FFT变换、Wrapping技术来实现, 和第一代Curvelet变换相比, 没有了复杂的计算量和巨大的数据冗余, 有利于在机器视觉系统中进行实时图像处理。

快速Curvelet变换具体算法步骤如下:

- (1) 利用二维快速傅里叶变换获得频率域的值。
- (2) 求每个尺度、角度对 j, l 的乘积。
- (3) 求取wrap的乘积结果。
- (4) 对以上结果做二维快速傅里叶反变换, 得到离散Curvelet系数。

2 实 验

在螺钉自动分选机中, 本文应用机器视觉系统模拟人眼功能, 对拍摄螺钉图像进行分析处理, 得到螺钉的头径、头杆同心度等参数, 以及螺钉头部是否有划痕和裂纹, 判断螺钉是否合格, 然后反馈给执行机构做出相应的处理, 完成螺钉自动分选过程。

根据系统要求, 螺钉自动分选机每秒能检测10个螺钉, 而每一个螺钉要利用2幅图像检测其参数, 因此, 根据要求, 平均每一副图像要求在40~50 ms内处理完成, 以满足系统的实时性要求。

螺钉分选机机器视觉系统结构图如图2所示。图中, 1为挡块一; 2为挡块二; 3为启动导轨; 4为相机一; 5为相机二; 6为光源一; 7为光源二; 8为相机三; 9为挡块二; 10为传感器; 11为螺钉滑道; 12为转盘螺钉。自动分选系统要求能检测“圆形螺钉头”和螺钉头上的“十字槽”是否同心, 为了突出检测特征, 需要选择低角度的环形光源进行正光照明, 相机三对螺钉头进行拍摄。而对螺钉头的测量和螺杆进行拍摄的相机一和相机二, 为了清晰突出轮廓边缘, 选择背光照明方式的条形光源。

螺钉分选机进行自动分选的过程如下: (1) 送料装置将待检测螺钉通过螺钉滑道传送到检测区, 进入转盘上的圆形卡槽里。(2) 传感器感应到有螺钉进入机器视觉系统相机视场范围, 发出一个触发脉冲。(3) 相机一、相机二和相机三进行外部触发采样, 采集螺钉的图像。(4) 软件分析处理, 将处理结果(合格与否)发送到执行机构。(5) 执行机构(气动导轨和挡块一)进行分选, 筛选掉不合格产品。

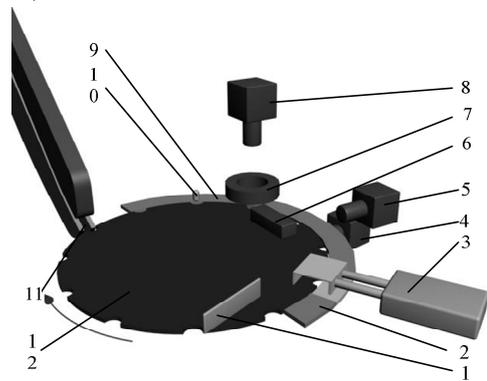


图2 螺钉分选机机器视觉系统结构

本文机器视觉系统选择的是具有外部触发功能的东芝Teli相机以及具有I/O控制功能的V110图像采集卡。根据测量精度的要求, 选择隔行扫描Teli相机的场扫描工作方式, 可减少螺钉的运动对图像拍摄带来的干扰。

螺钉自动分选机机器视觉系统软件控制处理流程如图3所示。

螺钉自动分选过程中, 以背光照明方式拍摄的螺杆图像, 质量较好, 噪声低, 达到了检测精度要求。

图4是螺钉头部的图像, 除了显示的螺钉头部外, 还有其他噪声。如果不对其他噪声进行消除和

边缘增强，二值化后很难准确进行目标提取寻找边缘，影响测量参数的精度。

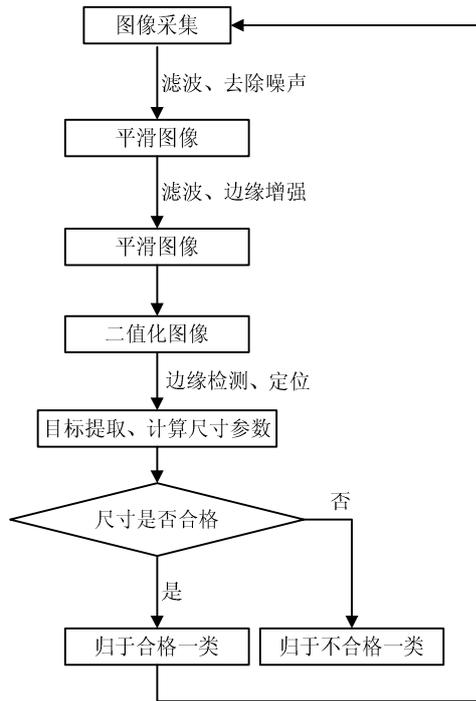


图3 机器视觉系统处理流程

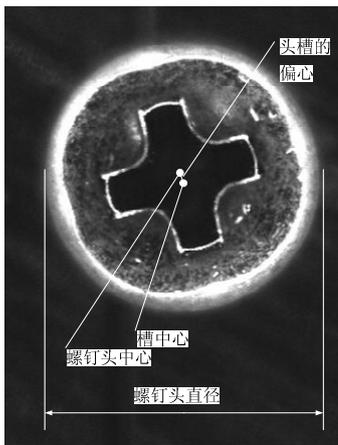
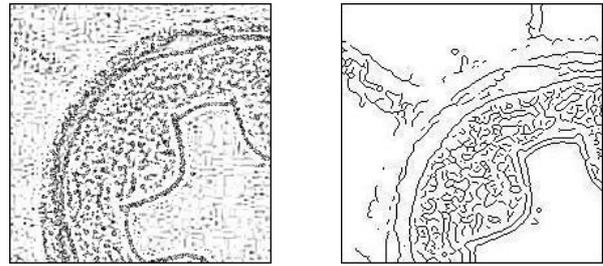


图4 原始图像

边缘增强、滤除噪声的方法目前主要有高斯拉普拉斯算子、Canny算子、小波算子等。应用高斯拉普拉斯算子、Canny算子边缘增强对噪声特别敏感，不利于提取边缘信息。应用小波变换增强边缘，因小波是各向同性的，对方向不敏感，因此，小波变换不利于检测各向异性的图像元素，不利于检测曲线边缘。本文应用Curvelet变换进行图像边缘增强、噪声滤除，和传统的边缘增强算法比较，Curvelet变换增强效果优于传统增强算法。

图5a是高斯拉普拉斯变换后的图像，图5b是Canny算子变换后的图像。从变换后的图像可知，这

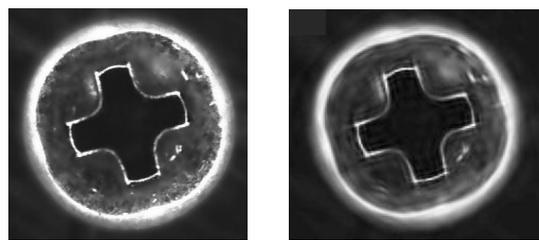
两种增强边缘的方式都没有抑制噪声的能力，不利于提取边缘信息进行尺寸检测。



a. 高斯拉普拉斯变换后的图像 b. Canny算子变换后的图像

图5 高斯拉普拉斯变换和Canny变换后的图像

图6a和图6b分别是Wavelet变换和Curvelet变换滤波、边缘增强后的图像。实验可知，Wavelet变换没有很好地去除噪声、增强边缘，在螺钉头图像的部分地方金属纹理清晰可见，边缘处存在锯齿状，不利于检测螺钉头部是否有裂纹和划痕以及裂纹和划痕的尺寸，也不利于正确寻找边缘测量几何尺寸，从而导致测量结果不稳定，当测量条件不变时，拍摄的不同图像测量结果变化范围达23 μm。而Curvelet变换滤除了斑点噪声，同时，螺钉头部的金属纹理部分被平滑掉，边缘部分得到增强，边缘连续性变得更平滑，这样，提取边缘就不会受到斑点噪声、纹理等的影响而导致测量结果不稳定。而且螺钉头部的划痕因为尺寸较大没有在Curvelet变换的过程中被平滑掉，因此能有效实现对划痕的检测。实验证明，当应用Curvelet变换进行图像处理，在测量条件不变的情况下，不同图像测量结果变化范围仅8 μm，满足螺钉自动分选机中测量尺寸的重复性和精度要求。



a. 小波变换后的图像 b. 曲波变换后的图像

图6 小波变换和曲波变换后的图像

3 MMX、SSE和IPP函数优化程序

在螺钉自动分选机中，要求机器视觉系统能够准确、实时地对图像进行处理判断，因此，图像处理必须准确快速。在应用程序中引入MMX、SSE指令和IPP函数进行优化，计算机选择Intel微处理器，大大提高了程序执行速度。MMX技术提高了很多应

用程序的执行性能, 一个MMX指令可以一次操作8个字节, 且在一个时钟周期内完成2条指令, 即在一个时钟周期内能处理16个元素。SSE增加了浮点指令并扩充了MMX的整数运算指令, 每个指令可同时处理4个单精度浮点数, 或者通过扩充的MMX指令同时处理16个字节的整数数据。对8位图像进行处理分析, 检测螺钉的参数, 选择MMX指令和SSE指令可实现并行处理, 在很大程度上降低了图像处理的时间。IPP是一个函数库, 它提供了大量的库函数用于图像处理、计算机视觉等。它针对最新的Intel处理器进行了优化, 其最大优点是速度快, 性能提升明显, 使用方便。在图像处理中, 特别适合于实时性要求高的场合以及大量图片的处理。

在螺钉自动分选机器视觉系统中, 采用MMX、SSE指令和IPP函数实现Curvelet变换, 计算机CPU选择Pentium(R)43 GHz, 内存大小选择1 GB, 当应用普通的C++语言编程对含有目标物体的256×256区域进行Curvelet变换耗时134 ms。而用IPP函数优化后, 应用ROI技术, 对含有目标物体的同样大小的区域进行Curvelet变换, 并提取目标物体边缘计算几何尺寸, 总共耗时25 ms。在螺钉自动分选机器视觉系统中, 满足实时性和精度要求, 并通过测试可知, 系统的检测精度偏差小于0.1 mm。

4 结 论

本文选择提高计算机配置, 利用MMX、SSE指令和IPP函数对程序的执行速度进行优化, 使Curvelet变换应用在机器视觉系统中并做实时图像处理对边缘进行增强和去噪, 使测量结果稳定。

实验结果表明, 应用Curvelet变换增强边缘提取目标物体和计算尺寸, 经过IPP函数优化速度后, 能满足机器视觉系统的实时性要求。应用Curvelet变换增强边缘提取目标物体测量几何尺寸, 在测量条件不变的情况下多次采集图像重复测量, 其结果能保持稳定, 重复精度为8 μm。

参 考 文 献

- [1] ZHANG Hong-ying, WU Bin, PENG Qi-cong. An improved algorithm for image edge detection based on lifting scheme[J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2005, 3(2): 113-116.
- [2] 隆 刚, 肖 磊, 陈学俭. Curvelet变换在图像处理中的应用综述[J]. 计算机应用与发展, 2005, 8: 1331-1337.
LONG Gang, XIAO Lei, CHEN Xue-quan. Overview of the applications of Curvelet transform in image processing[J]. Journal of Computer Research and Development, 2005, 8: 1331-1337.
- [3] STARCK J L, CANDES E J, DONOHO D L. The Curvelet transform for image denoising[J]. IEEE Trans Image Proc, 2002, 11(6): 670-684.
- [4] STARCK J L, MURTAGH, CANDES E J, et al. Gray and color image contrast enhancement by the curvelet transform[J]. IEEE Trans Image Proc, 2003, 12(6): 706-716.
- [5] 肖 磊, 隆 刚, 陈学俭. 基于Curvelet变换抑制SAR图像斑点噪声的方法[J]. 计算机工程, 2006, 32(9): 196-198.
XIAO Lei, LONG Gang, CHEN Xue-quan. Denoising method of SAR image based on Curvelet transform[J]. Computer Engineering, 2006, 32(9): 196-198.
- [6] DONOHO D L, DUNCAN M R. Digital Curvelet transform: strategy, implementation and experiments[R]. Stanford, USA: Stanford University, 1999.
- [7] CANDES E J, DONOHO D L. Curvelets—a surprisingly effective nonadaptive representation for objects with edges[M]. Saint Malo: Vanderbilt University Press, 1999.
- [8] 李智杰, 高新波, 姬红兵. 基于 Curvelet 变换的红外图像背景杂波抑制算法[J]. 红外技术, 2004, 26(5): 1-5.
LI Zhi-jie, GAO Xin-bo, JI Hong-bing. A Curvelet transform based on clutter suppression algorithm for infrared image[J]. Infrared Technology, 2004, 26(5): 1-5.
- [9] CANDES E J, DONOHO D L. New tight frames of Curvelet and optimal representations of objects with C2 singularities[J]. Commun on Pure and Appl Math, 2004, 57(2): 219-266.
- [10] 李晖晖, 郭 雷, 刘 航. 基于二代Curvelet变换的图像融合研究[J]. 光学学报, 2006, 26(5): 657-662.
LI Hui-hui, GUO Lei, LIU Hang. Research on image fusion based on the second generation curvelet transforms[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(5): 657-662.
- [11] STARCK J L, CANDES E J, Donoho D L. The Curvelet transform for image denoising[J]. IEEE Trans Image Proc, 2002, 11(6): 670-684.

编辑 漆 蓉