

# 基于 Curvelet 变换的机器视觉流量检测 系统中的应用

郭康<sup>1</sup>, 黄丹平<sup>1,2,3</sup>, 徐同旭<sup>1</sup>, 张芯豪<sup>1</sup>, 侯山山<sup>1</sup>

(1. 四川理工学院机械工程学院, 四川 自贡 643000; 2. 人工智能四川省重点实验室, 四川 自贡 643000;  
3. 过程装备与控制工程四川省高校重点实验室, 四川 自贡 643000)

**摘要:**针对传统工业现场浮子流量计人工读取数据误差大、检测效率低的问题,研发一套基于机器视觉的浮子流量计检测系统。为使机器视觉系统在检测过程中稳定、准确读取刻度信息,将 Curvelet 变换算法用于增强流量计刻度线边缘,减少裂痕对水平刻度提取的影响,解决流量计刻度线边缘模糊的问题。同时算法采用 IPP 图像处理函数库优化算法提高处理速度。实验表明,该算法能够实时准确地读取流量计刻度信息,识别精度达 99.97%,处理一帧图像时间为 50 ms,满足工业现场要求。

**关键词:**机器视觉;Curvelet 变换;流量检测;工业应用

**中图分类号:**TH814;TP242.6<sup>+2</sup>

**文献标志码:**A

## 引言

随着工业自动化程度愈来愈高,国家提出“中国制造 2025”战略,工业计量成为影响国民经济、工业应用、科学探究的重要一环。尤其在当下能源危机的时代,流量计精确计量对实现高效生产、提高生产稳定性、保证产品质量、促进生产实现智能智慧控制的实现有着重大意义<sup>[1]</sup>。工业生产实际要求流量监测装置安装方便,尤其需要在恶劣环境中使用。目前常用的流体流量测量有差压法、吹气法和电容法等。这些方法需要针对不同应用场合的实际情况设计相应的流量传感器,造成开发成本较高、周期较长。并且这几种流量测量方法还有一个明显缺陷:机械式测量方法的测量精度低并且测量装

置结构复杂,当使用电阻式和电容式方法测量流体流量时,需要增加浮子重量,使测量精度受到影响,并且由于电阻式和电容式装置带电,使测量存在安全隐患<sup>[2]</sup>。本文利用机器视觉方法检测流量,机器视觉方法属于非接触式测量,且具有成本低、测量误差小、精度高、速度快的特点,有利于集成化,在各个行业有广泛应用<sup>[3]</sup>。

在机器视觉浮子流量计流量测量应用中,浮子及刻度线边缘特征极其重要,直接影响流量测量精度。但由于浮子及刻度线属于微小目标,且其边缘不清晰,在复杂背景下流量计图像灰度变化大,刻度目标相对微小,要完整并精确提取刻度线是一个难点<sup>[4]</sup>。在处理图像时,傅里叶变换不适合大背景微小目标的提取,傅里叶变换只能得到频率信息,无法提取具有弱边缘的目标。

收稿日期:2017-07-19

基金项目:过程装备与控制工程四川省高校重点实验室项目(GKZY201102);固态酿造关键技术研究四川省院士(专家)工作站项目(GY2016-01)

作者简介:郭康(1991-),安徽合肥人,硕士生,主要从事机器视觉方面的研究,(E-mail)18255009847@163.com;

通信作者:黄丹平(1968-),四川自贡人,副教授,博士,主要从事测控技术面的研究,(E-mail)984554142@qq.com

小波变换也不适合检测各向异性的视觉信息,且小波变换处理图像时会削弱目标的边缘,不易提取浮子刻度信息。Curvelet 变换是各向异性的,对边缘较敏感,适合检测方向性明确的刻度线。Curvelet 变换主要应用在:图像融合、图像增强、图像去噪、特征提取和数字水印等领域。

## 1 流量计计量系统工作原理

流量计系统原理结构图如图 1 所示,首先由视觉传感器采集浮子流量计图像,传输给 DSP 系统。在 DSP 系统对视觉信息预处理,包括灰度化和流量计定位<sup>[5]</sup>。然后将 DSP 系统预处理后的图像信号传输给 D/A 转换模块,将模拟信号转换为数字信号。将含有视觉信息的数字信号通过 WIFI 无线发射装置和接收装置传输给上位机,并且还需将该数字信号通过信号转换模块后传输到 DCS(集散控制)系统<sup>[6]</sup>。在上位机中,通过各种图像处理算法对接收到的精确定位的流体小流量计图像进行处理,根据所获取流体流量数据调节浮子流量计,并存储流量计图像<sup>[7]</sup>,流量计图像处理最核心算法就是 Curvelet 变换提取刻度线。

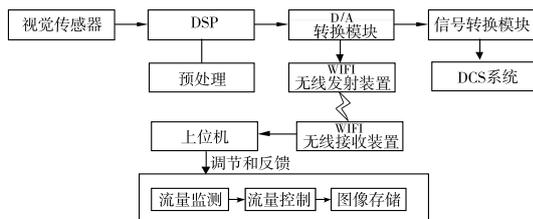


图 1 流量计系统原理结构图

## 2 Curvelet 变换计量原理

### 2.1 Curvelet 算法原理

机器视觉流量计系统核心在于流量计图像处理,应用 Curvelet 变换处理流量计图像。浮子流量计图像由 X 射线采集得到,该方法得到的流量计图像背景复杂,流量计刻度线易与背景融合在一起难以区分,并且流量计 X 射线图像也容易受到噪声等因素的影响,流量计刻度线相对于背景属于微小目标<sup>[8]</sup>。本研究为了消除前景照明得到的图像刻度线目标边缘模糊的影响,将 Curvelet 变换应用在流量计图像处理中,采用 wrapping 算法实现 Curvelet 变换,定义所采集流量计图像为二维空间中离散函数  $f(x, y)$ , 具体步骤如下<sup>[9]</sup>:

(1) 对  $n \times n$  的图像  $f(t_1, t_2)$ ,  $0 < t_1, t_2 < n$  做二维快速傅立叶变换,得到  $\hat{f}[n_1, n_2]$ ,  $-n/2 \leq n_1, n_2 \leq n/2$ 。

(2) 计算每个尺度  $j$  和角度  $l$  下,  $\tilde{U}_{j,l}[n_1, n_2]$  和  $\hat{f}[n_1, n_2]$  的乘积。

(3) 将步骤(2)得到的乘积区域围绕原点做卷绕:  
 $\hat{f}_{j,l}[n_1, n_2] = W(\tilde{U}_{j,l} \hat{f})[n_1, n_2]$ 。

(4) 对以上结果做二维傅立叶反变换,得到离散 Curvelet 系数  $c_{j,l,k}^D$ 。

使用 Curvelet 变换方法处理流量计图像,根据 Curvelet 系数的特征,自适应处理 Curvelet 系数,再经过反 Curvelet 变换,得到的流量计图像噪声较少且刻度线清晰,有利于提取刻度线。处理 Curvelet 系数的算法要求增强流量计刻度线并削弱背景,应用该算法不仅有效地削弱背景并去除大量噪点,而且相比傅里叶变换和小波变换算法,处理后的图像中流体小流量刻度线更易提取。

### 2.2 Curvelet 系数分析与处理

对流体小流量计图像进行 Curvelet 变换,采用楔形基函数逼近二维奇异特征的方法计算得到 Curvelet 系数, Curvelet 系数中包含图像在不同层数、角度上的刻度线信息。在不同层数下, Curvelet 基元通过平移与旋转捕获并表示图像所有方向上的刻度线<sup>[10]</sup>。当逼近基与奇异性特征相交且重叠时,即 Curvelet 基元与流量计刻度线轮廓方向重合时,响应的 Curvelet 系数较大,其值接近 1;反之响应的 Curvelet 系数较小,接近 0。当 Curvelet 基元遇到噪点时,响应的 Curvelet 系数接近 0。

Curvelet 系数的第一层 Coarse 尺度层由低频系数组成,其包含流量计图像的概貌;最外层 Fine 尺度层由高频系数组成,体现了流量计图像的细节、刻度线特征;其余中间的尺度层称为 Detail 尺度层由中高频系数组成,主要包含流量计图像的刻度线信息<sup>[11]</sup>。Curvelet 系数中每个尺度层的能量、最大值、最小值、均值和方差等特征均不相同。Curvelet 系数的能量主要集中在 Coarse 尺度层,其他尺度层的能量逐层递减。随着尺度层次的增加,Detail 和 Fine 尺度层的最大值和最小值分布范围越向零靠近,均值逐次减少。并且 Coarse 尺度层系数值方差很大,Detail 尺度层的方差分布呈现随尺度层增加,方差减小的趋势,Fine 尺度层的方差与第二尺度层的方差接近。图像的噪点位于 Curvelet 系数的 Coarse 和 Fine

尺度层,数值接近零。选择合适的阈值,将 Curvelet 系数低于阈值的噪声滤除,保留 Curvelet 系数高于阈值的刻度线细节信息。由于 Curvelet 系数不同尺度层的能量、方差等数值差别较大,可根据其特征对每层 Curvelet 系数自适应设置阈值,这样能够更好地去除噪声,并保留流量计刻度线细节信息。

### 3 实验与分析

实验采用 Matlab R2014a 进行算法测试,采用 Visual C++ 2015 与 opencv3.2.1 软件平台进行图像处理。opencv 是一个跨平台的开源计算机视觉库,它提供很多函数实现机器视觉和图像处理方面的通用算法,程序代码采用 IPP 优化函数编写,IPP 函数包含多种图像处理底层优化函数,能够加快图像处理运行速度,实现浮子流量计流量实时测量<sup>[12]</sup>。

#### 3.1 图像分析与处理

对浮子流量计图像进行 Curvelet 变换,不同尺度层的不同分解系数分别处理。该流量计图像进行曲波变换分成 6 个尺度层,针对刻度线水平特征,选取第二和第三尺度层。第二层的分解系数为 16, Curvelet 域的第二尺度层共有 16 个系数矩阵。第三层分解系数为 32,该尺度层共有 32 个系数矩阵,分解系数从 45 度角顺时针遍历流量计图像。图 2 与图 3 分别为第二和第三尺度层包含刻度线信息的部分分解矩阵,从图 2 可得第二尺度层中第 2、3、10、11 系数矩阵包含水平数据信息(即刻度线信息),第三尺度层中第 4、5、20、21 系数矩阵包含水平数据信息。

通过大量所采集视觉信息对算法进行测试,验证 Curvelet 算法效果优越性,不同算法测试结果对比如图 4 所示。图 4(g) 为浮子流量计原图,图像显示流量计刻度线在水平方向上,因此只需保留含有水平方向的数据,其余方向置 0,达到只保留刻度线信息的滤波作用。图 4(a)、图 4(c)、图 4(e) 分别为傅里叶变换、小波变换和曲波变换后图像,由三种变换效果图可知,傅里叶变换后图像只留下水平方向的数据,但水平方向刻度线边缘较模糊,小波变换后图像背景有大量噪声且每一刻度线不同位置边缘与背景灰度值差变化较大,难以提取所有刻度线,Curvelet 变换后图像刻度线边缘灰度一致且与背景灰度差大于 15。图 4(b)、图 4(d)、图 4(f) 分别为傅里叶变换、小波变换和 Curvelet 变换图像

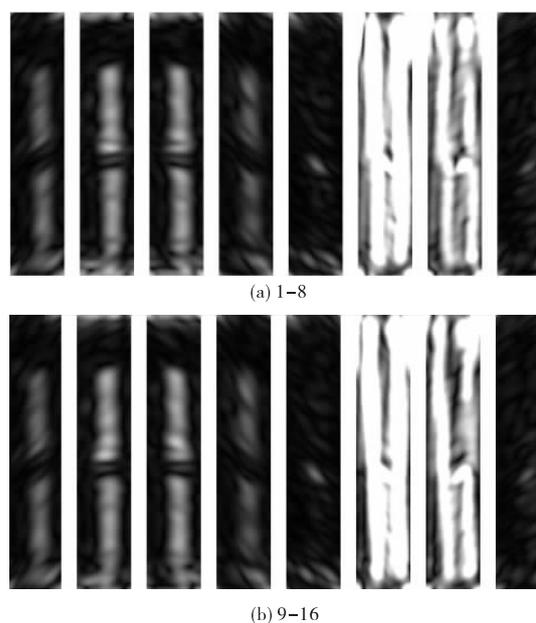


图 2 第二尺度层

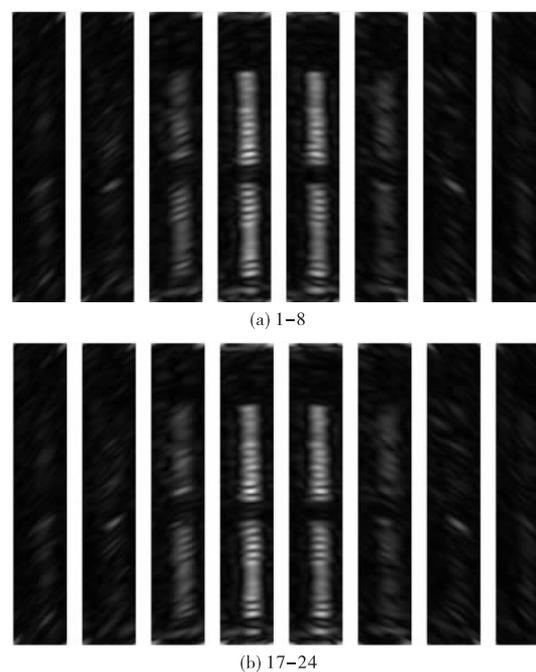


图 3 第三尺度层

经二值化处理得到的图像,傅里叶变换图像经二值化处理很多刻度线无法显示,同样因为小波变换后所得刻度线边缘与背景灰度差变化范围较大,所得二值图无法提取出所有刻度线。Curvelet 变换图经过二值化后刻度线非常清晰,且刻度线发生间断,这是由于浮子遮挡住了刻度线,即浮子所在位置就是刻度线间断处,间断处上方第一根刻度线就是浮子显示的流量数据。使用此方法处理流量计图像,可以有效地滤除噪

声,二值化后的流体流量计图像能够清晰地显示出刻度线以及浮子位置。

### 3.2 精度分析

在同一实验条件下,通过只改变流体流量的大小,再控制流量稳定,使流量不发生变化。使用基于机器视觉的流体流量测量系统方法,做两组参照实验,两次测量流体小流量,连续记录  $p = 15$  次测量结果,设定流量

计数高度占流量计量程高度百分比为  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 15$ ), 两组数据分别见表1与表2。第一组真实刻度值为56,第二组真实刻度值为70。由第一组数据可知,机器视觉算法得到流量计数值与流量真实数值误差小于0.03%,识别精度达到99.97%,同样第二组所得流量残余误差小于0.02%,识别精度达到99.98%,满足工程实际要求。

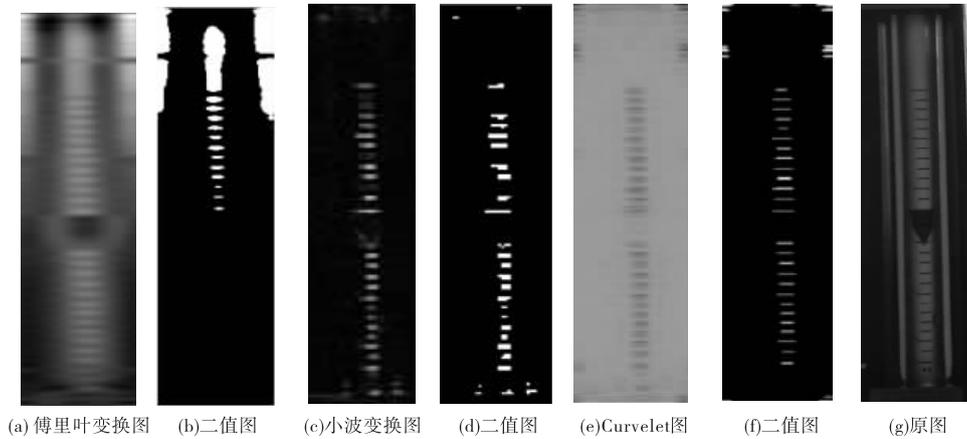


图4 图像检测结果

表1 第一组流体流量测量数据

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
参数	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$
测量值/%	56.02	56.00	56.02	55.99	55.97	55.98	56.01	56.00	55.99	56.01	56.00	56.02	55.98	55.99	56.00
残余误差/%	0.02	0.00	-0.02	0.01	-0.03	-0.02	0.01	0.00	-0.01	0.01	0.00	0.02	-0.02	-0.01	0.00

表2 第二组流体流量测量数据

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
参数	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$
测量值/%	69.98	70.00	69.99	70.00	70.03	70.00	70.01	70.00	69.98	70.02	70.00	69.98	69.99	70.01	69.98
残余误差/%	-0.02	0.00	-0.01	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	-0.02	0.02	0.00	-0.02	-0.01	0.01	-0.02

## 4 结束语

为了解决传统人工和机械式方法获取浮子流量计流量存在的问题,使用机器视觉技术对流体流量进行测量,避免人工测量由疲劳等因素产生的误差,测量精度更高,并节省了劳动力。流体流量计图像中含有大量噪声,需要对流体小流量计图像进行降噪处理。由于很多流体流量计图像背景复杂,流量计刻度线与背景灰度值差小、对比度不高,相对背景刻度线目标非常微小且目标边缘模糊不易精准提取出流体流量刻度线。提出应用 Curvelet 变换算法提取刻度线,并分析 Curvelet 系数

与刻度关系。根据 Curvelet 系数的特征,对不同的尺度层分别计算阈值,能够有效去除噪声的同时最大限度保留流体流量计刻度线边缘,能够更精确地测量出流体流量刻度线数据,并且 Curvelet 变换具有较高的精度和运算速度,将 Curvelet 变换应用于流体小流量测量保证浮子流量计的实时测量。该检测方法同样适用于其它机器视觉类似工程应用<sup>[13]</sup>。

### 参考文献:

- [1] 郑朝晖.基于 NCC 匹配的 Camshift 目标跟踪算法[J].四川理工学院学报:自然科学版,2015,28(4):

- 37-40.
- [2] 葛利俊.提高浮子流量计测量精度的研究[D].天津:天津大学,2012.
- [3] 王玉萍,郭峰林.基于机器视觉的PCB板缺陷检测系统关键技术研究[J].科技通报,2017,33(1):101-105.
- [4] 黄勇,孙兴波,袁文林,等.基于暗原色先验的低照度图像增强[J].四川理工学院学报:自然科学版,2015,28(3):42-45.
- [5] 余永维,殷国富,殷鹰,等.基于视觉显著度的射线图像微小缺陷提取方法[J].农业机械报,2015,46(7):365-371.
- [6] 任治,苏真伟,俞东宝,等.一种焊缝X射线数字图像的缺陷提取算法[J].无损检测,2009,31(2):89-91.
- [7] 郭静,罗华,张涛.机器视觉与应用[J].电子科技,2014,27(7):185-188.
- [8] 田申,胡勇,廖俊必,等.快速Curvelet变换在实时机器视觉系统中的应用[J].电子科技大学学报,2009,38(4):631-635.
- [9] 冈萨雷斯,伍兹,著.数字图像处理[M].3版.阮秋琦,阮宇智,译.北京:电子工业出版社,2011.
- [10] 黄丹平,李静,于少东,等.基于Curvelet变换的机器视觉系统在焊缝缺陷检测中的应用[J].焊接技术,2015,44(6):57-61.
- [11] 郭春华,汪同庆.基于曲波变换的轨道梁面裂纹图像增强[J].仪器仪表学报,2012,33(12):2754-2760.
- [12] 周文举.基于机器视觉的在线高速检测与精确控制研究及应用[D].上海:上海大学,2014.
- [13] 段德山.工件非接触检测中机器视觉的研究与应用[D].北京:北京邮电大学,2007.

## Application of the Curvelet Transform in the Rotameter Detection Based on Machine Vision System

GUO Kang<sup>1</sup>, HUANG Danping<sup>1,2,3</sup>, XU Tongxu<sup>1</sup>, ZHANG Xinhao<sup>1</sup>, HOU Shanhan<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China;

2. Artificial Intelligence Key Laboratory of Sichuan Province, Zigong 643000, China; 3. Sichuan Provincial Key Lab of Process Equipment and Control, Zigong 643000, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of high data error and low detection efficiency of the traditional rotameter artificial detection, a method of rotameter measurement system based on machine vision has been developed. To make the machine vision system stable and accurate during the detection process, the detection is enhanced by the Curvelet transform and the speed of image processing is accelerated by the IPP image processing functions library. The experiment results shows that the system can quickly and effectively obtain the data of calibration line of the rotameter with recognition accuracy rate of 99.97%, and processing time of per frame image is 50 ms, which can meet the practical requirements of industrial field.

**Key words:** machine vision; curvelet transform; flow detection; industry applications