

方向场和频率场约束的结构光条纹图像增强算法

郑红波^{1,2} 徐玲玲¹ 杜轶诚¹ 秦绪佳^{1,2} 陈嵩辉³

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310032)¹

(浙江省可视媒体智能处理技术研究重点实验室 杭州 310032)²

(中国航天电子技术研究院 北京 100094)³

摘要 条纹图像增强在指纹图像处理与识别、结构光三维重建中有重要应用。针对结构光三维重建的条纹图像处理,提出了一种基于图像方向场与频率场约束的条纹图像增强算法,设计了图像方向场与频率场的计算方法,构造了方向场与频率场的约束的 Gabor 滤波器。算法首先对条纹图像进行高斯滤波,去除图像亮度不均匀的影响;然后计算条纹图像的方向场与频率场;最后在图像方向场与频率场的约束下对图像进行 Gabor 滤波。实验结果表明,算法可有效消除图像光照不均匀的影响,较好地增强结构光图像的条纹信息。

关键词 结构光图像,条纹增强,方向场,频率场,Gabor 滤波器

中图分类号 TP391 文献标识码 A

Enhancement Algorithm for Structured-light Stripe Image Based on Orientation and Frequency Fields Constraint

ZHENG Hong-bo^{1,2} XU Ling-ling¹ DU Yi-cheng¹ QIN Xu-jia^{1,2} CHEN Song-hui³

(School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)¹

(Key Laboratory of Visual Media Intelligent Processing Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310032, China)²

(China Aerospace Electronic Technology Research Institute, Beijing 100094, China)³

Abstract Stripe image enhancement has important applications in fingerprint image processing and recognition, structured light 3D reconstruction. This paper focused on stripe image processing of structured-light 3D reconstruction, presented an enhancement algorithm for stripe image based on orientation and frequency fields constraint, designed calculation methods of image orientation and frequency fields, and constructed a Gabor filter based on orientation and frequency fields constraint. The enhancement algorithm includes following steps; firstly uses Gaussian filter to remove the effect of uneven illumination of the image, then calculates the orientation and frequency fields of stripe image, finally uses the Gabor filter to filter the image constrained by orientation and frequency fields. The experimental results show that the algorithm can eliminate the effects of uneven illumination of image effectively and enhance the stripe information of structured-light image preferably.

Keywords Structured-light image, Stripe enhancement, Orientation fields, Frequency fields, Gabor filter

1 引言

图像在获取过程中,由于拍摄环境条件的限制,往往会引入不同程度的噪声,为后续的图像分析和图像理解等带来很大的困难。因此,在对图像特征的提取和分析之前,一般要对采集的图像进行适当的增强处理,其目的是改善图像的视觉效果,有针对性地强调图像的全局或局部特性,突出图像中的感兴趣区域,削弱或去除某些不需要的信息。图像增强算法的好坏直接影响特征提取和特征匹配的准确率。

条纹图像相比于其他图像,具有很强的纹理性和方向性。

方向场是条纹图像的变换表示,描述了条纹脊线、谷线的方向信息,是条纹图像的全局特征。图像频率场反映的是图像场的条纹间隔情况。方向场的计算是整个条纹图像处理的核心,直接影响到图像增强的效果。

指纹图像是一种特殊的条纹图像,目前已有许多方法用于其方向场的计算,主要可分为:基于梯度的方法^[1-5]、基于滤波的方法^[6,7]、基于模型的方法^[8-13]。基于滤波的方法中,文献[6]使用一种指纹码的表示方法,基于两阶段分类器进行分类。文献[7]提取指纹图像中的奇异点并执行基于检测到的奇异点的位置与数目的分类。基于滤波的方法具有较好的抗

到稿日期:2013-08-07 返修日期:2013-10-10 本文受国家自然科学基金(61075118)资助。

郑红波(1977—),女,硕士,讲师,主要研究方向为计算机图形学、数字图像处理;徐玲玲(1989—),女,硕士生,主要研究方向为计算机图形学;杜轶诚(1987—),男,硕士生,主要研究方向为数字图像处理;秦绪佳(1968—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为计算机图形学, E-mail:qxj@zjut.edu.cn;陈嵩辉(1967—),男,硕士,研究员,主要研究方向为数字化制造。

噪性能,但只有有限个数的滤波器,计算出的方向场不够精确,且此类方法在估计每个点方向时需要计算每个滤波器的输出并进行比较,计算量很大,效率较低。基于模型的方法中,Sherlock 和 Monro^[8]提出了 zero-pole 模型,这是他们首次试图通过建模的方法,提取指纹纹线方向场。这一思想突出利用了指纹纹线方向场的全局特性,但没有充分利用局部指纹图像信息去修正其模型,造成实际计算的误差较大。之后 Vizcaya 和 Gerhardt^[9]在此基础上采用分段线性拟合的方法改进了指纹纹线方向场的计算精度。Gu 等人^[9,10]提出了结合多边形模型和点电荷模型两种方法去估计纹线方向场,得到了比较精确的计算结果。之后文献[11]又提出了基于在相平面上二维傅里叶展开的指纹定位模型。基于模型的方法具有很强的抗噪声能力,但对于质量较差的图像,以及方向变化较大的区域,估计出的方向场往往不够准确。

相对于以上两种方法,基于梯度的方法能够准确、细致地刻画指纹的方向信息,也成为最重要的方向场估计方法之一。基于梯度的方向场计算方法由 Kass^[1]等人第一次提出,将方向场分为点方向场和块方向场。点方向场以点为单位计算方向值,准确性高,但计算量较大;块方向场以块为单位计算方向值,一个块内的所有点的方向值都相同,由于分块较大,导致准确性降低,但抗噪声性较好。文献[4]证明了该方法与基于梯度协方差矩阵的主成分分析结果完全一致,但大量的实验结果表明该方法对噪声敏感。之后 Jain 等人^[2],Wang 等人^[3]提出了一些方法来增强抗噪声能力,在一定程度上取得了不错的效果,但对于质量较差的指纹图像,尤其是存在较大面积噪声的图像,仍然得不到较为理想的结果。

本文针对传统指纹图像增强算法用于结构光条纹图像的不足,对带噪声图像进行预处理,并对传统方向场图像增强方法进行改进,提出了方向场与频率场约束的增强算法。接下来本文第 2 节主要介绍了条纹图像场的方向场、频率场等相关理论;第 3 节提出基于方向场与频率场估计的条纹图像增强算法,介绍了该算法的基本流程和实现方式;第 4 节是本文算法的实验结果与分析;最后是全文的总结。

2 条纹图像场相关理论

2.1 图像强度场

图像的强度场表征条纹图像纹线在某点处的明暗程度。强度场中值的大小随着条纹纹线在该点处的明暗程度的增加而增加。不同类型的图像采集设备采集的条纹图像强度场场值类型也不同。

对二维图像进行分析,条纹图像的强度场能量大小可用灰度值表示。因此该场强类型也可称为灰度场强。设一幅灰度条纹图像表示为 $f(x, y)$,强度场为 V ,则灰度场强可定义为: $|\vec{V}(x, y)| = f(x, y)$ 。

2.2 图像梯度场

在二维条纹图像场中,图像梯度场表示的是条纹纹线隆起的最陡程度。其方向为条纹纹线法向,从隆起条纹纹线横截面最高点指向最低点。

对二维图像进行分析,设条纹图像的灰度函数用 $f(x, y)$ 表示,则梯度向量为 $\nabla f = (\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y})$ 。若图像梯度场为 $T(x, y)$,则 $T(x, y) = \nabla f(x, y)$ 。

根据偏导数的定义,设 $G_x(x, y)$ 为 (x, y) 处对 x 的偏导,

$G_y(x, y)$ 为 (x, y) 处对 y 的偏导,则:

$$\partial_x(x, y) = f(x+1, y) - f(x, y)$$

$$\partial_y(x, y) = f(x, y+1) - f(x, y)$$

那么,图像梯度场的大小为:

$$|T(x, y)| = \sqrt{\partial_x(x, y)^2 + \partial_y(x, y)^2}$$

2.3 图像方向场

图像方向场,又称方向图,是描述条纹图像中纹线方向和相应位置的一个二维平面场。图像方向场的大小是梯度场正交分解参数 θ 的值,方向按右手定理垂直于梯度方向。

$$T_x(i, j) = \sum_{u=i-\frac{\pi}{2}}^{i+\frac{\pi}{2}} \sum_{v=j-\frac{\pi}{2}}^{j+\frac{\pi}{2}} 2\partial_x(u, v)\partial_y(u, v) \quad (1)$$

$$T_y(i, j) = \sum_{u=i-\frac{\pi}{2}}^{i+\frac{\pi}{2}} \sum_{v=j-\frac{\pi}{2}}^{j+\frac{\pi}{2}} (\partial_x^2(u, v)\partial_y^2(u, v)) \quad (2)$$

$$\theta(i, j) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{T_x(i, j)}{T_y(i, j)} \right) \quad (3)$$

其中, $\theta(i, j)$ 是局部块方向的最小均方估计。

2.4 图像频率场

条纹图像由脊线和谷线交替构成,其像素点灰度值大致形成一个二维的正弦波,其反映的是图像场的条纹间隔情况。条纹频率 f 可由条纹周期 T 取倒数获得, T 表示两条条纹纹线之间的间隔程度,因此定义点 (x, y) 处的频率 f 为该点方向场 $\theta(x, y)$ 垂直方向上单位长度内纹线条数。

2.5 Gabor 滤波器

Gabor 滤波器^[14]是一个完成边缘检测的线性滤波器。Gabor 滤波器具有良好的频率选择和方向选择性,其频率和方向特征与人类视觉系统较为相近,可以出色地进行图像处理、分割、识别与理解。在空间域,一个二维 Gabor 滤波器就是一个正弦平面波对高斯核函数的调制。常用的偶对称 Gabor 滤波器可以表示为:

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_u\sigma_v} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{u^2}{\sigma_u^2} + \frac{v^2}{\sigma_v^2}\right)\right\} \cos(\omega u) \quad (4)$$

$$u = x\cos\theta + y\sin\theta, v = -x\sin\theta + y\cos\theta$$

其中, σ_u 和 σ_v 分别为 Gauss 包络在 u 轴和 v 轴上的标准差, ω 用于调制频率, θ 为 Gabor 滤波器的方向。使用一组不同频率和方向的 Gabor 滤波器从图像中提取特定有用特征可能会非常有效。

3 基于方向场与频率场估计的条纹图像增强算法

条纹图像增强就是采用一定的算法对低质量的条纹图像进行处理,使其纹线结构清晰,进而突出所需要的特征信息,削弱或去除某些不需要的信息,目的是保证图像条纹特征信息的准确性和可靠性。

本文提出的条纹图像增强算法流程如图 1 所示。

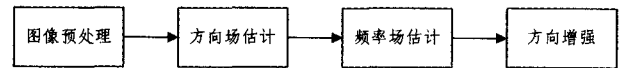


图 1 条纹图像增强算法流程图

3.1 条纹图像预处理

对于灰度图像,我们直接输入,进行后续的预处理操作,对于彩色图像,我们可先进行灰度化,或按下式取亮度分量 Y 作这预处理的输入图像。

$$\begin{cases} Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B \\ U = -0.147R - 0.289G + 0.436B \\ V = 0.615R - 0.518G - 0.100B \end{cases} \quad (5)$$

使用式(5)将 RGB 空间下的图像转换到 YUV 空间,并对计算所得亮度分量 Y 使用式(6)进行预处理操作:

$$f'(x,y) = g(x,y) * (f(x,y) - \varphi(x,y)) \quad (6)$$

式中

$$g(x,y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_m} \sum_m c_g(y-m) \left(\sum_n r_g(x-n) f(x,y) \right)$$

$$\varphi(x,y) = \sum_m c_\varphi(y-m) \left(\sum_n r_\varphi(x-n) f(x,y) \right)$$

$$r_\varphi(x) = \left[\frac{1}{\sqrt{n * m}} \quad \dots \quad \frac{1}{\sqrt{n * m}} \right]_n$$

$$c_\varphi(y) = \left[\frac{1}{\sqrt{n * m}} \quad \dots \quad \frac{1}{\sqrt{n * m}} \right]_m^T$$

$$r_g(x) = e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, c_g(y) = e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}}$$

其中, $f'(x,y)$ 表示结果图像, $g(x,y)$ 表示可分离形式的高通滤波器, $f(x,y)$ 表示原始图像亮度信息, $\varphi(x,y)$ 表示图像的低频信息, $*$ 表示卷积操作。 $r_\varphi(x)$ 是均值滤波器行滤波向量, $c_\varphi(y)$ 是均值滤波器列滤波向量, $r_g(x)$ 是高通滤波器行滤波函数, $c_g(y)$ 是高通滤波器列滤波函数。

图 2 为图像预处理效果,图 2(a)为原图,图 2(b)为原图的亮度分量图,图 2(c)为亮度分量图滤波后效果。均值滤波器窗口半径越大,滤波效果越显著,图像越模糊。高通滤波器是一个平滑化滤波器,平滑化程度由标准差 σ 来控制, σ 值越大,平滑程度越高,相对地,图像越模糊。因此,应根据要求选择合适的参数。这里我们选择均值滤波器窗口半径为 9,高通滤波器标准差为 1.6,此时实验结果表明,滤波效果相对较好。原图花瓣上的经脉纹路由于颜色相近难以分辨,经过预处理后,花瓣上的经脉纹路能够较清晰反映出来。

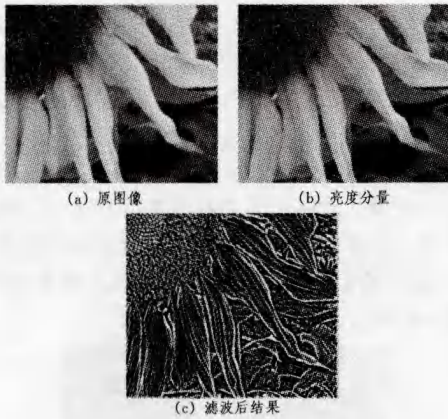


图 2 图像预处理结果

3.2 图像方向场估计

使用文献[15]提出的最小均方方向估计算法估计图像的方向场。设预处理计算结果为 G ,主要计算步骤如下:

- 1) 将 G 划分为 $w \times w$ 大小的块。
- 2) 对每个块分别采用简单的 Sobel 算子或相对较为复杂的 Marr-Hildreth 算子,来求取块内每个像素点 (i,j) 处的 x 和 y 方向的梯度值 $T_x(i,j)$ 和 $T_y(i,j)$ 。
- 3) 根据点方向的计算方法求得步骤 1) 所得块的方向。
- 4) 由于受噪声的影响,步骤 3) 计算得到的块方向很可能不正确。由于当前块的方向跟领域块方向相比变化缓慢,因此使用一个低通滤波器可以对所求的方向场进行平滑去噪。

为了实现平滑,使用一个低通滤波器,将方向场转换成一个连续向量场,公式如下:

$$\begin{cases} \phi_x(i,j) = \cos(2\theta(i,j)) \\ \phi_y(i,j) = \sin(2\theta(i,j)) \end{cases} \quad (7)$$

其中, ϕ_x 和 ϕ_y 分别是向量场的 x 和 y 分量。低通滤波器实现如下:

$$\begin{cases} \phi_x'(i,j) = \sum_{u=-W_\phi/2}^{W_\phi/2} \sum_{v=-W_\phi/2}^{W_\phi/2} W(u,v) \phi_x(i-uw, j-vw) \\ \phi_y'(i,j) = \sum_{u=-W_\phi/2}^{W_\phi/2} \sum_{v=-W_\phi/2}^{W_\phi/2} W(u,v) \phi_y(i-uw, j-vw) \end{cases} \quad (8)$$

其中, W 是二维低通滤波器,滤波器窗口大小为 $W_\phi \times W_\phi$ 。

像素 (i,j) 处的平滑方向场计算如下:

$$\phi(i,j) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\phi_y'(i,j)}{\phi_x'(i,j)} \right) \quad (9)$$

图 3 为指纹图像的方向场,图 3(a)为原图,图 3(b)为图像方向场估计,图中短线为指纹图中条纹方向描述。图像大小为 360×360 ,分为 24×24 块,每块有 15×15 像素。

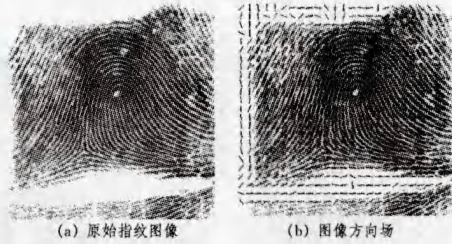


图 3 指纹图像及其方向场

3.3 图像频率场估计

设 G 为 3.1 节预处理计算结果, ϕ 为 3.2 节方向场计算结果,则图像频率场计算步骤如下:

- 1) 将 G 划分为 $w \times w$ 大小的块;
- 2) 以像素点 (i,j) 为块中心选取窗口大小为 $l \times w$ 的矩形窗,并计算其方向窗口;
- 3) 通过式(10)和式(11)估计方向窗口中纹线的频率:

$$X[k] = \frac{1}{w} \sum_{d=0}^{w-1} G(u,v), k=0,1,\dots,l-1 \quad (10)$$

$$\begin{cases} u = i + (d - \frac{w}{2}) \cos\phi(i,j) + (k - \frac{l}{2}) \sin\phi(i,j) \\ v = i + (d - \frac{w}{2}) \sin\phi(i,j) + (k - \frac{l}{2}) \cos\phi(i,j) \end{cases} \quad (11)$$

$X[k]$ 序列之间两个连续的波峰或波谷之间的像素均值为 $\lambda(i,j)$,则 $\lambda(i,j)$ 的倒数即为频率 $f(i,j)$ 。

3.4 Gabor 滤波对条纹信息增强

通过 Gabor 滤波器能有效去除噪声并实现条纹信息的增强。本文使用的偶对称 Gabor 滤波器如下所示:

$$h(x,y;\phi,f) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[\frac{\phi_x^2}{\sigma_x^2} + \frac{\phi_y^2}{\sigma_y^2} \right]\right\} \cos(2\pi f\phi_x) \quad (12)$$

$$\begin{cases} \phi_x = x \cos\phi + y \sin\phi \\ \phi_y = -x \sin\phi + y \cos\phi \end{cases} \quad (13)$$

其中, ϕ 表示 Gabor 滤波器的方向,也就是之前得到的图像方向场, f 表示脊线形成的正弦平面波的频率,即频率场估计得到的图像频率场, σ_x 和 σ_y 分别为 Gauss 包络在 x 轴和 y 轴上的标准差。

图 4 为指纹图像在条纹方向场和频率场约束下的条纹增

强效果。图 4(a)为图 3(a)经 Gabor 方向滤波后的结果,图 4(b)为对图 4(a)进行二值化后的结果。

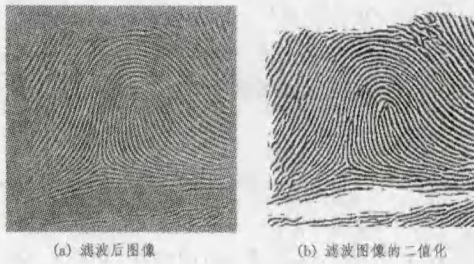


图 4 指纹图像及其方向与频率场条纹增强结果

4 实验结果及分析

本文中的实验都是在 PC 机(Inter(R) Core(TM)2 Duo CPU 2.80GHz,内存 2.00GB)上采用 VC++2008 编程实现的。

图 5 为对指纹条纹图像采用本文方法与传统 Gabor 滤波方法进行条纹增强的结果对比。图 5(a)为原图,图 5(b)为本文方法增强结果,图 5(c)为传统 Gabor 滤波方法增强结果。从图 5(c)中可以看出,传统 Gabor 滤波增强后,条纹还存在局部断开的情况,条纹均匀性、清晰流畅性不如本文方法。

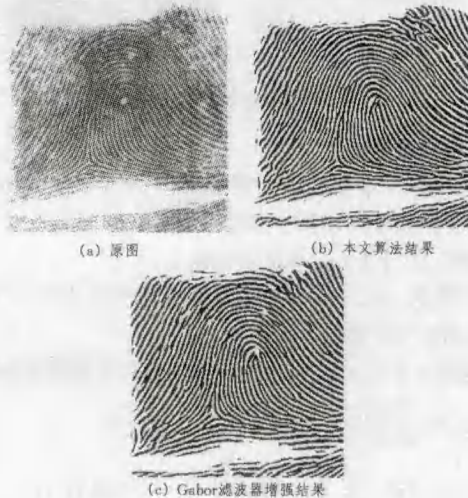


图 5 本文算法与传统 Gabor 滤波器增强结果对比

图 6 是带有结构光条纹的人脸图像的条纹分割对比图,图 6(a)是原始图像(局部),图 6(b)是 6(a) 的亮度分量,图 6(c)为对图 6(b)的直接二值化结果,图 6(d)为本文算法的条纹图像增强结果。从图 6(c)中可以看出采用固定阈值二值化无法提取出结构光条纹,从图 6(d)可以观察到通过本文条纹增强算法处理后,结构光条纹可较清晰地提取出来,能够为后续的几何重建和匹配提供更为有效的信息。

图 7 是图 6(a)中红色矩形区域处理后的效果对比图。图 7(b)中灰度图是使用本文提出的预处理改进方法处理后的效果图,根据预处理之后的图像信息计算得到的条纹方向场用黑色短线表示。图 7(c)是 7(b)经过条纹增强后的效果图。从图中可以看到,结构光条纹增强后在结构上与原始图像条纹信息基本符合,由于物体材质和环境高光反射引起的条纹不连续的情况,在增强后也得到了很好的改善。因此,改进后的条纹增强算法对结构光条纹的增强也是适用的。

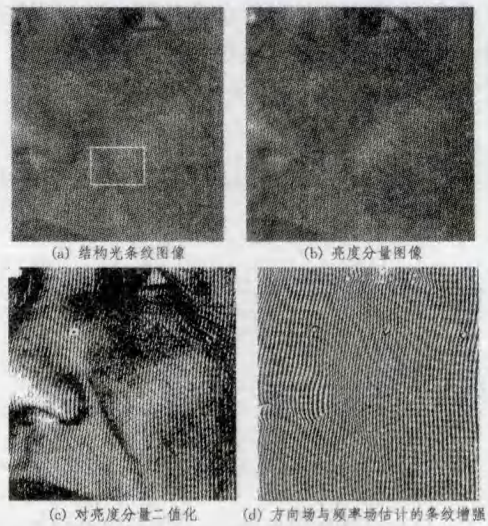


图 6 方向场与频率场估计的条纹增强结果

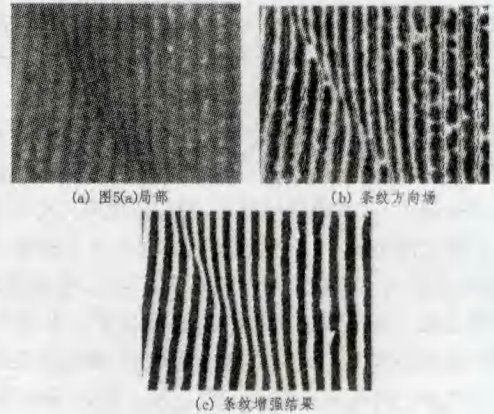


图 7 结构光条纹增强结果

图 8 是带有结构光条纹的金属表面图像的条纹分割对比图,图 8(a)是原始图像,图 8(b) 是将传统指纹图像梯度方向增强算法^[3]应用在图 8(a)上的结果,图 8(c)为将改进后的条纹增强算法作用在图 8(a)上的结果。从图 8(b)中可以发现,由于金属表面噪声对方向场的估计产生了很大的影响,因此采用传统指纹增强算法增强后的伪条纹非常多,增强后的图像根本无法为后续处理所用。图 8(c)使用改进后的预处理操作,可以很好地保留条纹信息,经方向场和频率场约束的条纹增强算法处理后,结构光条纹更加清晰。

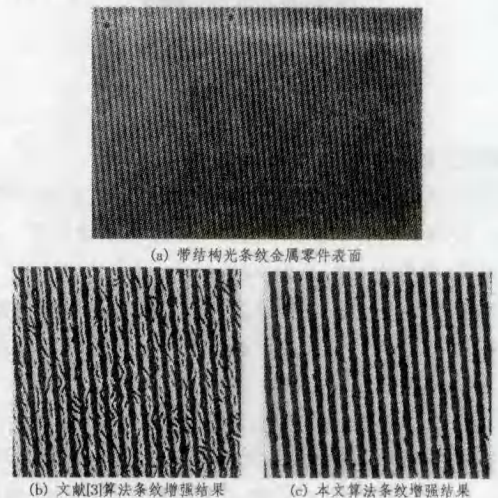


图 8 金属零件表面结构光条纹增强结果

目前,多数文献采用基于方向场约束的 Gabor 滤波器来对条纹图像进行增强,本文在此基础上引入频率场。实验结果表明,使用基于方向场和频率场约束的增强算法,可以获得更加清晰流畅的条纹图像的纹线,能更有效、完整地提取结构光图像的条纹信息,有利于图像的进一步处理。

结束语 结构光三维重建的首要任务是对结构光条纹进行提取与解码。由于环境影响,获取的结构光图像往往光照是不均匀的,无法直接提取出精确的条纹。结构光图像具有明显的条纹结构信息,本文在分析指纹条纹增强算法的基础上进行改进,提出了一种基于图像方向场与频率场约束的条纹图像增强算法,设计了图像方向场与频率场的计算方法,构造了方向场与频率场的约束的 Gabor 滤波器。实验结果表明,该算法可有效消除图像光照不均匀及噪声较强(如金属件表面)的影响,较好地增强结构光图像的条纹信息。

参 考 文 献

[1] Kass M, Witkin A. Analyzing Orientation Patterns [J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1987, 37(3): 362-385

[2] Jain A K, Hong L, Bolle R. On-line fingerprint verification [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(4): 302-314

[3] Wang Yi, Hu Jian-kun, Schroder H. A Gradient Based Weighted Averaging Method for Estimation of Fingerprint Orientation Fields [C] // Proceedings of Digital Imaging Computing: Techniques and Applications. Queensland, 2005: 195-202

[4] Bazen A M, Gerez S H. Systematic methods for the computation of the directional fields and singular points of fingerprints [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelli-

gence, 2002, 24(7): 905-919

[5] Perona P. Orientation Diffusions [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1998, 7(3): 457-467

[6] Jain A K, Prabhakar S, Hong L. A multichannel approach to fingerprint classification [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(4): 348-359

[7] Karu K, Jain A K. Fingerprint classification [J]. Pattern Recognition, 1996, 17(3): 389-404

[8] Sherlock B G, Monro D M. A model for interpreting fingerprint topology [J]. Pattern Recognition, 1993, 28(2): 139-153

[9] Vizcaya P, Gerhardt L. A nonlinear orientation model for global description of fingerprints [J]. Pattern Recognition, 1996, 29(7): 1221-1231

[10] Gu J, Zhou J, Zhang D. A combination model for orientation field of fingerprints [J]. Pattern Recognition, 2004, 37(3): 543-553

[11] Li Jun, Yau Wei-yun, Wang Han. Constrained nonlinear models of fingerprint orientation with prediction [J]. Pattern Recognition, 2006, 39(1): 102-114

[12] Yang Yi, Hu Jian-kun, Phillips D. A Fingerprint Orientation Model Based on 2D Fourier Expansion (FOMFE) and Its Application to Singular Point Detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29(4): 573-585

[13] Huckemann S, Hotz T, Munk A. Global Models for the Orientation Field of Fingerprints; An Approach Based on Quadratic Differentials [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(9): 1507-1519

[14] 陈大海, 郭雷, 李海. 基于二值指纹图像的 Gabor 滤波增强算法 [J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(29): 4-7

[15] Hong Lin, Wan Yi-fei, Jain A. Fingerprint image enhancement: algorithm and performance evaluation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(8): 777-789

(上接第 274 页)

[7] Shan Y, Sahwney H S, Kumar R. Unsupervised learning of discriminative edge measures for vehicle matching between non-overlapping cameras [C] // IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2005, 1: 894-901

[8] Yan Bo, Wang Sheng-jin, Chen You-bin, et al. Deformable 3-D model based vehicle matching with weighted Hausdorff and EDA in traffic surveillance [C] // International Conference on Image Analysis and Signal Processing, 2010: 22-27

[9] Jelać V, Castañeda J O N, Frías-Velázquez A, et al. Real-Time Vehicle Matching for Multi-Camera Tunnel Surveillance [C] // Proceedings of the SPIE 2011. San Francisco, 2011

[10] Wang Hao-you, Shih H-C. A Robust Vehicle Model Construction and Identification System using Local Feature Alignment [C] // 2013 IEEE 17th International Symposium on Consumer Electronics (ISCE), 2013

[11] Itti L. Models of Bottom-Up and Top-Down Visual Attention [D]. California Institute of Technology Pasadena, 2000

[12] 李旂. 基于视觉注意机制的运动目标识别算法研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2010

[13] 宋雁澜. 视觉注意模型及其在图像分类中的应用 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008

[14] Itti L, Koch C, Niebur E. A Model for Saliency-Based Visual

Attention for Rapid Scene Analysis [J]. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(11): 1254-1259

[15] Pei S-C, Cheng Ching-min. A novel block truncation coding of color images by using quaternion-moment preserving principle [C] // IEEE International Symposium Circuits and Systems, 1996, 2: 684-687

[16] Bas P, Bihan N L, Chassery J. Color watermarking using quaternion Fourier transform [C] // Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2003: 521-524

[17] Sangwine S J. Color image edge detector based on quaternion convolution [J]. Electron Letters, 1998, 34(10): 969-971

[18] Shi L, Funt B. Quaternion color texture segmentation [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2007, 107: 88-96

[19] Guo C L, Ma Q, Zhang L M. Spatio-temporal saliency detection using phase spectrum of quaternion Fourier transform [C] // IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2008: 1-8

[20] Daugman J G. Uncertainty relation for resolution in space, spatial frequency, and orientation optimized by two-dimensional visual cortical filters [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1985, 2: 1160-1169

[21] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE Trans. Biomed. Eng., 1979, BME-9: 63-66