

基于频域滤波的高光去除方法

柴玉亭¹ 王昭² 高建民¹ 黄军辉²

(¹ 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

² 西安交通大学机械工程学院, 陕西 西安 710049

摘要 结构光三维测量广泛应用于测量物体外轮廓,但使用这种技术测量金属零部件时,会由于金属表面的局部强反射形成高光区域,这种高光致使相机饱和、信息丢失,造成条纹中心提取不准确,从而产生较大的测量误差。因此,寻找一种有效的手段来避免高光问题是非常必要的。基于结构光测量系统自身的特点,提出一种新的高光去除方法——频域滤波法。该方法将高光视作噪声,通过对比分析漫反射光条和高光光条频谱分布的不同,制作合适的滤波器以滤除高光。通过 3dsmax 软件仿真,模拟高光效果,测试频域滤波后的条纹中心提取精度比不滤除前提高 0.8 pixel。将该方法应用于实际叶片测量中,较好地解决了其中的高光问题。仿真和实验均证明,频域滤波法可以在一定程度上降低高光对结构光条纹中心提取准确度的影响。

关键词 测量;结构光三维测量;高光去除;频域滤波;条纹中心

中图分类号 TH741 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.051205

Highlight Removal Based on Frequency-Domain Filtering

Chai Yuting¹ Wang Zhao² Gao Jianmin¹ Huang Junhui²

(¹ State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China
² School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract Three-dimensional (3D) measurement technique of structured light is widely used in objects' outline measurement. However, when it is applied to measure mechanical components and parts, some parts of intense reflection (highlight or specular light) on the surface of metal components would form highlight area. The intense reflected light can make CCD saturate and cause the extraction of center of light stripe inaccurate, and then errors would appear in the measurement results. Thus, it is a matter of great urgency to find a way to avoid highlight. We try to use the characteristic of structured light measurement system to propose a new method of highlight removal—frequency-domain filtering. Highlight is defined as a kind of noise, and this method compares the difference between highlight frequency spectrum and diffuse light frequency spectrum to make frequency filtering, and then to remove the influence of highlight. Simulating highlight in 3dsmax software, the proposed method can get 0.8 pixel improvement in the accuracy of light stripe extraction. Results of real blade test are also provided and prove that it is a better solution in actual blade test. Both simulation and experiment confirm that the proposed method could improve the accuracy in extraction of light stripe center.

Key words measurement; structured light three-dimensional measurement; highlight removal; frequency-domain filtering; light stripe center

OCIS codes 120.3930; 120.2440; 120.5700; 120.6650

1 引言

在结构光编码三维测量中,需要投影条纹到被测物体表面^[1],条纹携带了物体表面轮廓的三维信息,条纹中心的准确提取成为结构光三维测量的关键技术之一^[2,3]。在现有方法中,比较稳定实用的方法是利用

收稿日期: 2013-01-14; **收到修改稿日期**: 2013-03-06; **网络出版日期**: 2013-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(61078042)资助课题。

作者简介: 柴玉亭(1989—),女,硕士研究生,主要从事光学测量方面的研究。E-mail: yutingchai@gmail.com

导师简介: 高建民(1958—),男,博士,教授,主要从事制造信息工程与制造系统资源优化,集成质量控制与可靠性工程,无损检测与缺陷识别,复杂产品热态分析、热设计与高效冷却等方面的研究。E-mail: gjm@mail.xjtu.edu.cn

条纹灰度梯度变化,提取条纹中心。这种方法的前提是条纹的灰度变化仅反映物体表面轮廓的变化。但在实际应用中,由于被测物体表面反射特性的影响,条纹截面的灰度变化会受到很多因素的干扰,其中高光(即镜面反射)是影响最为强烈的一个因素。高光的存在不仅可能会使相机饱和,丢失条纹灰度变化信息,而且还将改变原有漫反射条纹的灰度分布,从而影响条纹中心提取的准确性。去高光问题目前也是利用光学方法测量金属物体所面临的一个难点与共性问题。

目前国内外对于高光问题的研究方法主要分为以下几类:1) 避开高光,如从多个角度拍摄同一内容的图片^[4],不同图片之间高光在物体上出现的位置不同,达到信息互补,消除高光的影响,称为多角度法;2) 去除高光,如通过喷涂喷雾法改变金属表面的反射特性,消除高光;或根据镜面反射和漫反射的不同反射特性,从反射分量中去除镜面反射分支,仅保留漫反射分支,从而恢复出物体表面的原始灰度及颜色信息,例如偏振法^[5~8]、双色模型法^[8~10];3) 利用高光,这种方法直接利用高光中包含的物体表面信息而恢复出表面轮廓,主要有光度学法^[11,12]、偏振法等;4) 其他,如多次曝光法^[13],其思路是从改变拍摄相机的曝光时间入手,通过调节相机的曝光时间,使得高光处不饱和。

应用上述方法进行复杂面型的高精度测量时还存在一些问题。其中,多角度法有时难以找到合适的角度使得不同视场中高光位置不重叠;喷涂喷雾法会降低测量精度及增加额外工作量,且对叶片表面有一定腐蚀;偏振法需外加偏振片且实验过程较复杂,会增加实验测量的复杂度;双色模型法需要通过空间聚类的方法分离高光与漫反射分支,这也使得这种方法受被测物体表面噪声的影响很大;光度学法主要用于实验室测量,实验条件要求非常高;而多次曝光仅解决了拍摄图像中高光信息饱和的问题,未能修正高光带来的条纹中心偏移现象,不能满足测量的精度需求。

本文结合结构光三维叶片轮廓测量的具体特点和要求,提出了一种基于频域滤波的高光去除方法。该方法有效利用了投影编码条纹这一外加调制信息。通过对比高光与漫反射条纹在频谱分布上的不同,设计合适的频域滤波器以滤除高光频谱,并保留漫反射频谱,然后通过傅里叶逆变换,得到去除高光后的条纹灰度变化图。

2 3dsmax 仿真系统建立

选用 3dsmax 作为仿真软件进行去高光方法效果仿真验证。通过设置物体表面材质属性、模拟投影仪、相机等参数,可以仿真出同一物体表面高光与非高光的实际效果,然后利用去高光后的条纹图与非高光条纹图进行比对,从而实现对去高光方法效果与精度的评价。

在软件中建立暗室,将后续添加的测量物体(铝制平板)、投影仪、相机等放入此暗室,以避免外界杂光的干扰。仿真条件为:投影仪正对测量物,且镜头距测量物表面 700 mm,相机放置于与投影仪-测量物连线成 45° 角、距测量物表面 600 mm 处,投影条纹到被测物体表面,如图 1 所示。

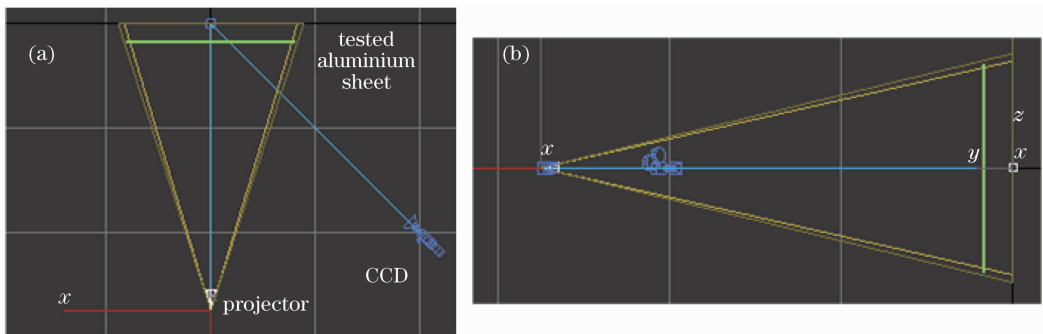


图 1 3dsmax 仿真结构图。(a) 俯视图;(b) 右视图

Fig. 1 Simulation schematic in 3dsmax. (a) Top view; (b) right view

在图 1 所示的仿真系统中,拍摄铝板的仿真图,如图 2 所示,其中图 2(a)、(b)、(c)是非高光时投影白光、竖直条纹、水平条纹的拍摄图,而图 2(d)、(e)、(f)是含高光时投影白光、竖直条纹、水平条纹的拍摄图,可以观察到图中明显的高光区。

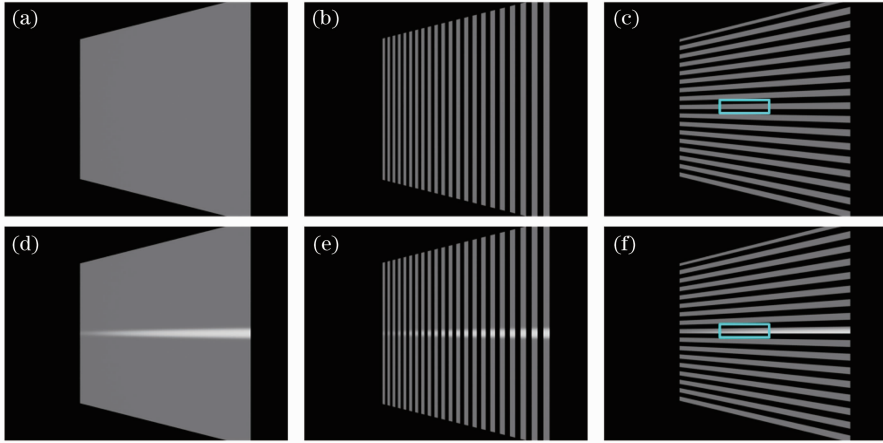


图2 仿真铝板测试图。(a)非高光,投影白光;(b)非高光,投影垂直条纹;

(c)非高光,投影水平条纹;(d)含高光,投影白光;(e)含高光,投影垂直条纹;(f)含高光,投影水平条纹

Fig. 2 Visual effects in simulation of aluminum plate. (a) Without highlight, projecting white light; (b) without highlight, projecting vertical stripes; (c) without highlight, projecting horizontal stripes; (d) with highlight, projecting white light; (e) with highlight, projecting vertical stripes; (f) with highlight, projecting horizontal stripes

3 频域滤波法

3.1 原理

图3为从图2(c)和(f)得到的同一条纹截面漫反射影响下与高光影响下的灰度变化图,从中可以看出,高光条纹中心与漫反射条纹中心并不重合,有 Δ 的差距,这就导致按照相机接收到的含有漫反射条纹与高光条纹叠加的灰度后,所提取的条纹中心不能反映仅含漫反射时条纹中心的真实情况,此时,高光即可认为是夹杂在漫反射光强变化上的加性噪声。因此,借鉴信号处理中对噪声的去除思想,采用频域滤波的方法去除高光的影响。

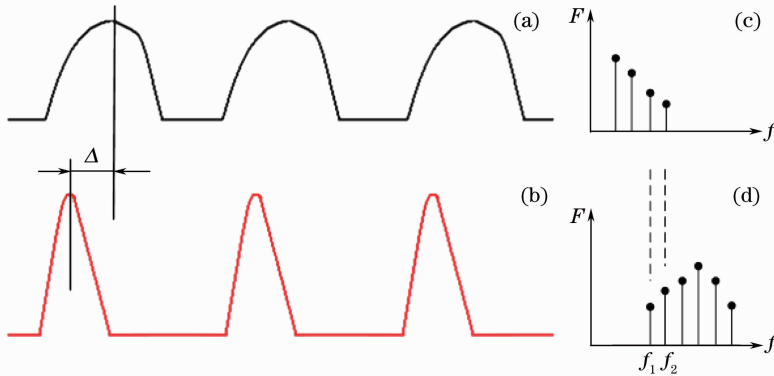


图3 高光与漫反射频谱分布图。(a)仅漫反射影响下条纹截面的灰度变化;(b)仅高光影响下条纹截面的灰度变化;

(c)与(a)对应的频谱;(d)与(b)对应的频谱

Fig. 3 Frequency spectrum of highlight and diffuse reflection. (a) Gray variation in diffuse reflection stripe in longitudinal section; (b) gray variation in specular reflection stripe in longitudinal section; (c) frequency spectrum of (a); (d) frequency spectrum of (b)

频域滤波的思想^[14]如图4所示。该方法的关键在于滤波器的选取。针对本文中的高光问题,认为高光的灰度变化是高频噪声,可以选用低通滤波器加以滤除。图3反映了高光与漫反射光在同一区域的不同灰度变化,将截面的变化看做一维信号,其右侧示意了相应的频谱图。通过分析可以得出,高光信号傅里叶展开后,所得三角函数的频率较高,而漫反射的较低,但这两部分的频谱可能会有一部分重合。为了不丢失漫反射的灰度变化,选取滤波器时不能将重合部分(如图3中的 f_1 和 f_2)去除,而应在滤波器的通频带尽可能

逼近漫反射的频谱变化,这一点与一般的滤波器设计有些不同。

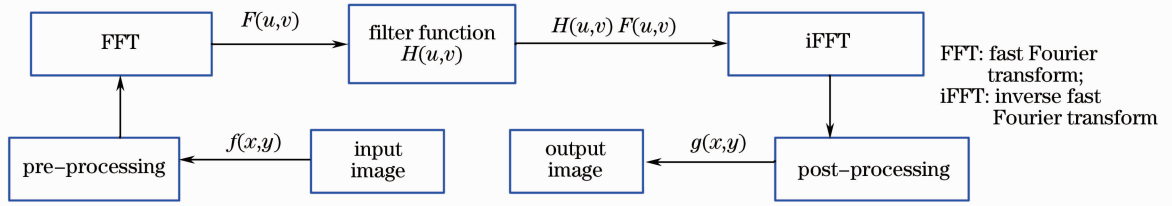


图4 频域滤波基本步骤

Fig. 4 Basic process of frequency-domain filtering

3.2 滤波器选取

根据 3.1 节的分析,滤波器的选取需要满足两个条件:1)低通滤波;2)通频带的频谱分布尽可能接近该条纹处仅含漫反射成分时的频谱外轮廓,使得滤波后不仅能去除高光,还尽可能完整的保留漫反射的频谱变化规律。

在第 2 节的仿真条件下首先分析图 2(c)、(f)中框选的高光区域频谱图,如图 5 所示,图 5(a)~(c)为同时含有高光与漫反射光的频谱图,图 5(d)~(f)为仅有漫反射时的频谱图。图 5(a)和(d)为三维频谱全貌,图 5(b)和(e)为 yz 平面内观察到的频谱图,图 5(c)和(f)为 xz 平面内观察到的频谱图,可以看出,频谱主要沿 y 轴分布于 yz 平面内。

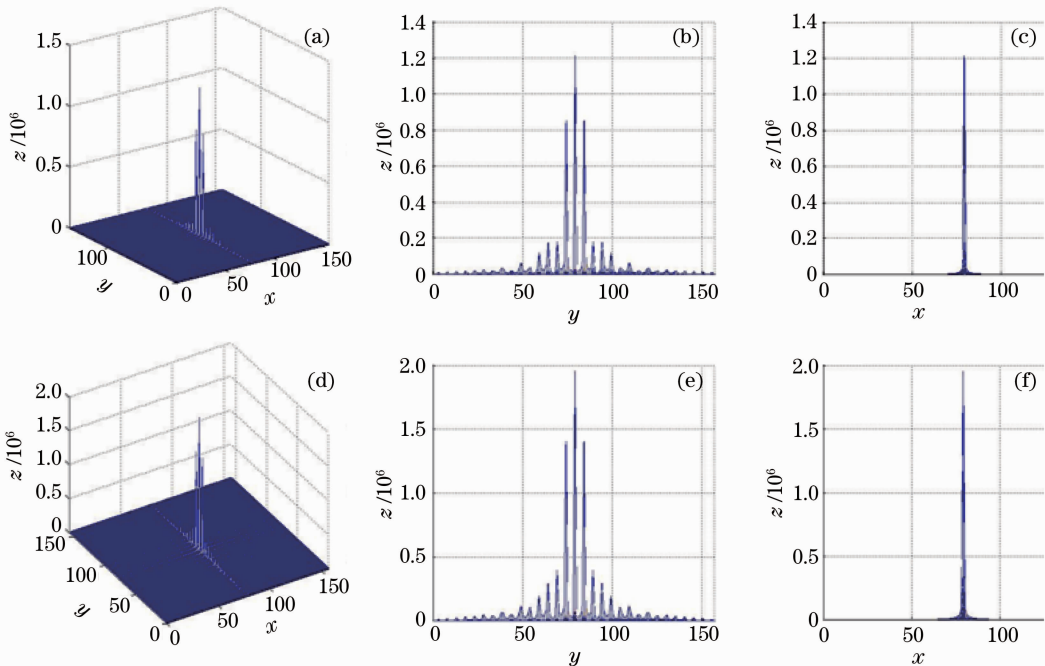


图5 高光与漫反射频谱对比。同时含有高光和漫反射的(a)三维频谱图,

(b) yz 平面频谱图及(c) xz 平面频谱图;仅有漫反射时的(d)三维频谱图,(e) yz 平面频谱图及(f) xz 平面频谱图

Fig. 5 Comparison of frequency spectrum between highlight and diffuse reflection. (a) Three-dimensional frequency spectrum, (b) spectrum in yz plane and (c) spectrum in xz plane for the case of highlight and diffuse reflection; (d) three-dimensional spectra, (e) spectra at yz plane and (f) spectra at xz plane for the case of diffuse reflection only

对比两幅图的频谱图可以验证上述分析,即含有高光的频谱图含有部分高频分量,且在低频上与仅含漫反射的频谱图有一定重叠。基于这两点,需要选取外形轮廓接近漫反射频谱图的低通滤波器。目前常用的低通滤波器有高斯低通滤波器、巴特沃斯低通滤波器和切比雪夫低通滤波等。切比雪夫低通滤波器分为 I 型和 II 型, I 型频率响应的幅度在通带中是等波纹的,而在阻带中是单调的, II 型频率响应的幅度在通带中是单调的,在阻带中是等波纹的^[15],这两种滤波器的频率响应曲线与漫反射频谱分布的外轮廓差距较大,因而不选取切比雪夫滤波器进行滤波处理。另外两种滤波器的外轮廓可以通过选取一定的系数逼近漫反射频

谱分布,但毕竟还有一定差异,因此考虑根据漫反射频谱的外轮廓分布生成滤波器。

对图 5(e)所示 yz 平面内的频谱插值得到频谱的外轮廓分布,插值函数必须在每个频率处的幅值等于漫反射频谱在该点的幅值,且要求插值函数连续变化,在拐点处函数的二阶导数连续。且通过观察其外轮廓的本身特点,采用 B 样条插值函数,插值后如图 6(a)所示。在图 5(f)的 xz 平面,可以看到频谱分布于很窄的频带内,且含有高光的与不含高光的频谱差异不大,所以在这个平面内不做插值,仅取出外轮廓变化,如图 6(b)所示。

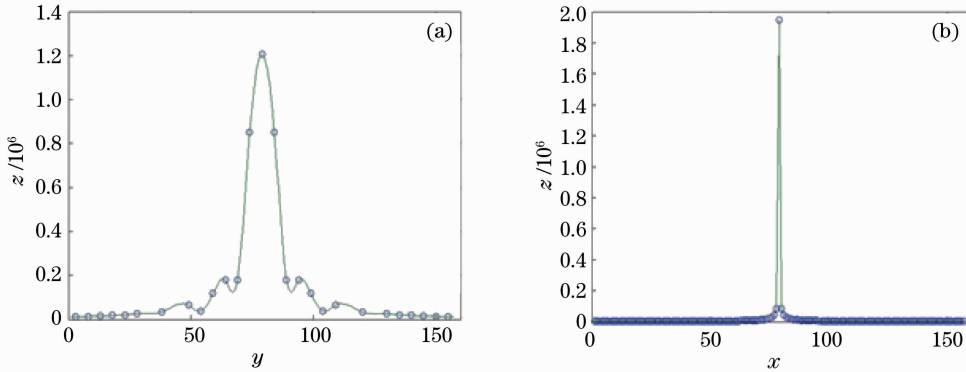


图 6 yz 平面及 xz 平面外轮廓提取。(a) B 样条插值外轮廓;(b) 直接提取外轮廓

Fig. 6 Outline extraction of yz plane and xz plane. (a) Outer outline of B-spline interpolation in yz plane; (b) extraction of outline in xz plane directly

根据两个方向上函数的变化规律,将两个方向的变化规律相点乘,并归一化,制作滤波器模板,如图 7 所示。

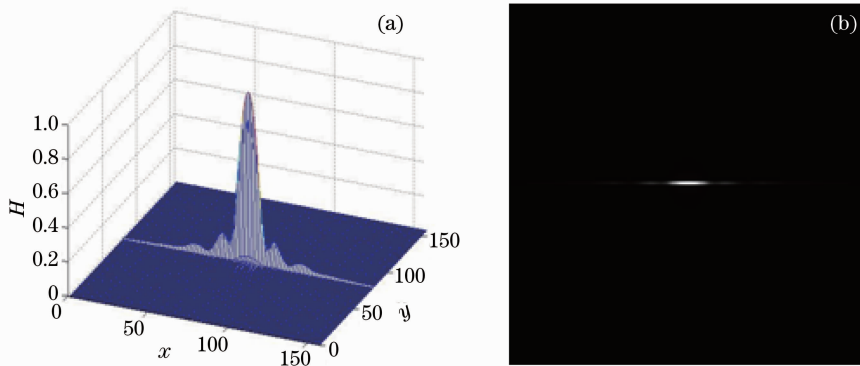


图 7 B 样条滤波模板。(a) 滤波模板三维图;(b) 滤波模板的图像表示

Fig. 7 B-spline filtering module. (a) Three-dimensional diagram of B-spline filtering module; (b) gray image of B-spline filtering module

3.3 仿真验证

使用常用的低通滤波器(如高斯低通滤波器或巴特沃斯低通滤波器)和上述提出的低通滤波器对同时含有高光 and 漫反射的频谱图进行滤波,并将滤波后的图像进行傅里叶逆变换得到滤波后的效果图,如图 8 所示,其中图 8(a)为仅含漫反射的条纹图,图 8(c)为同一位置含有高光与漫反射的条纹图,图 8(e),(g),(i)分别为对图 8(c)使用高斯滤波、巴特沃斯滤波和 B 样条滤波后的效果图,图 8(k)为对图 8(a)使用 B 样条滤波后的效果图。图(b),(d),(f),(h),(j),(l)为相应的条纹中心(使用灰度重心法)提取结果。

将图 8 中不同滤波处理后的条纹中心与仅含漫反射的条纹中心进行对比,结果如表 1 所示。表中以漫反射时提取的条纹中心为准确值,将其他条件下提取的条纹中心与漫反射时提取的条纹中心做对比,每一根条纹的偏差平均值为表中条纹 1~5 下的数值,可以看出,无论哪种情况下,条纹 2~4(即中间三根条纹)在每种处理情况下提取效果一致,而两边的两个条纹变化无规律,这是由于条纹中心提取程序的误差造成的。所以最后分析每种情况的条纹提取偏差平均值时,仅仅计算中间三根条纹的均值,即最后一列的均值并非前面 5 列的平均。

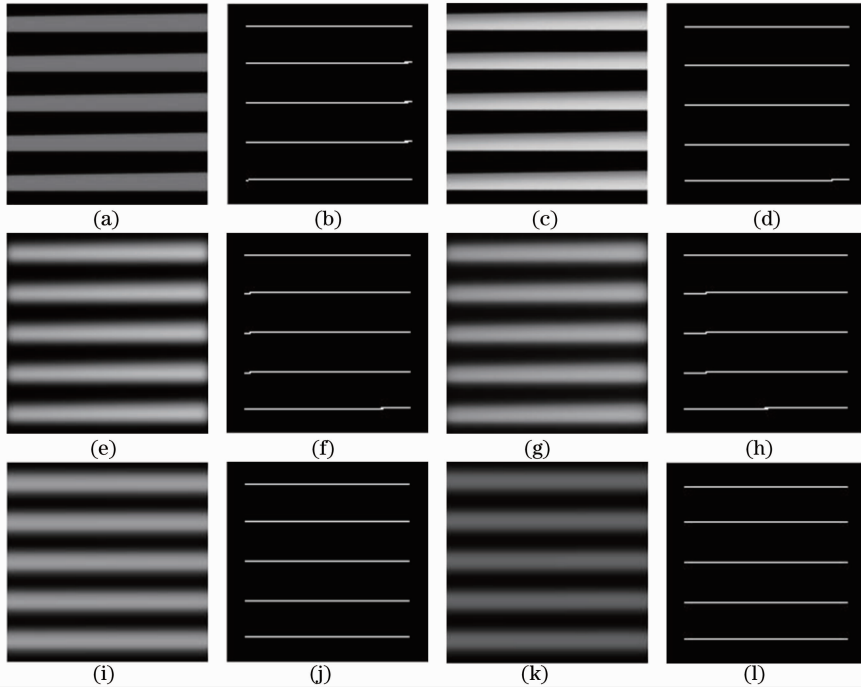


图 8 仿真铝板测试图滤波结果对比。(a)漫反射条纹;(b)对(a)提条纹中心;(c)高光条纹;(d)对(c)提条纹中心;(e)高斯滤波后;(f)对(e)提条纹中心;(g)巴特沃斯滤波后;(h)对(g)提条纹中心;(i)B样条滤波后;(j)对(i)提条纹中心;(k)B样条滤波漫反射条纹;(l)对(k)提条纹中心

Fig. 8 Comparison of filtering results of simulated images under different filters (test target: aluminum plate). (a) Light stripe of diffuse reflection; (b) extracting the center of each light stripe in (a); (c) light stripe of specular reflection; (d) extracting the center of each light stripe in (c); (e) after Gaussian filter; (f) extracting the center of each light stripe in (e); (g) after Butterworth filter; (h) extracting the center of each light stripe in (g); (i) after B-spline filtering; (j) extracting the center of each light stripe in (j); (k) diffusely reflected stripe of B-spline filtering for (a); (l) extracting the center of each light stripe in (k)

表 1 平板条纹中心提取结果偏差对比(单位: pixel)

Table 1 Comparison of extracted result deviation of plate stripe center under different pre-processing (unit: pixel)

Type of stripe center	Stripe 1	Stripe 2	Stripe 3	Stripe 4	Stripe 5	Mean
Diffuse reflection	0	0	0	0	0	0
Highlight reflection	0.1355	1.3684	1.3684	1.3684	0.1894	1.3684
After Gaussian filtering	0.8712	0.8539	0.8539	0.8539	0.8155	0.8539
After Butterworth filtering	0.8224	0.8377	0.8377	0.8377	0.8381	0.8377
After B-spline filtering	0.7778	0.4738	0.4738	0.4738	0.2882	0.4738
Error of B-spline filtering	0.8224	0.2868	0.2868	0.2868	0.1385	0.2868

从表 1 中可以看出,含有高光时直接提取条纹中心与仅含漫反射的条纹中心偏差为 1.3684 pixel。采用高斯低通和巴特沃斯低通,误差约为 0.8 pixel。采用本文提出的 B 样条滤波偏差为 0.4~0.5 pixel,比常用低通滤波器改善 0.3~0.4 pixel,且滤波后的条纹中心提取精度比不滤除前提高 0.8 pixel。表中最后一行为使用 B 样条滤波器对仅含漫反射条纹的图像进行滤波,然后提取条纹中心与直接提取漫反射条纹中心的对比,因 B 样条滤波器模板是由漫反射条纹的频谱图得到的近似轮廓分布,因而这种对比反映了 B 样条滤波本身的误差,为 0.2868 pixel。

用上述思路处理被测物体为圆柱体时的高光图,处理结果如图 9 所示,图中各编号与图 8 中对应,并将提取的条纹中心结果列于表 2,表中各项的含义与表 1 类似,在此不再赘述。

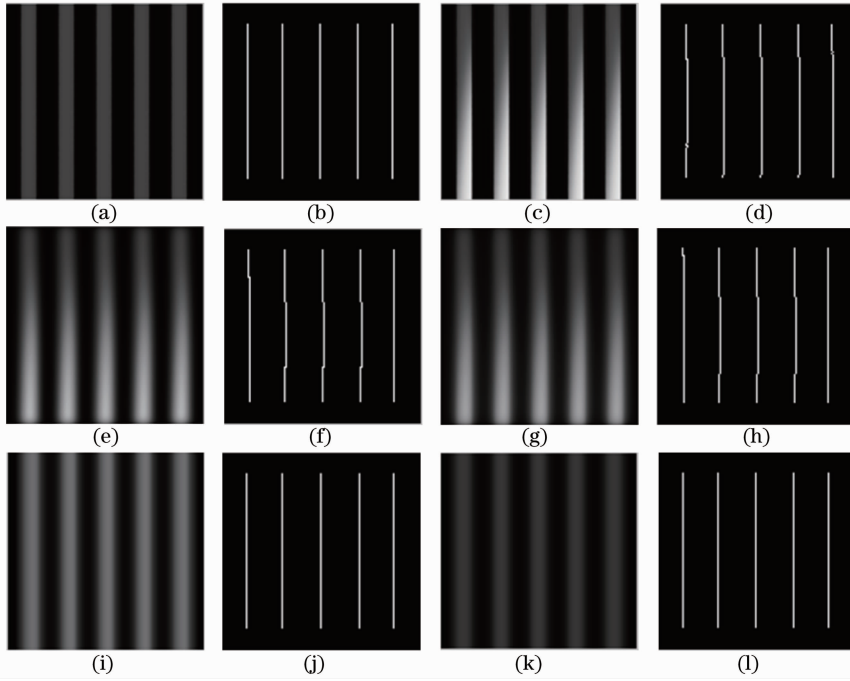


图9 仿真铝制圆柱测试图滤波结果对比。(a)漫反射条纹;(b)对(a)提条纹中心;(c)高光条纹;(d)对(c)提条纹中心;(e)高斯滤波后;(f)对(e)提条纹中心;(g)巴特沃斯滤波后;(h)对(g)提条纹中心;(i)B样条滤波后;(j)对(i)提条纹中心;(k)B样条滤波漫反射条纹;(l)对(k)提条纹中心

Fig. 9 Comparison of filtering results of simulated images under different filters (test target: aluminum cylinder). (a) Light stripe of diffuse reflection; (b) extracting the center of each light stripe in (a); (c) light stripe of specular reflection; (d) extracting the center of each light stripe in (c); (e) after Gaussian filtering; (f) extracting the center of each light stripe in (e); (g) after Butterworth filtering; (h) extracting the center of each light stripe in (g); (i) after B-spline filtering; (j) extracting the center of each light stripe in (i); (k) diffusely reflected stripe of B-spline filtering for (a); (l) extracting the center of each light stripe in (k)

表2 圆柱条纹中心提取结果偏差对比(单位:pixel)

Table 2 Comparison of extracted result deviation of cylinder stripe center under different pre-processing (unit: pixel)

Type of stripe center	Stripe 1	Stripe 2	Stripe 3	Stripe 4	Stripe 5	Mean
Diffuse reflection	0	0	0	0	0	0
Highlight reflection	0.5362	1.4456	1.4456	1.4456	0.3943	1.4456
After Gaussian filtering	0.8320	0.8318	0.8318	0.8318	0.8309	0.8318
After Butterworth filtering	0.5519	0.8537	0.8537	0.8537	1.2467	0.8537
After B-spline filtering	0.5866	0.5022	0.5022	0.5022	0.0788	0.5022
Error of B-spline filtering	0.2447	0.1785	0.1785	0.1785	0.5993	0.1785

从表2可以得到与表1相似的结论。综上所述,B样条滤波模板较一般低通滤波模板有0.3~0.4 pixel的误差改善,且滤波后的条纹中心提取精度比不滤除前提高0.8 pixel。但B样条滤波自身也存在误差,误差值约为0.2 pixel,在进一步研究工作中应设法消除。

4 频域滤波法在叶片测量中的应用

4.1 去除高光结果

图10(a)是结构光三维叶片测量中投影某编码条纹时的拍摄图,图10(b)是选取其中高光部分放大后的观测图,图10(c)是从图10(b)中仅截取单根高光条纹的图像,根据上述方法,选取其左侧最邻近的非高光条纹频谱制作B样条滤波器进行滤波,得到的处理结果如图11(b)所示。

4.2 应用分析

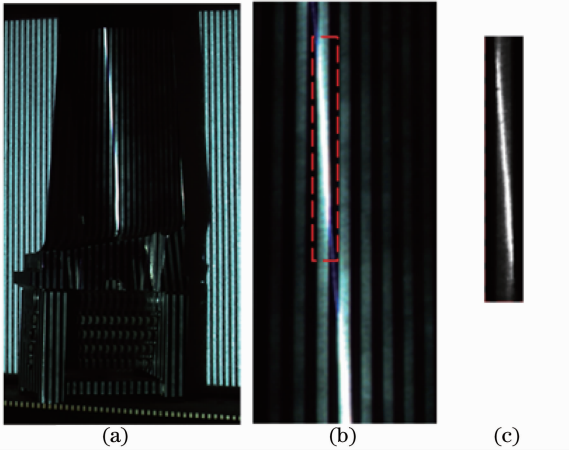


图 10 实际测量图示

Fig. 10 Real test diagram

因实际中不可能得到同一场景、同一根条纹处不含高光时的频谱分布图,只能采用高光条纹近旁的漫反射条纹频谱进行代替,这样必将带来误差。下面分别通过对上述的圆柱体和平板表面的仿真分析这种误差的影响程度。

此时制作的 B 样条滤波器采用与高光条纹最近的一根漫反射条纹频谱图的外轮廓插值得到。与前述 3.3 节条纹中心提取结果对比,结果如表 3 所示。从表中可看出,使用圆柱体仿真时,左 1 条纹与左 2 条纹均比使用自身条纹的误差增大,约为 0.1 pixel,这说明从自身条纹到左 1 条纹,物体表面起伏较大,而从左 1 条纹到左 2 条纹,物体表面变化不大。使用平板进行仿真时,选用自身条纹下面一根条纹比上面一根条纹略微精确,两者的误差是 0.01 pixel,两者与自身条纹的误差约 0.05 pixel,这样的结果也说明,平板在邻近条纹上表面变化不大。

表 3 采用邻近条纹频谱近似处理误差分析(单位: pixel)

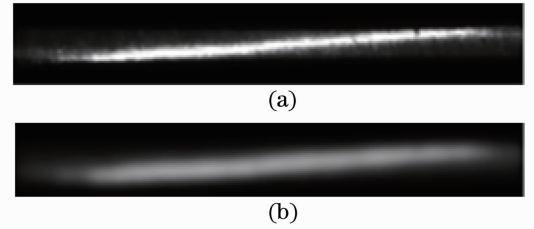
Table 3 Error analysis of approximate treatment from filter generation based on adjacent-stripe spectrum (unit: pixel)

Source of acquiring filter	Stripe 1	Stripe 2	Stripe 3	Stripe 4	Stripe 5	Mean
Stripe itself (cylinder)	0.5866	0.5022	0.5022	0.5022	0.0788	0.5022
First stripe on the left (cylinder)	0.6160	0.6095	0.6095	0.6095	0.0686	0.6095
Second stripe on the left (cylinder)	0.6170	0.6098	0.6098	0.6098	0.0676	0.6098
Stripe itself (board)	0.7778	0.4738	0.4738	0.4738	0.2882	0.4738
First stripe above (board)	0.7831	0.5230	0.5230	0.5230	0.2130	0.5230
First stripe below (board)	0.9190	0.5147	0.5147	0.5147	0.1255	0.5147

综上所述,当被测物体在相邻两根条纹上曲率变化不大,且恰好一根条纹受高光影响,另外一根不受高光影响时,则用另外一根条纹的频谱外轮廓得到的 B 样条曲线制作的滤波器可以近似代替本身条纹(仅含漫反射)频谱外轮廓制作的 B 样条曲线进行滤波,误差在 0.05 pixel 级别。实际应用中,由于投影到叶片表面的条纹较为密集,可以认为条纹之间叶片表面曲率变化不显著,所以邻近条纹处漫反射光的变化规律可以反映高光条纹处漫反射光的变化规律。

5 结 论

频域滤波的思想在于外加投影条纹调制时,特定漫反射条纹区域的频谱图服从一定的变化规律,利用该频谱图与存在高光时的频谱图的差异性制作滤波器,滤除高光的影响。仿真结果表明,频域滤波后的条纹中心提取精度比不滤除前提高 0.8 pixel,方法的绝对精度可以达到约 0.5 pixel,但实际应用中由于滤波模板较难直接得到,只能从邻近的漫反射条纹处近似获得,其中近似的误差取决于被测物体自身表面的曲率变化,当两根邻近条纹处曲率变化不显著时,这种近似代替的误差量级为 0.05 pixel,较高光对条纹灰度变化的直接影响有明显减弱。但仿真结果还表明,即使用自身漫反射条纹频谱图制作滤波器也有 0.2 pixel 的误

图 11 频域滤波恢复条纹图对比。(a) 原始条纹图;
(b) 滤波处理后条纹图Fig. 11 Comparison between (a) raw light stripe
and (b) filtered light stripe

差,还需在今后的研究中进一步减小直至消除。

参 考 文 献

- 1 Gao Zihua, Wang Zhao, Huang Junhui *et al.*. Projector calibration method based on projective transformation for structured light measurement system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(10): 1008004
高治华, 王 昭, 黄军辉 等. 基于摄影变换的结构光测量系统中投影仪标定方法[J]. *中国激光*, 2012, **39**(10): 1008004
- 2 Zhang Xuping, Wang Jiaqi *et al.*. Large-scale three-dimensional stereo vision geometric measurement system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0315002
张旭苹, 汪家其, 张益昕 等. 大尺度三维几何尺寸立体视觉测量系统实现[J]. *光学学报*, 2012, **32**(3): 0315002
- 3 Wang Shun, Xu Jingzhu, Zhang Yixin *et al.*. Reliability evaluation method and application for light-stripe-center extraction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1115001
王 顺, 徐静珠, 张益昕 等. 结构光光条中心点信度评价方法与应用[J]. *光学学报*, 2012, **31**(11): 1115001
- 4 X. P. Qian, K. G. Harding. Computational approach for optimal sensor setup[J]. *Opt. Engng.*, 2003, **42**(5): 1238~1248
- 5 B. W. Lawrence, E. B. Terrance. Constraining object features using a polarization reflectance model[J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, **13**(7): 635~657
- 6 K. Koshikawa. A polarimetric approach to shape understanding[C]. Sixth Int. Joint Conf. Artificial Intell., 1979. 493~495
- 7 S. Megumi, S. Yoichi, I. Katsushi *et al.*. Measurement of surface orientations of transparent objects using polarization in highlight[J]. *Systems and Computers in Japan*, 2001, **32**(5): 64~71
- 8 S. K. Nayar, X. S. Fang, T. Boulton. Removal of specularities using color and polarization[C]. Computer Vision and Pattern Recognition 1993. 583~590
- 9 A. S. Steven. Using Color to Separate Reflection Components[R]. New York, 1984. 1~23
- 10 K. Andreas, A. Mongi. Digital color image processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010. 193~223
科斯汉, 阿比狄. 彩色数字图像处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010. 193~223
- 11 Tao Tao, Guo Hongwei, He Haitao. The overview of specular reflection in three dimensional surface measurement[J]. *Optical Instrument*, 2005, **27**(2): 90~95
陶 涛, 郭红卫, 何海涛. 镜面反射面形光学三维测量技术综述[J]. *光学仪器*, 2005, **27**(2): 90~95
- 12 R. J. Woodham. Photometric method for determining surface orientation from multiply images[J]. *Opt. Eng.*, 1980, **19**(1): 139~144
- 13 G. H. Liu, X. Y. Liu, Q. Y. Feng. 3D shape measurement of objects with high dynamic range of surface reflectivity[J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(23): 4557~4565
- 14 R. C. Gonzales. Digital Image Processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. 117~141
冈萨雷斯. 数字图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010. 117~141
- 15 Liu Lingpu. Digital Signal Processing[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2002
刘令普. 数字信号处理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002