

航空发动机叶片 HSI 模型三维快速测量方法

马龙^{1*}, 钱瑞婕¹, 刘宇哲¹, 徐泓悦², 裴昕¹, 孙凤鸣¹

¹中国民航大学中欧航空工程师学院, 天津 300300;

²先临三维科技股份有限公司, 浙江 杭州 311258

摘要 针对航空发动机叶片的高精度和高效率测量需求, 提出一种基于 HSI(Hue、Saturation、Intensity) 色彩模型的快速三维测量方法。首先分析 HSI 模型并设计结构光三维测量系统, 使用基于 LUT(Look Up Table) 的色彩校正方法对色彩串扰进行校正, 之后对色相与深度的映射关系进行标定。在此基础上, 提出仅用一幅彩色图样获取包裹色相。在非连续表面上使用彩色编码色条图像实现条纹级次的识别, 进而完成色相解包裹, 并通过仿真模拟验证所提方法的可行性。最后对航空发动机高压压气机转子叶片进行三维测量, 并将所提方法与常用的包裹相位获取方法和解包裹方法的计算效率进行对比。实验结果表明, 所提方法满足航空发动机叶片的测量要求并可以提高测量效率。

关键词 测量; 航空发动机叶片; 光学三维测量; HSI 模型; 相位解包裹; 条纹级次识别

中图分类号 V556.5

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.191204

HSI Model-Based Three-Dimensional Rapid Measurement Method for Aero-Engine Blades

Ma Long^{1*}, Qian Ruijie¹, Liu Yuzhe¹, Xu Hongyue², Pei Xin¹, Sun Fengming¹

¹Sino-European Institute of Aviation Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

²SHINING 3D Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 311258, China

Abstract To satisfy the high-precision and high-efficiency measurement requirements of aero-engine blades, a fast three-dimensional measurement method based on the HSI (hue, saturation, intensity) color model is proposed herein. First, the HSI model is analyzed to design a structured light-based three-dimensional measurement system, and a look-up table (LUT) based color correction method is employed to correct the color crosstalk and calibrate the mapping relationship between hue and depth. The proposed approach uses only one color pattern to obtain the hue of a package. A color-coded color bar image is used on the discontinuous surface to recognize the fringe level and then complete the hue unwrapping. The feasibility of the proposed method is verified by simulation. Finally, the three-dimensional measurement of the rotor blades of a high-pressure aero-engine compressor is performed, and the efficiency of the proposed method is compared with that of the conventional method of obtaining the wrapped phase and unwrapping. Experimental results show that the proposed method satisfies the measurement requirements of aero-engine blades and can improve measurement efficiency.

Key words measurement; aero-engine blades; optical three-dimensional measurement; HSI model; phase unwrapping; fringe order identification

OCIS codes 120.4630; 120.5050; 110.5086

收稿日期: 2020-01-16; 修回日期: 2020-02-18; 录用日期: 2020-02-24

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合资助项目(U1633101)、中央高校基本科研业务费中国民航大学专项(3122018Z002)

* E-mail: longma@cauc.edu.cn

1 引言

航空发动机是飞机的核心,其健康程度影响着飞行效率以及飞行安全^[1]。航空发动机的叶片遍布发动机各个部位,数量众多且工作环境恶劣。随着对民航安全要求的日益增高,在高精密测量的基础上提升测量效率和实现测量的自动化已成为航空发动机叶片检测维修的目标。

将航空发动机的叶片作为典型的薄壁类自由曲面零件,其形貌复杂且尺寸差距较大,给测量工作带来了极大困难^[2]。目前,叶片面型的测量主要通过三坐标测量机(CMM)和光学三维测量方法来实现^[3]。然而,CMM的测量方式属于逐点式测量,导致其适用性较差且测量效率较低^[4],而对于光学三维测量方法的研究日益受到广泛重视。

激光三角测量法是叶片光学三维测量方法中常用的方法之一^[5]。Sun等^[6-7]从激光三角测量原理出发,研发了一种四坐标测量系统,利用倾斜误差模型降低了入射角对测量精度的影响,测量精度优于 $10\ \mu\text{m}$,然而该方法在测量前需针对不同面型叶片进行测量路径的规划,测量范围较小且测量效率有待提升;Franca等^[8]将激光三角测量与FOV(Field of View)技术结合,设计并实现了一种低成本的三维图像扫描系统,其可以根据角度、颜色和深度变化来实现三维图像的重建,具有较高的分辨率但效率较低。研究人员提出将条纹投影轮廓术应用于叶片的三维测量^[9-11],通过对叶片投影的一系列图像来实现三维信息的获取,与激光三角法相比,该方法提高了测量效率。根据相位提取方式的不同,条纹投影轮廓术可大致分为傅里叶变换轮廓术^[12]和相移轮廓术^[13]。Xu等^[14]提出了将振幅光栅与傅里叶变换结合的方法,该方法能够自动获取实时数据但是解算时间较长;Oliveira等^[15]利用了莫尔条纹与傅里叶变换轮廓术相结合的方法实现物体三维形貌信息的获取,该方法具有较强的灵活性且操作简单的优点,但二维图像的傅里叶转换较为耗时。与傅里叶变换轮廓术相比,相移轮廓术能够得到精确的三维形貌结果^[16],但该技术需要采集多帧图像。为了改进相移轮廓术,Huang等^[17]将等步长的三步相移光栅图像分别存储于彩色图像的三个通道中,仅需一幅图像便可获得物体的三维形貌,但该方法需要进行大量的反正切运算,效率仍有待进一步提升;Barone等^[18]使用了彩色编码条纹结构光取

代黑白单色条纹结构光,以达到减少图像采集的数量、提高测量效率的目的。

针对上述问题,本文提出一种基于HSI(Hue, Saturation, Intensity)色彩模型的三维测量方法。该方法利用色相与相位的等价性,仅需投射一张调制的彩色图像即可实现包裹色相的获取,无需进行移相和反正切操作,极大地提高测量效率。首先研究HSI模型并搭建硬件系统,校正色彩偏差并实现系统的标定,通过理论仿真结果证明所提方法的可行性;然后对投影的彩色图样进行设计,实现包裹色相的获取,并采用彩色编码色条的方式实现条纹级次的识别进而完成色相的解包裹。实验中对航空发动机高压压气机转子叶片进行测量,并与Hexagon三坐标测量机的测量结果进行对比,结果表明两者测量结果的均方根误差为 $0.0409\ \text{mm}$ 。将所提方法与常用的包裹相位获取方法和解包裹方法进行计算分析,证明所提方法的测量效率高且测量精度满足航空发动机面型工业测量的要求。

2 色彩空间模型

2.1 HSI 色彩模型

HSI色彩模型是基于人体视觉感知特性建立的色彩空间。图1(a)为HSI色彩模型,该模型为一个双锥体结构。色相(H)为极角,其值表示色彩的外相特征,在不同的光照条件下人眼所感知的颜色,当 $H=0^\circ$ 时为红色;饱和度(S)为极径,其值表示色彩接近光谱色的程度;亮度(I)为锥体的中心对称轴,表示色彩的明暗程度^[19]。 R, Y, G, C, B 和 M 分别代表红,黄,绿,青,蓝和品红6种色彩。不难发现,任意一种颜色在此坐标系下均可以用 (H, S, I) 形式来表示。 I 的取值范围为 $[0, 1]$,当 I 为0和1时,分别表示黑色和白色,与 I 为0.25和0.75进行对比可以明显看到亮度的变化。 S 的取值范围为 $[0, 1]$,表示色彩从灰白到饱和彩色的过渡,当 S 为0时色彩值为 I ,当 S 为1时色彩完全饱和。 H 的取值范围为 $[0^\circ, 360^\circ]$,完整的色相分布如图1(b)所示。从图1(b)可以看到,随着 H 的增大色相的变化过程。

2.2 RGB 色彩模型与色相的转换

根据HSI色彩模型不难发现,当 I 不为0和1时,色彩的亮度与饱和度的改变不会改变其色相信息^[20]。为了建立HSI模型与RGB(Red, Green, Blue)模型的转换关系,首先将任意像素点处三原色的灰度值进行归一化处理,通过

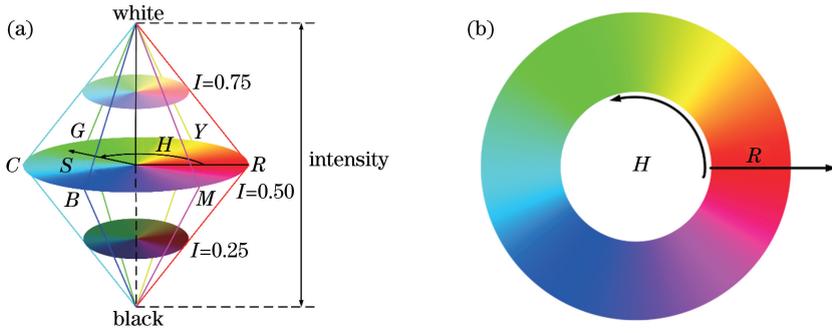


图1 HSI 色彩模型。(a)双锥体模型;(b)色相分布
Fig. 1 HSI color model. (a) Double cone model; (b) hue distribution

$$r = \frac{R}{R + G + B}, \quad (1)$$

$$g = \frac{G}{R + G + B}, \quad (2)$$

$$b = \frac{B}{R + G + B}, \quad (3)$$

来计算各个通道的色彩成分。式中： r, g, b 分别为红色、绿色、蓝色通道所占的色彩成分，其值均处于 $[0, 1]$ 之间； R, G, B 分别为红色、绿色、蓝色通道值。

接下来计算 H ，当 I 为 0.5 时的 RGB 平面，如图 2 所示。其中 P 为平面上的任意一点，通过 (1) 式来得到该点在各个通道所占的色彩成分 (r, g, b)； P_R, P_G, P_B 为在 HSI 空间下饱和的红绿蓝三原色点，分别对应的色彩成分为 $(1, 0, 0), (0, 1,$

$0), (0, 0, 1)$ ； W 为中心点，该点对应的色彩成分为 $(1/3, 1/3, 1/3)$ ； P 点对应的 H 表示向量 W_P 和向量 W_{P_R} 的夹角，根据三角几何关系可得到

$$\cos H = \frac{W_{P_R} \cdot W_P}{\|W_{P_R}\| \cdot \|W_P\|}. \quad (4)$$

将各点坐标代入 (4) 式，得到 $W_{P_R} = (2/3, -1/3, -1/3)$ ， $W_P = (r - 1/3, g - 1/3, b - 1/3)$ ，则 $\cos H$ 可写成

$$\cos H = \frac{2(r - 1/3) - (g - 1/3) - (b - 1/3)}{2[(r - 1/3)^2 + (g - 1/3)^2 + (b - 1/3)^2]^{1/2}}. \quad (5)$$

将 (1)~(3) 式代入 (5) 式并进行化简，通过反余弦函数可得到 R, G, B 与 H 的转换关系，表达式为

$$\begin{cases} H = \arccos \left\{ \frac{2R - G - B}{2[(R - G)^2 + (R - B)(G - B)]^{1/2}} \right\}, & G \geq B \\ H = 2\pi - \arccos \left\{ \frac{2R - G - B}{2[(R - G)^2 + (R - B)(G - B)]^{1/2}} \right\}, & G < B \end{cases}. \quad (6)$$

对某像素在 G 通道与 B 通道的灰度值进行对比，将数值延拓到 $[0, 2\pi]$ 之间，进而转化为最终的色相值。在环境杂散光对各通道影响相同的情况下，(6) 式可以直接消除由大部分背景光强带来的加性噪声，降低对测量环境的要求。

3 测量系统的搭建

3.1 硬件系统

实验测量系统如图 3 所示。系统选用德州仪器公司的 DLP LightCrafter 4500 EVM 投影仪来投射彩色图样，通过 Basler 公司的 acA1000-100gc 彩色电子耦合器件 (CCD) 相机来实现图像的采集，采用卓立汉光公司的 KSA400-12-X 精密位移台和

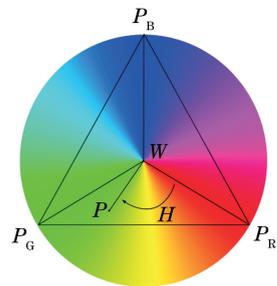


图2 $I=0.5$ 的 RGB 平面

Fig. 2 RGB plane with $I=0.5$

RAK100 电动旋转台来实现叶片姿态的调整。

3.2 色彩串扰的校正

与传统的光学设备相比，系统中的投影仪会造

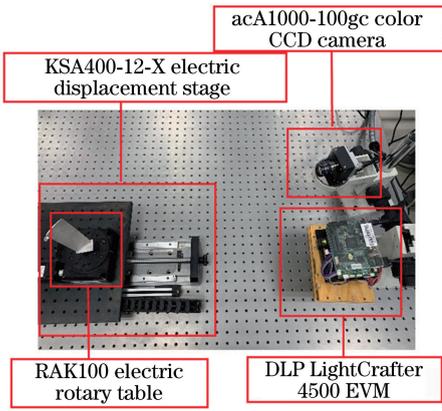


图 3 测量硬件系统

Fig. 3 Measurement hardware system

成色彩的偏移失真和耦合。此外,由于红、绿、蓝三色光谱部分重叠,造成相机内部的透光片无法完全吸收透色以外的颜色,同样影响色彩的准确性。

为了消除上述影响,实验使用基于 LUT(Look Up Table)的色彩校正方法。首先完成系统的白平衡校正,将白色(255,255,255)的纯色光投射到一块白平面上,根据均值法来计算每个通道的增益系数,表达式为

$$\begin{cases} Z_R = M_G / M_R \\ Z_B = M_G / M_B \end{cases}, \quad (7)$$

式中: M_R 、 M_G 、 M_B 分别为 R、G、B 的均值; Z_R 和 Z_B 分别为红色和蓝色通道的增益系数。其次,生成 360 张已知色相由 0° 至 359° 分布的纯色图像,再利用投影仪将其依次投影到白色平板上;使用计算相机来采集图像的色相值,将投影和采集的色相来建立 LUT;最后可以通过 LUT 来选择所需结构光的周期色相以生成新的 360 张纯色图像,重复上述过程直到与标准色相的方均根误差(RMSE)小于 0.0346 rad,这表示色彩偏差成分占总色相的 0.550% 以下,此时认为色彩校正完成。

图 4 为校正前后投影图像的对比图。图 4(a) 为色彩校正前的彩色图像,从方框区域可明显看到,蓝色与品红之间存在色彩串扰。图 4(b) 为色彩校正后的彩色图像,此时色彩已被校正,方框区域内蓝色部分有明显区别。

色彩校正后,相机采集的色相与理想色相的对比分析结果如图 5 所示,图 5(a) 为校正后色相与理想色相的对比,图 5(b) 为校正后色相的误差分布。从图 5 可以看到,误差范围为 $-0.03 \sim 0.03$ rad,方均根误差为 0.0141 rad。采用所提方法校正投影结构光图像可以实现系统色彩串扰的校正,而且在测量过程中并未引入新的计算过程,不会对测量速度造成影响。

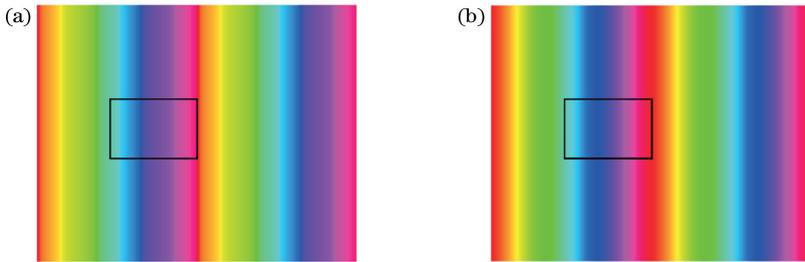


图 4 色彩校正前后投影图像的对比。(a)色彩校正前;(b)色彩校正后

Fig. 4 Comparison of projected images before and after color correction. (a) Before color correction; (b) after color correction

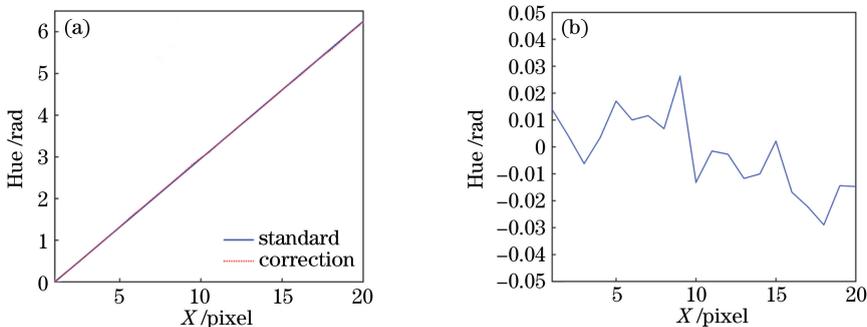


图 5 色相校正的对比。(a)校正后色相与理想色相;(b)校正后色相的误差分布

Fig. 5 Hue correction contrast. (a) Hue and ideal hue after correction; (b) error distribution of hue after correction

3.3 深度-色相映射关系的标定

通过某一像素点的色相来获得该点的高度,此时需要对色相与高度的关系进行标定。图6为测量系统的架构,该系统采用投影仪光轴与参考面垂直的配置方式,A为CCD相机的光心,T为投影仪的光心。由于受到待测物体高度 h 的调制,投影在物体表面的结构光图像发生扭曲,本应投影在D点的条纹因受到O点物高的调制偏移至F点。由于 $\triangle TAO$ 与 $\triangle DFO$ 相似,根据相似三角形的原理可得到

$$\frac{h}{|FD|} = \frac{l-h}{d} = \frac{l}{|FD|+d}, \quad (8)$$

进而可以推导出

$$h = \frac{|FD| \times l}{|FD|+d}, \quad (9)$$

式中: l 为A点与参考平面之间的距离; d 为A点与T点之间的距离; $|FD|$ 为F点与D点之间的偏移距离。 $|FD|$ 与色相平移量 ΔH 具有线性关系,并与条纹节距 p_0 有关,表达式为

$$|FD| = p_0 \frac{\Delta H}{2\pi}. \quad (10)$$

将(10)式代入(9)式并进行化简,可以得到

$$\frac{1}{h} = \frac{1}{l} + \frac{d \times 2\pi}{p_0 \times \Delta H}, \quad (11)$$

式中: $1/l$ 和 $d \times 2\pi/p_0$ 为常数,可以通过测量已知高度物体的 ΔH 进行标定。但是由于在实际操作中无法保证投影仪光轴与参考平面垂直、CCD相

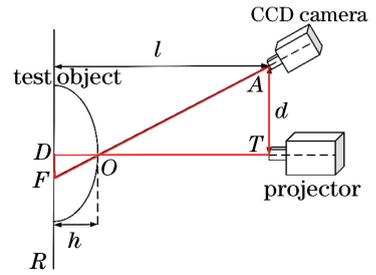


图6 测量系统结构图

Fig. 6 System structure diagram

机光轴与投影仪光轴相交,因此 $1/h$ 和 ΔH 的关系可能呈现出二次多项式或者三次多项式的形式。

实验使用一块白色标准平板和光栅尺来实时标定精密位移台以完成系统的标定,图7为测量系统的标定过程,其中 Z_0, Z_1, \dots, Z_{10} 为平板平面在Z轴的位置, d_1, d_2, \dots, d_{10} 为与第一个平板之间的距离。图7(a)为 h 与 ΔH 映射关系的标定方法,驱动精密位移台10次以获取每次位移后的 H 值,将最后一步的平板平面作为参考面,计算前10步的 ΔH 和 h ,最后对 ΔH 和 h 二者倒数之间的关系使用最小二乘法进行三次项拟合,得到每一个像素点的 h 与 ΔH 的关系,从而完成系统的标定工作。完成标定工作后,利用标定结果与已知色相信息进行标定误差的分析,得到的误差柱状图如图7(b)所示。从图7(b)可以看到,误差范围为 $-0.06 \sim 0.04$ mm。

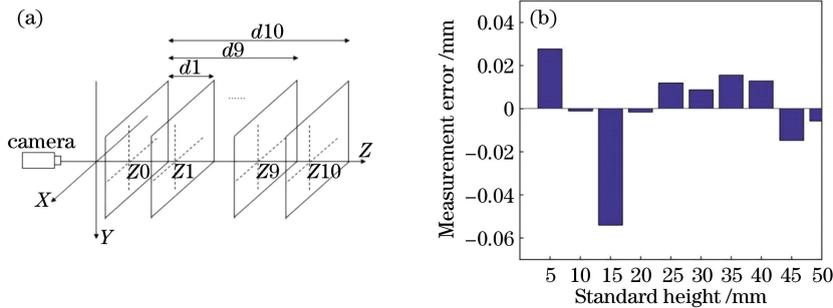


图7 测量系统的标定。(a) h 与 ΔH 映射关系的标定方法;(b)高度误差

Fig. 7 Calibration of measurement system. (a) Calibration method of mapping relationship between h and ΔH ; (b) height error

为了验证所提系统的测量精度与重复性误差,对一块长度为10 mm标准量块的研合表面进行重复测量,重复测量结果如图8所示。图8(a)为高度轮廓线,可以看到高度差为9.97 mm,图8(b)为10次的测量误差,可以看到误差范围为 $0.02 \sim 0.07$ mm,误差均值为0.0384 mm。

4 基于HSI模型的快速三维测量方法

4.1 投射图样的设计

通过第3节的分析不难发现,色相的本质就是一种相位信息。事实上,任意像素点的色相信息仅

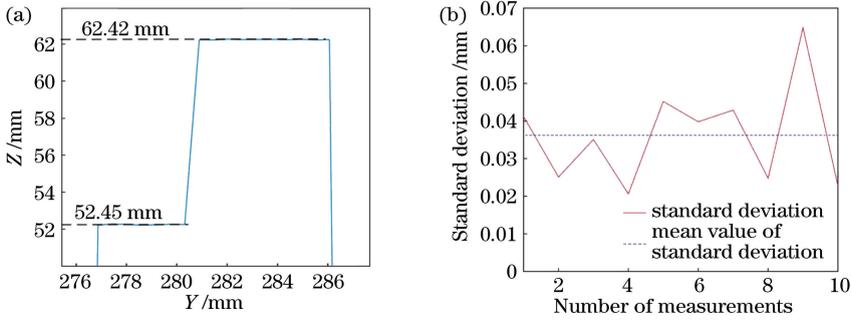


图 8 标准量块研合表面的重复测量结果。(a)高度轮廓线;(b)测量误差

Fig. 8 Repeated measurement results of standard gauge block grinding surface. (a) Height contour; (b) measurement error

需一幅彩色图像通过其对应的 RGB 分量,并利用(6)式可以快速地计算出来,这使由单幅彩色图像实现包裹相位的提取成为了可能。图 9 为色相与

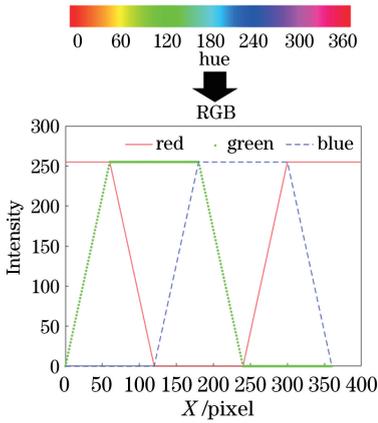


图 9 0°~360°范围内色相值的对应色彩

Fig. 9 Corresponding color of hue values in range of 0°-360°

$$I_B(u, v) = \begin{cases} 0, & u \in [0, T/3) \\ 255(6u/T - 2), & u \in [T/3, T/2) \\ 255, & u \in [T/2, 5T/6) \\ 255(6 - 6u/T), & u \in [5T/6, T) \end{cases}, \quad (14)$$

式中: u 为像素点的横坐标; v 为任意值。需要注意的是,任意周期 T 仍然对应 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的色相分布。图 10(b)为使用(12)~(14)式生成的投影图片。选取一个周期内的彩色图样借助(6)式将其转换至色相域并进行归一化处理,获得的包裹色相如图 10(c)所示。图 10(d)为在弧度制下单周期内 RGB 转换至色相分量的结果,证明了包裹色相和包裹相位的等价性。

4.2 基于彩色编码色条的色相解包裹

实验根据色相理论提出一种基于彩色色条的编码方法,通过投影一张彩色编码色条可以实现快速、准确的条纹级次判断和色相展开,并通过包裹色相的截断特征来减少色条边缘色彩的误判。

RGB 颜色变换的关系。从图 9 可以看到,当 RGB 各通道颜色变化周期为 360 pixel 时,可以直接获取 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内分布的色相,称为包裹色相。

图 10 为由彩色图样计算色相分量的过程。图 10(a)为图 9 的 RGB 三通道颜色变换的关系,对其进行进一步扩展可得到任意周期为 T 的 RGB 灰度变化,表达式为

$$I_R(u, v) = \begin{cases} 255, & u \in [0, T/6) \text{ or } [5T/6, T) \\ 255(2 - 6u/T), & u \in [T/6, T/3) \\ 0, & u \in [T/3, 2T/3) \\ 255(6u/T - 4), & u \in [2T/3, 5T/6) \end{cases}, \quad (12)$$

$$I_G(u, v) = \begin{cases} 255(6u/T), & u \in [0, T/6) \\ 255, & u \in [T/6, T/2) \\ 255(4 - 6u/T), & u \in [T/2, 2T/3) \\ 0, & u \in [2T/3, T) \end{cases}, \quad (13)$$

色条由红、绿、蓝三原色以及其互补色青、品红、黄构成,对这 6 种颜色进行编码和赋值,赋值方式与色彩分量如表 1 所示。从表 1 可以看到,针对每一种颜色,其编码值是唯一的。之后对每一种颜色进行编码以随机组合生成一组色条,并满足任意三种颜色按特定顺序的组合,而且每一种颜色仅出现一次。

色条投射的过程中,某一特定编码色条的像素宽度应与梯形结构光周期间距相同,以便寻找与每条色条对应的色彩编码在序列中的位置,进而判定条纹级次。在进行条纹级次的判定前,首先要完成条纹边界的判断。条纹边界的判断遵循如下原则:判断两个相邻周期的分界,首先对包裹色相进行判断,当相邻两像素点的包裹色相差值大于限定阈值时,且与前一条已判边界线相隔较多像素时,可认为两像素点之间为边界;当与前一条已判边界线相隔较少像素时,需要通过这两相邻像素点处的色条编

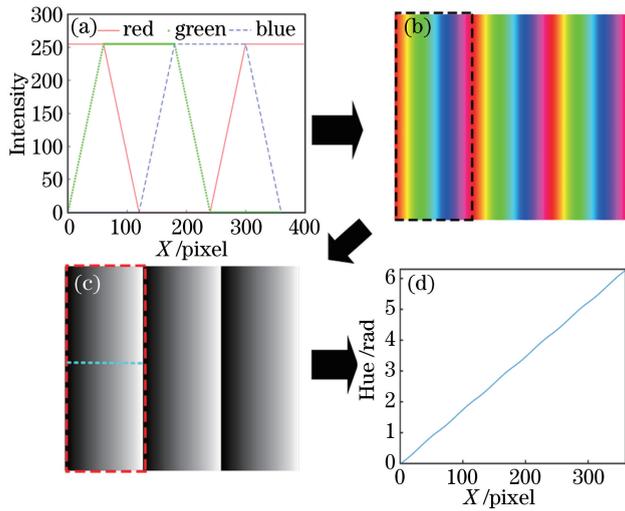


图 10 彩色投影图样计算色相分量的过程。(a) $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 对应的灰度变换关系;(b)彩色投影图样;(c)归一化转换至色相域;(d)标记线处的色相分布

Fig. 10 Process of calculating hue components of color projection pattern. (a) Grayscale transformation relationship corresponding to $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$; (b) color projection pattern; (c) normalized conversion to hue gamut; (d) hue distribution at mark line

表 1 色条编码的构成

Table 1 Composition of color stripe coding

Code	1	2	3	4	5	6
Color	Red	Yellow	Green	Cyan-blue	Blue	Magenta
Three-channel grayscale value	(1,0,0)	(1,1,0)	(0,1,0)	(0,1,1)	(0,0,1)	(1,0,1)

码进行第二步判断;若两条色条编码不同,则可认定两像素点之间为边界,若相同,则两像素之间不为边界。其中,相邻两边界的间隔像素数与周期 T 有关。图 11 为物体截面包裹色相和条纹编码横截线,虚线为色条编码,实线为包裹色相。

图 12 为仿真模拟生成的条纹边界划分图像。考虑到叶片的表面可能有缺损,因此在仿真模拟中添加三个随机直径的圆形相位不连续区域。图 12(a)为仿真模拟生成的包裹色相,图 12(b)为仿真模拟生成的色条编码,图 12(c)为利用包裹色相和色条编码判断条纹边界后的条纹边界划分结果,

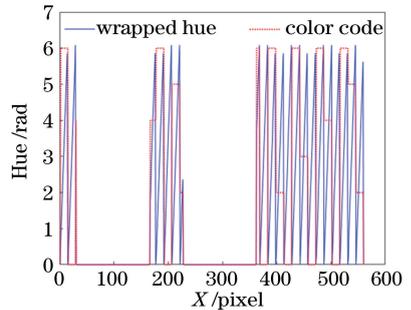


图 11 包裹色相与色条编码截线

Fig. 11 Schematic of wrapped hue and color bar coding cut line

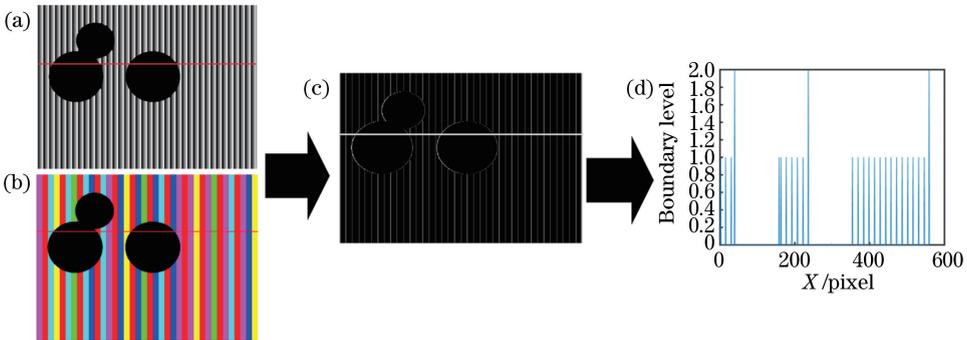
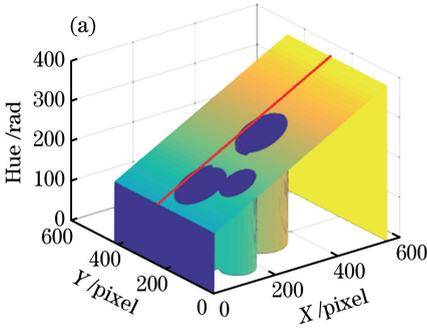


图 12 非连续表面条纹边界的划分过程。(a)包裹色相;(b)色条编码;(c)条纹边界划分;(d)边界划分截线

Fig. 12 Dividing process of fringe boundary on discontinuous surface. (a) Wrapped hue; (b) color bar coding; (c) fringe boundary division; (d) boundary division section line

图 12(d)为标记线处横截面的条纹划分截线。仿真模拟过程中,条纹边界分为两种:第一种包括从非连续表面至连续表面的分界线以及连续表面非连续相位的分界线;第二种包括从连续表面至非连续表面的分界线,为了便于区分,设置前者的值为 1,后者的值为 2。

之后提取与三条条纹对应的色条编码,通过查表法来确定其在色条编码序列中的位置,进而得到每个像素点对应的条纹级次 l_n ,其中 n 为像素点 (u, v) 所对应的条纹的级次,根据



$$H_{\text{HUE}}(u, v) = H(u, v) + l_n(u, v) \times 2\pi \quad (15)$$
 即可得到连续的色相信息。式中: $H(u, v)$ 为像素坐标 (u, v) 处的包裹色相; H_{HUE} 为色相展开结果。由色条编码的设计可知,只要在某一连续区域中存在三条或三条以上的条纹,即可通过其对应的色彩编码进行条纹级次的识别,因此该色相解包裹方法适用于非连续表面的测量,图 13 仿真模拟的色相展开结果,图 13(a)为色相展开的三维视图,图 13(b)为标记线处展开的色相图。从图 13 可以看到,非连续区域内的色相展开结果呈线性变化。

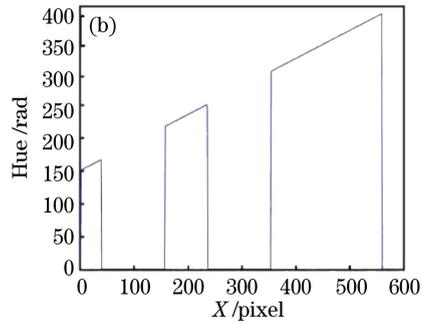


图 13 色相展开结果。(a)三维视图;(b)标记线处色相展开的截面

Fig. 13 Hue unwrapping results. (a) Three-dimensional result; (b) section of hue unwrapped at marking line

同时,在使用(6)式将图像由 RGB 转化为色相的过程中需要进行大量的反余弦计算,实验采用一种基于 LUT 的解算方法以减少计算耗时。使用公式解算和基于 LUT 的解算方法来解算 1028×1028 个像素点的色相,用时对比如表 2 所示。从表 2 可以看到,所提方法的计算效率与前者相比提高 97.4%。

表 2 不同算法解算色相的用时对比

Table 2 Comparison of time used for different algorithms to calculate hue

Parameter	Formula method	LUT-based hue solution
Time-consuming /s	3.1615	0.0817

5 航空发动机叶片的测量

5.1 航空发动机高压压气机转子叶片的测量

对航空发动机高压压气机转子叶片进行测量,图 14 为航空发动机高压压气机转子叶片的测量结果,图 14(a)为测量的压气机叶片实物,通过对图 14(a)的叶片表面投射彩色图样后的图像如图 14(b)所示,转换到 HSI 并进行归一化处理获得图 14(c)的包裹色相,然后通过投射图 14(d)的彩色编码色条对包裹色相进行解包裹,之后通过(11)式来完成叶片表面三维形貌的重建,结果如

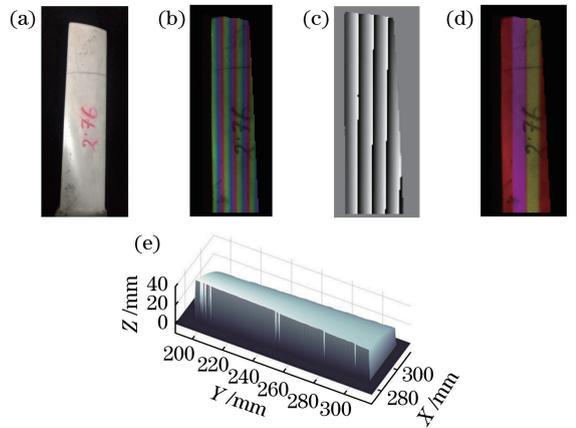


图 14 航空发动机压气机叶片的测量结果。(a)叶片实物图;(b)彩色图样;(c)包裹色相值;(d)色条编码;(e)压气机叶面的三维形貌

Fig. 14 Measurement results of aero-engine compressor blades. (a) Captured image of blade; (b) color pattern; (c) wrapped hue value; (d) color bar code; (e) three-dimensional shape of compressor blade

图 14(e)所示。

为了评估所提方法的测量精度,使用 Hexagon 公司的 GLOBAL CLASSIC SR 桥式三坐标测量机对该叶片表面的测量结果进行对比,该三坐标测量机的

测量精度为 $1.9 \mu\text{m}$ 。取两种测量方式测量结果相同位置的轮廓线进行对比,图 15 为偏差分布。从图 15 可以看到,偏差范围为 $-0.01 \sim 0.10 \text{ mm}$,两种方式测量结果的方均根误差为 0.0409 mm ,表明所提方法的测量精度满足航空发动机叶片的测量要求。

进一步分析该叶片的叶型参数,结果如图 16 所示。从图 16 可以看到,参数分析前需确定中弧线 \hat{k} ,

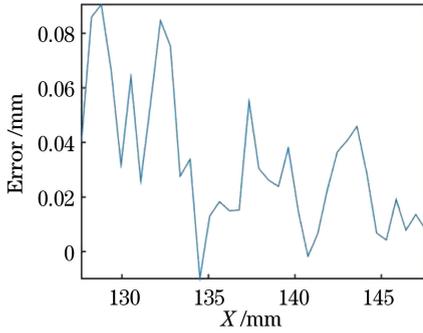


图 15 所提方法的误差分布

Fig. 15 Error distribution of proposed method

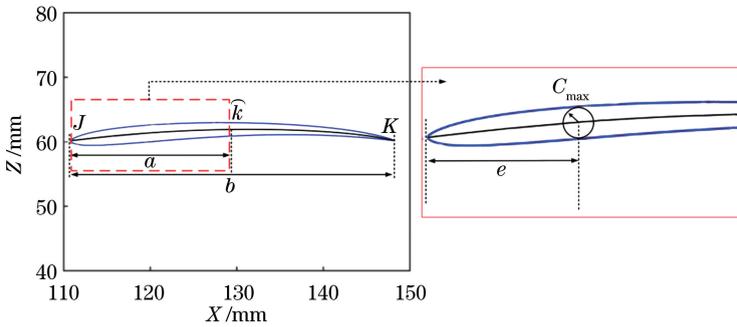


图 16 压气机叶片的叶型参数

Fig. 16 Compressor blade profile parameters

表 3 包裹相位/色相获取方法的效率对比

Table 3 Comparison of efficiency of wrapped phase/hue acquisition methods

Method	Number of projected images	Calculation time /s
Four-step phase shifting method	4	0.0198
FTP	1	0.1027
Color three-step phase shifting method	1	0.0259
Proposed method	1	0.0159

弦长为 \hat{k} 两端点 J 和 K 之间的距离,叶片弦长 b 为 38.13 mm ,最大厚度 C_{max} 为 2.31 mm ,该位置距离中弧线端点 J 距离 e 为 9.78 mm ;其最大挠度作用位置距离 J 点距离 a 为 17.59 mm 。

5.2 系统测量效率的分析

常用的包裹相位获取方法与所提方法在计算效率方面的差异,结果如表 3 所示。从表 3 可以看到,所提方法的计算效率与 4 步相移法大体相当,但投影图像的数量显著小于 4 步相移法,而相对于傅里叶方法与彩色 3 步相移法,则分别减少 84.5% 和 38.6% 的计算时间。

条纹级次的识别过程中广泛使用格雷码方法与所提方法,两种方法在相位解包裹方面的效率如表 4 所示。从表 4 可以看到,虽然格雷码方法的解算时间是所提方法的 50% ,但所需的投射图像数量显著大于所提方法。考虑到投射 6 幅图像耗时一般在 60 ms 左右(工业相机的帧率为 100 frame/s),可以表明所提方法的计算效率明显优于格雷码法。

表 4 相位/色相解包裹方法的效率对比

Table 4 Comparison of efficiency of phase/hue unwrapping methods

Method	Number of projected images	Calculation time /s
Gray code	6	0.0073
Proposed method	1	0.0146

上,仅通过一幅彩色图样即可获得包裹色相的分布,减少移相和反正切的运算过程。同时提出一种具有边界划分功能的色相解包裹算法,实现色相的快速展开,并通过仿真模拟验证所提方法的可行性。实验中对航空发动机高压压气机转子叶片进行三维测量,成功获取叶片的表面形貌及部分叶形参数。最后分析所提方法在测量效率方面的优势,证明所提方法的有效性。需要说明的是所提方法将航空发动机叶片作为应用对象,其材质或涂层单一,纹理没有

6 结 论

为了实现航空发动机叶片的高效率测量,提出一种基于 HSI 色彩模型的三维测量方法并搭建测量系统。在分析 HSI 模型与 RGB 模型转换的基础

明显的彩色区域,因此叶片的表面纹理对结果并无明显影响。

参 考 文 献

- [1] Fu H L, Fan K C, Huang Y J, et al. Innovative optical scanning technique and device for three-dimensional full-scale measurement of wind-turbine blades [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 1224: 122411.
- [2] Sun B, Li B. Laser displacement sensor in the application of aero-engine blade measurement [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(5): 1377-1384.
- [3] Nishikawa S, Ohno K, Mori M, et al. Non-contact type on-machine measurement system for turbine blade[J]. *Procedia CIRP*, 2014, 24: 1-6.
- [4] Alblalaid K, Lawes S, Kinnell P. Variable stiffness probing systems for micro-coordinate measuring machines[J]. *Precision Engineering*, 2016, 43: 262-269.
- [5] Li Y, Ye P J, Peng J, et al. Artificial target recognition and location based on Mars exploration [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(2): 566-572.
- [6] Sun B, Li B. A rapid method to achieve aero-engine blade form detection [J]. *Sensors*, 2015, 15(6): 12782-12801.
- [7] Yang H W, Tao W, Zhang Z Q, et al. Reduction of the influence of laser beam directional dithering in a laser triangulation displacement probe[J]. *Sensors*, 2017, 17(5): 1126.
- [8] Franca J G D M, Gazziro M A, Ide A N, et al. A 3D scanning system based on laser triangulation and variable field of view [C] // *IEEE International Conference on Image Processing*, September 14, 2005, Genova, Italy. New York: IEEE, 2005: 8845800.
- [9] Lin C S, Yang S W, Lin H L, et al. Measurement of surface profile and surface roughness of fibre-optic interconnect by fast Fourier transform[J]. *Metrology and Measurement Systems*, 2017, 24(2): 381-390.
- [10] Padilla M, Servin M, Garnica G. Profilometry with digital fringe-projection at the spatial and temporal Nyquist frequencies [J]. *Optics Express*, 2017, 25(19): 22292-22302.
- [11] Feng S J, Chen Q, Zuo C, et al. Motion-oriented high speed 3-D measurements by binocular fringe projection using binary aperiodic patterns[J]. *Optics Express*, 2017, 25(2): 540-559.
- [12] van der Jeught S, Dirckx J J J. Real-time structured light profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 87: 18-31.
- [13] Cong P Y, Xiong Z W, Zhang Y Y, et al. Accurate dynamic 3D sensing with Fourier-assisted phase shifting [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2015, 9(3): 396-408.
- [14] Xu Y, Jia S H, Bao Q C, et al. Recovery of absolute height from wrapped phase maps for fringe projection profilometry [J]. *Optics Express*, 2014, 22(14): 16819-16828.
- [15] Oliveira M, de Oliveira G N, de Souza J C S, et al. Photorefractive moiré-like patterns for the multifringe projection method in Fourier transform profilometry [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(5): 1048-1053.
- [16] Yin W, Cheng X S, Xie J R, et al. High-speed 3D profilometry employing HSI color model for color surface with discontinuities [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 96: 81-87.
- [17] Huang P, Hu Q, Jin F, et al. Color-encoded digital fringe projection technique for high-speed three-dimensional surface contouring [J]. *Optical Engineering*, 1999, 38(6): 1065-1071.
- [18] Barone S, Paoli A, Rationale A V. A coded structured light system based on primary color stripe projection and monochrome imaging [J]. *Sensors*, 2013, 13(10): 13802-13819.
- [19] Song K C, Hu S P, Wen X, et al. Fast 3D shape measurement using Fourier transform profilometry without phase unwrapping[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 84: 74-81.
- [20] Peichl M, Sonnentag O, Nilsson M B. Bringing color into the picture: using digital repeat photography to investigate phenology controls of the carbon dioxide exchange in a boreal mire[J]. *Ecosystems*, 2015, 18(1): 115-131.