

结构光测量中分区域相位误差补偿方法研究

刘超^{1,2}, 盖绍彦^{1,2}, 达飞鹏^{1,2}

¹东南大学自动化学院, 江苏 南京 210096;

²东南大学复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室, 江苏 南京 210096

摘要 基于结构光的主动视觉测量技术因具有诸多优点在工业测量领域得到广泛应用, 而投影仪和相机组成的测量系统的 Gamma 非线性、系统抖动以及噪声等因素, 均易导致相位和三维测量结果出现较大误差。针对测量系统出现的 Gamma 非线性问题以及投影仪亮度分布不均匀导致 Gamma 值不同, 投射单一灰度的图像于表面光滑的均匀白板, 利用灰度特征对采集图像进行分区和直方图统计, 建立不同区域的模型后, 进而完成对初始相位的补偿。在求解相位之前, 为避免系统抖动和噪声影响相位误差对图片进行预处理。将该方法应用于实际测量中, 相位精度和测量精度大幅提高, 该方法比已有的消除 Gamma 非线性影响的方法更简单方便。

关键词 测量; 三维测量; Gamma 校正; 相位误差; 条纹投影

中图分类号 TP391.4; TH89

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0604002

Sub-Regional Phase Error Compensation for Structural Light Measurement

Liu Chao^{1,2}, Gai Shaoyan^{1,2}, Da Feipeng^{1,2}

¹School of Automation, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

²Key Laboratory of Measurement and Control of Complex Systems of Engineering, Ministry of Education, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 430074, China

Abstract Active light measurement based on structured light is widely used in industrial measurement for its several advantages, while the Gamma nonlinearity, vibration, and noises easily lead to phase error and effect accuracy of three-dimensional measurement. Due to Gamma nonlinear problem for measurement system and different brightness distributions of projector, the system has different Gamma values. An image is projected on a standard whiteboard with smooth surface, and partitioned by using grayscale feature by histogram statistics. According to sub-regional information target area of the projector sub-area information is obtained to establish different regions modelling, which is used to compensate initial phase. To avoid system jitter and noise, original image is pre-processed before solving the phase. Applying this method to actual measurement, precision and accuracy of phase are greatly improved, and the method is simple and convenient, compared with existing methods of eliminating the nonlinearity of Gamma.

Key words measurement; three-dimensional measurement; Gamma correction; phase error; fringe projection

OCIS codes 150.6910; 170.2670; 060.5060; 100.2650; 050.5080

1 引 言

相位测量轮廓技术是一种基于条纹投影和相位的三维测量技术, 具有非接触、高速度和高精度等特点, 该技术已在工业检测、机器视觉和逆向工程等领

域得到广泛应用。

在基于相位恢复的相移条纹投影法三维轮廓测量中, 通过相机捕捉投影仪投射于物体表面的正弦光栅图像, 采用三步以上的相移算法计算相位, 配合格雷码进行相位展开, 即可得到全场唯一的绝对相

收稿日期: 2018-01-08; 收到修改稿日期: 2018-01-30

基金项目: 国家自然科学基金(6508000070, 51475092, 61462072)

作者简介: 刘超(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事三维测量方面的研究。E-mail: 18751962676@163.com

导师简介: 盖绍彦(1979—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事三维测量、人脸识别方面的研究。

E-mail: qxxymm@163.com

位值,并基于相位信息和摄像机、投影仪内外参数进行重建^[1-3]。条纹的正弦性直接影响相位的提取精度,因此,高质量的正弦条纹对于获得高精度三维形貌具有至关重要的作用。但是受相移偏差、投影机和摄像机的非线性、光源稳定性以及系统振动等因素的影响,相机捕获的正弦条纹严重失真,导致相位出现误差。而对于数字光栅投影,可以通过数字相移消除相移偏差,因此误差源主要为投影仪和摄像机的非线性,即 Gamma 畸变。国内外学者针对 Gamma 畸变导致的相位误差进行了大量研究,并提出了多种误差校正方法,可概括为 Gamma 校正法和相位误差补偿法两大类。

Gamma 校正法通过预先标定系统的 Gamma 值,获取摄像机到投影仪的亮度传递函数,然后在生成条纹图像之前对输入值进行预先校正或者对相机捕捉的畸变条纹进行校正。该方法只需要对投影的条纹进行一次预先校正,后续测量过程无额外的补偿计算,具有速度快和计算简单的特点。Hoang 等^[4]假设 Gamma 畸变引起的非线性为有限次,使用多于最高次数 2 的相移法获得正确相位,通过优化方程求解,根据多个预设投影机获得系统分立的两个 Gamma 参数,进而估计的理想投影的 Gamma 值;Zheng 等^[5]使用遗传算法求取 Gamma 值,推广了 Tang 的工作;Xiao 等^[6]提出采用单张正交光栅条纹图进行傅里叶变换获得系统 Gamma 值的方法;林俊义等^[7]提出了一种自适应分区域 Gamma 预编码校正方法,根据确定的阈值对测量视场进行区域划分;Li 等^[8]考虑了投影仪的散焦状态,提出了利用点扩展函数(PSF)计算伽马系数的精确伽马校准方法。

相位误差补偿是根据 Gamma 畸变导致的相位误差的规律性,提前建立相位误差与畸变相位的数学模型,对计算得到的畸变相位进行误差补偿,从而消除 Gamma 非线性带来的影响,进而获取正确的相位。相位误差补偿法无需求解系统 Gamma 值,但是需要建立完整的相位误差模型,才能消除高次谐波带来的相位误差。Chen 等^[9]提出了将非线性问题转换为线性问题的基本逻辑,通过光路的几何关系推导出光栅相位分布表达式。Zhang 等^[10]提出一种直接建立相位误差查找表的算法对相位误差进行补偿;Zheng 等^[11]分析了三步相移技术相位误差的对称性,并提出双三步相移技术,将计算相位调整后补偿;Yao 等^[12]分析四步相移技术的相位误差,通过投射四组预先相移的光栅条纹对相位进

行补偿;Pan 等^[13]通过理论分析得出非正弦性引起的相位误差模型,并根据此模型对相位进行补偿。

本文分析了 Gamma 畸变带来的高次谐波对相位误差的影响,利用最小二乘法对相位误差进行拟合并建立误差补偿模型。考虑到投影仪亮度分布不均匀导致不同像素点的 Gamma 值不同,在误差允许范围内,将投影仪测量靶面分成不同的区域,然后建立不同区域的相位误差模型,根据初始相位粗定位该相位的区域信息,获取相应的误差补偿模型,最后对初始相位进行补偿从而求解标准相位。该方法只需要投影单一灰度值图像完成测量视野分区域,无需建立查找表或者如文献[11]和文献[12]所述在每次测量中投射多组光栅条纹,可以大幅提高测量速度;该方法考虑实际测量中不同像素点的 Gamma 值不同,并采取不同的误差补偿措施,减小 Gamma 畸变带来的非线性对于测量精度的影响,进而得到良好的测量效果。

2 原 理

2.1 相位计算

实际测量中投影的条纹为正弦光栅,假设投射 N 副光栅图像,摄像机捕捉的条纹图案可以表示为

$$I_n(x, y) = \alpha(x, y) + \beta(x, y) \cdot \cos[\phi(x, y) + \delta_n] = A[1 + P \cos(\phi(x, y) + \delta_n)], \quad (1)$$

$$\delta_n = 2\pi(n - 1)/N, \quad (2)$$

式中 $I_n(x, y)$ 为第 n 幅灰度图的条纹灰度值, (x, y) 为像素点坐标, $\alpha(x, y)$ 为背景光强, $\beta(x, y)$ 为被测物体的表面的反射率, A 、 P 为化简后的比例系数, $\phi(x, y)$ 为摄像机捕获的变形光栅的相位,在光强已知的情况下,仍有 3 个参数未知,如果要求得 $\phi(x, y)$,则要求 $N \geq 3$,求解(1)式组成的方程组,可以得到

$$\phi(x, y) = \arctan \left[\frac{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \times \sin(\delta_n)}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \cos(\delta_n)} \right]. \quad (3)$$

2.2 相位误差分析

2.2.1 Gamma 非线性

投影仪和摄像机系统中存在 Gamma 非线性畸变导致投影仪和摄像机亮度传递函数是非线性的,采集到的光栅条纹并不是理想的余弦函数,而是带畸变的,如图 1 所示,其中红色表示理想的光栅条纹;绿色、黑色表示受到 Gamma 畸变影响的光栅条纹。

畸变之后的正弦光栅条纹可表示为

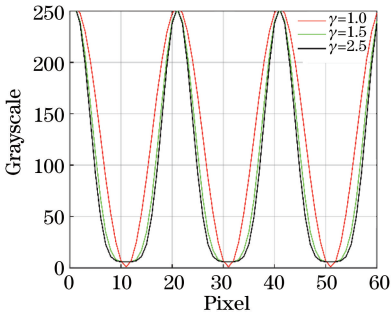


图 1 不同 Gamma 值得到的光栅条纹

Fig. 1 Grating stripes with different Gamma values

$$I_n^\gamma = k_1 \alpha_1 [1 + p_1 \cos(\phi + \delta_n)]^\gamma, \quad (4)$$

式中 ϕ 为相位, $\alpha_1 \in (0, 1]$ 为物体表面的反射率, I_n^γ 为相机捕获的正弦条纹的灰度值, γ 为整个系统的 Gamma 值, 通常 $1 < \gamma < 3$, k_1 、 p_1 为化简后的比例系数。根据(3)式和(4)式, 系统在 Gamma 非线性影响下的相位计算公式为

$$\begin{aligned} \phi^\gamma &= \arctan \left[\frac{\sum_{n=1}^N I_n^\gamma \sin \delta_n}{\sum_{n=1}^N I_n^\gamma \cos \delta_n} \right] = \\ &= \arctan \left[\frac{\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{\infty} B_k \cos k(\phi + \delta_n) \times \sin \delta_n}{\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{\infty} B_k \cos k(\phi + \delta_n) \cos \delta_n} \right], \end{aligned} \quad (5)$$

式中 I_n^γ 、 ϕ^γ 分别为系统 Gamma 非线性影响下的光栅条纹灰度值和相位值, B_k 为高次谐波系数, 如果 $\gamma \geq 1$, 且为整数, 则当 $k > \gamma$ 时, $B_k = 0$, 经实验验证可知, 无论 γ 取何值, B_1 都大于 0; 当 $\gamma = 1$ 时, $B_2 = 0$; 当 $\gamma = 1$ 或 $\gamma = 2$ 时, $B_3 = 0$, 以此类推。如果 γ 不为整数, B_k 则为一个收敛无限极数, 如

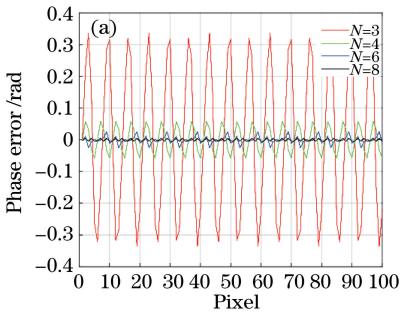


图 3 N 对相位误差的影响。(a) 相位误差; (b) 相位误差变化

Fig. 3 Influence of N to phase error. (a) Phase error; (b) variation of phase error

结合 $\arctan(x)$ 的多项式展开, 对(6)式进行变形, 得到

$$\Delta\phi = \sum_{i=1}^k a_i \sin(b_i \phi + c_i), \quad (7)$$

果 $B_k \neq 0$, 则有 $B_{k+1}/B_k = (\gamma - k)/(\gamma + k + 1)$ 。图 2 给出了解包裹之后的全局相位, 包括存在 Gamma 畸变情况下的实际相位和无畸变情况下的理想相位。

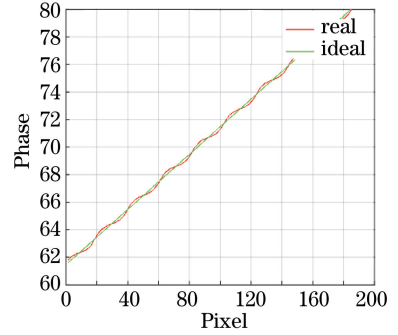


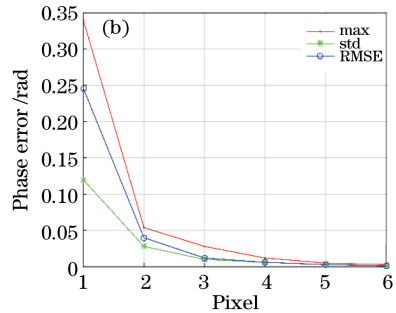
图 2 实际相位与理想相位

Fig. 2 Real and ideal phases

利用三角函数的特性化简(5)式, 可以得到

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \phi - \phi^\gamma = \\ &= \arctan \left\{ \frac{\sum_{m=1}^{\infty} (B_{mN-1} - B_{mN+1}) \sin(mN\phi)}{[B_0 + \sum_{m=1}^{\infty} (B_{mN-1} + B_{mN+1}) \cos(mN\phi)]} \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中 B_{mN-1} 、 B_{mN+1} 为多项式系数, $\Delta\phi$ 仅与相移步数 N 、系统 Gamma 值以及相位 ϕ 有关, 其中 Gamma 值由系统硬件决定, 为不变的系统特性, N 为预定采用的相移图幅数, 对特定的系统, $\Delta\phi$ 仅受到 ϕ 变化的影响。图 3(a) 给出了 $\gamma = 2.5$ 时, 不同相移幅数 N 得到的相位误差; 图 3(b) 给出了 $\gamma = 2.5$ 时, 相应步数 N 得到的相位误差分布, 其中红线、绿线和蓝线分别表示相位误差最大值变化、标准差变化和均方根误差(RMSE)变化。



式中 i 为拟合阶数, a_i 、 b_i 、 c_i 为多项式系数。根据(7)式, 对相位误差与实际相位进行最小二乘拟合, 即可得到 $\Delta\phi$ 的补偿模型。由于(7)式中的 ϕ 为无 Gamma 非线性影响的理想相位, 实际的测量中初

步得到的相位是受到 Gamma 非线性影响的结果 ϕ^γ 。根据(5)~(6)式,在实际应用中有

$$\Delta\phi = \sum_{i=1}^k a'_i \sin(b'_i \phi^\gamma + c'_i) \quad (8)$$

2.2.2 分区域相位误差补偿

2.2.2.1 理论分析

2.2.1 节中默认只存在单一 Gamma 值,实际上 Gamma 值在投影仪投影范围内并不相同,各点相位误差并不相同,若采用单一 Gamma 值进行预编码校正或者相位误差补偿会出现过补偿或者欠补偿的问题。因此,根据 Gamma 值不同建立不同的误差补偿模型,可以有效避免过补偿或欠补偿问题。

2.2.2.2 Gamma 分布

在实际的测量中,投影仪摄像机系统在整个投影范围内的投影亮度并非完全一致^[17],即投影仪实际输出亮度不仅与输入信号有关,而且还与像素点在投影范围内的位置有关。采用的公式为

$$I_{out} = f(I_{in}, x, y), \quad (9)$$

$$\gamma = g(x, y), \quad (10)$$

式中 I_{out} 为输出亮度, I_{in} 为输入信号, (x, y) 为图像坐标, γ 为系统非线性 Gamma 值。图 4 所示为标准的均质白板(指表面平滑、反射率近似相等的纸质白板),向其投射单一灰度值图像,然后采集图像并统计灰度直方图,结果如图 5 所示。



图 4 标准白板

Fig. 4 Standard white board

向均质白板投射一系列不同的灰度图像,拟合输入输出关系,可以标定出每一个像素点位置的 Gamma 值。对某一行每隔 50 个点抽取一个像素点,图 6 所示为相应的 Gamma 值;图 7 所示为其中 3 个点的亮度传递函数曲线,横、纵轴分别表示输入和输出灰度值。

从图 6 结果可知,Gamma 值的分布与投影仪光轴和投影幅面的交点有关,在中心处,投影仪光强较强,相应的 Gamma 值比较小;在距离中心较远处,光强相对较弱,Gamma 值较大。投影仪亮度不均

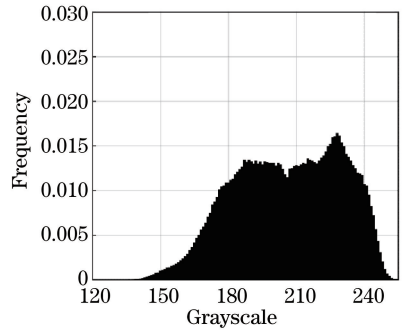


图 5 灰度值直方图分布

Fig. 5 Histogram distribution of grayscale

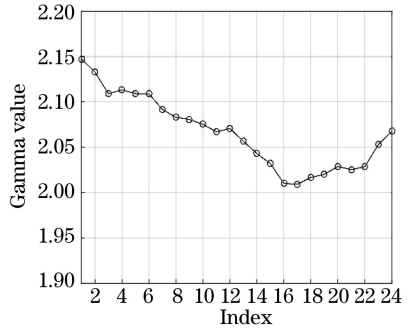


图 6 不同像素点的 Gamma 值

Fig. 6 Gamma values in different points

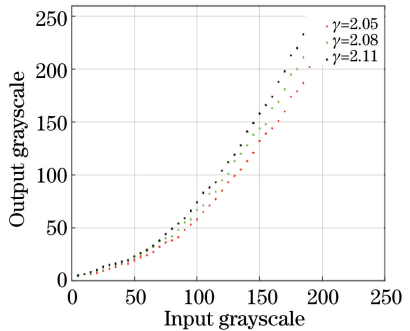


图 7 不同点的亮度传递函数

Fig. 7 Brightness transfer function in different points

匀导致的 Gamma 值不同的分布规律基本类似于同心圆分布,以投影仪光轴与投影幅面的交点为中心,中心处 Gamma 值较小,离中心越远 Gamma 值相对越大,在边缘处畸变最明显。

受到 Gamma 非线性影响后,捕捉到的光栅条纹与计算光栅之间的关系可以表示为

$$I_i^s = t(I_i^s)^\gamma + s, \quad (11)$$

式中 I_i^s 为相机捕捉到的条纹图像灰度值, I_i^s 为计算机生成的条纹灰度值, t 为调制系数, s 为背景光强。

2.2.2.3 Gamma 与相位误差之间的关系

目前大部分的算法都是根据单一 Gamma 值进行非线性校正,下面以三步相移法为例进行分析,将

$N=3, \delta_n=2\pi(n-1)/3$ 代入(5)式,展开多项式得到

$$\phi^\gamma = \arctan[(B_1 \sin \phi - B_2 \sin 2\phi) / (B_1 \cos \phi + B_2 \cos 2\phi)], \quad (12)$$

根据 $B_{k+1}/B_k = (\gamma - k)/(\gamma + k + 1)$, 当 $k=1$ 时, $B_2/B_1 = (\gamma - 1)/(\gamma + 2)$, 化简(12)式,得到

$$\phi^\gamma = \arctan\{[(\gamma + 2)\sin \phi - (\gamma - 1)\sin 2\phi] / [(\gamma + 2)\cos \phi + (\gamma - 1)\cos 2\phi]\}, \quad (13)$$

将(13)式代入 $\Delta\phi = \phi^\gamma - \phi$, 利用反正切函数的和差化积进行化简,得到

$$\Delta\phi = \arctan\{[(\gamma - 1)\sin(3\phi)] / [(\gamma + 2) + (\gamma - 1)\cos(3\phi)]\}, \quad (14)$$

对(14)式两边同时求导,令 $d\Delta\phi/d\phi=0$, 即可求得相位误差随 ϕ 变化的最大变化量为

$$\Delta\phi_{\max} = \arctan\{[(\gamma - 1)^2 / 3(2\gamma + 1)]^{1/2}\}. \quad (15)$$

图8给出了图6中的非线性 Gamma 值所对应的相位误差最大值。

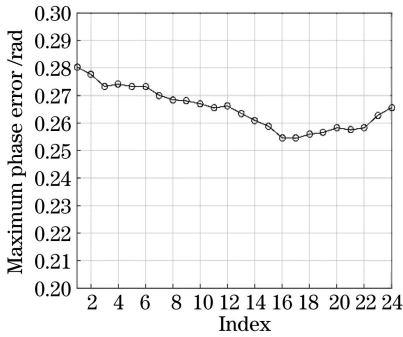


图8 相位误差最大值

Fig. 8 Maximum phase error

对 $\Delta\phi_{\max}$ 进行二次多项式拟合,得到

$$\Delta\phi_{\max} = a\gamma^2 + b\gamma + c, \quad (16)$$

$$d\Delta\phi_{\max} = 2a\gamma + b. \quad (17)$$

根据(17)式,结合实际的测量参数可知, Gamma 值变化 0.01 时,相应的相位误差最大值改变量约为 0.003。如图8所示,在实际的测量系统中 Gamma 值的改变量约为 0.1,因此由 Gamma 值波动引起的相位误差无法忽略,必须考虑过补偿或欠补偿问题。根据每一个像素点的 Gamma 值进行校正时,计算量过大且耗时太多,应用效率过低。文献[7]提出了一种自适应分区域方法,将 Gamma 值的变化量控制在一定范围,但该方法仍需要投影多幅灰度图计算整幅图像的 Gamma 值,计算时间长,难以满足实时性要求。因此本文提出建立分区域校正模型,将误差控制在相对合理的范围内,同时兼顾精度和计算量的要求。

2.2.2.4 分区域校正

根据(11)式可知,图像某点的灰度值与该点的 Gamma 值是单一函数的映射关系。Gamma 值本质上表示投影仪亮度传递函数的非线性,对于表面反射率相同的物体(与标准白板近似),可以利用灰度值表征图像的 Gamma 值分布。实际测量中,针对同一输入灰度值,摄像机捕获的图像不同像素点对应的输出灰度值每变化 5, Gamma 值改变约为 0.01~0.012。因此,对于采集图像,可以采用如下的方法对图像进行分区域操作:

1) 向均质白板投射一副单一灰度值的图片。

2) 统计采集图像灰度值的最大值 I_{\max} 和最小值 I_{\min} , 并确定包含全部测量数据的区间 $[I_{\min}, I_{\max}]$ 。

3) 根据 $P(l) = n_l / (L_1 \times L_2)$ 统计测量结果出现在各灰度值的总频率,其中 $l \in [I_{\min}, I_{\max}]$ 为图像的灰度值, n_l 为灰度值为 l 的像素点的个数, $L_1 \times L_2$ 为图片的像素点总数, $P(l)$ 为灰度值为 l 的像素点占总像素点的比率。

4) 根据各个灰度值频率的阈值确定分区区间,选择分区区间的长度为 5,对于频率小于阈值的灰度值,根据对称原则找到两个相应的灰度值 I_l, I_r , 将 I_l 的左侧, I_r 的右侧作为两个区间,将 $[I_l, I_r]$ 按照长度为 5 划分成若干区间并对区间进行编号。

5) 生成与采集图像尺寸一致的统计矩阵,对于每一个像素点的灰度值所在的区间,将其对应的编号写入统计矩阵的相应位置,即可得到每个像素点对应的区域信息。

根据光栅投影三维测量原理,采集的条纹图像包含物体的高度信息。对于不同的物体,物体表面高度的变化会导致各像素点的相位发生偏移,即摄像机像素点对应的 Gamma 值改变。文献[7]和文献[19]均采用投射一组灰度图标定的 Gamma 值制成的分布表,未考虑实际的测量过程中,测量不同的物体会导致采集图像像素点对应的 Gamma 值不同。由于摄像机的非线性相对较好,测量系统的非线性主要来自投影仪的 Gamma 畸变,因此必须利用相位信息把相机平面的分区域特征映射到投影仪靶标平面。

投影仪向被测物体投影横、纵条纹图案,经过解算可以得到任意像素点两个方向的相位信息。由于光路具有可逆性,因此可以将投影仪视作一台“伪相机”。通过横、纵相位信息可以求得投影仪“拍摄”图像的坐标。相机拍摄的图像每一个像素点都有对应

的横、纵相位,因此可以求得相机平面的坐标对应的投影仪平面的坐标:

$$\begin{cases} u = h \times \theta_h(x, y) / N_t \\ v = z \times \theta_z(x, y) / N_t \end{cases}, \quad (18)$$

式中 (u, v) 为投影光栅图像坐标, (x, y) 为相机图像坐标, θ_h, θ_z 分别为坐标 (x, y) 对应的横、纵相位值, h, z 表示投影仪横、纵像素点的个数, N_t 为光栅条纹的总周期数。如图9所示, A_p, B_p 表示投影仪平面坐标; A_c, B_c 表示相机平面坐标。

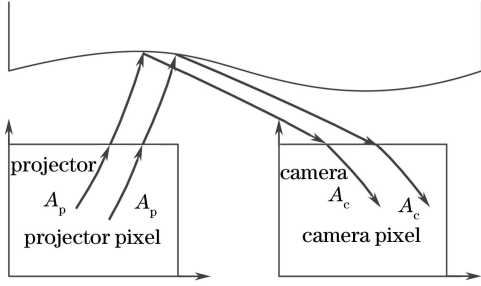


图9 光栅投影测量系统

Fig. 9 Three dimensions measurement system

根据初始解得的相位信息即可得到相机平面到投影仪虚拟平面的映射信息,从而将相机平面的分区域信息映射到投影仪平面。实际的测量中,通过初始相位可以粗定位确定相位所属的分区域位置,找到相应的误差补偿模型,从而完成相位补偿。

3 实验与结果分析

为了验证算法的可靠性以及在实际测量中的效果,搭建一套由投影仪和摄像机组成的光栅三维投影测量系统。摄像机(scA1400-17gc Gige, BASLER公司,德国)分辨率为1390 pixel × 1038 pixel,投影仪(GP30, BENQ公司,台湾)分辨率为1280 pixel × 800 pixel。

3.1 实验步骤

1) 生成两组正弦光栅条纹,其中第一组为四步相移条纹图案,第二组为四十八步相移条纹图案,由(6)式可知,第二组近似于理想情况,视其解得的相位为标准相位。

2) 向均质白板投射两组正弦光栅条纹图案和一副单一灰度值的灰度图像,采集经物体表面调制之后的光栅条纹和灰度图。

3) 根据直方图统计的不同灰度值的频率,对相机采集的单一灰度图像进行分区域编码。

4) 根据(18)式,将相机平面分区域信息映射到投影仪靶面,得到投影仪平面的分区域结果。

5) 根据采集的两组条纹图像求解相位,以第二组相位为标准值,得到 $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$,其中 ϕ_2 为标准理想相位, ϕ_1 为实际相位, $\Delta\phi$ 为相位误差。

6) 根据步骤4)的分区域结果,将 $\Delta\phi$ 与 ϕ_1 分成不同组,对不同组别的 $\Delta\phi$ 与 ϕ_1 进行最小二乘拟合,得到不同区域误差补偿模型,如(9)式所示。

7) 初始相位粗定位确定相位属于的分区域位置,找到相应的误差补偿模型,完成相位补偿后获取真实相位。

3.2 实验结果

根据搭建的实验系统,分别对墙面和维纳斯雕像进行测量,采用均方根误差(RMSE)评估相位误差。

由(6)式与图3可知,当 N 非常大时,谐波系数极小,相位误差几乎为0。此时使用四十八步相移技术计算得到的相位值作为基准,根据分区域信息建立不同的误差补偿模型。图10给出了主值相位与其对应的相位误差;图11给出了不同阶次下的补偿效果,基于准确度以及算法复杂度方面的考虑,一般选择二阶来建立误差补偿模型。

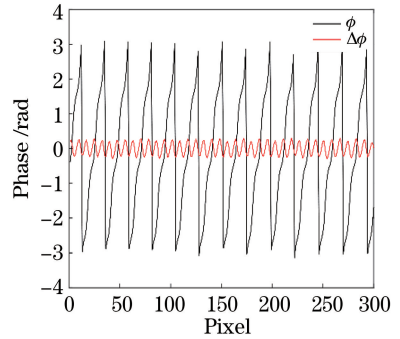


图10 主值相位与对应的相位误差

Fig. 10 Main phase and corresponding phase error

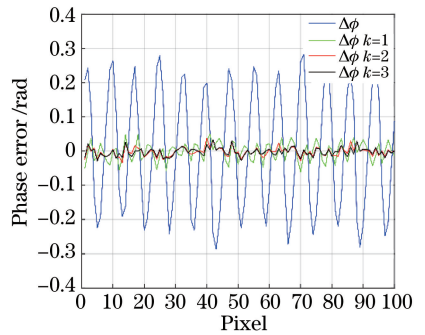


图11 不同阶次下的补偿结果

Fig. 11 Compensated phase errors for different levels

图12给出了拍摄图像灰度图直方图统计结果。图13(a)所示为投射一副单一灰度值图像于标准白板表面的结果,按照2.2.2.4节方法得到的分区域结

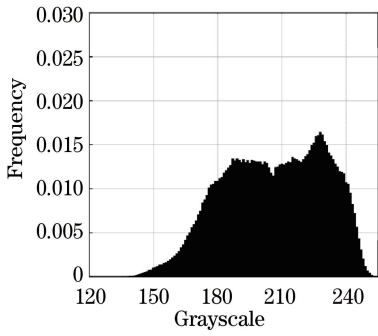


图 12 灰度值直方图

Fig. 12 Histogram of grayscale

果,不同的颜色对应不同的区域信息,如图中左侧所示;图13(b)给出了每个区域包含的像素点个数所

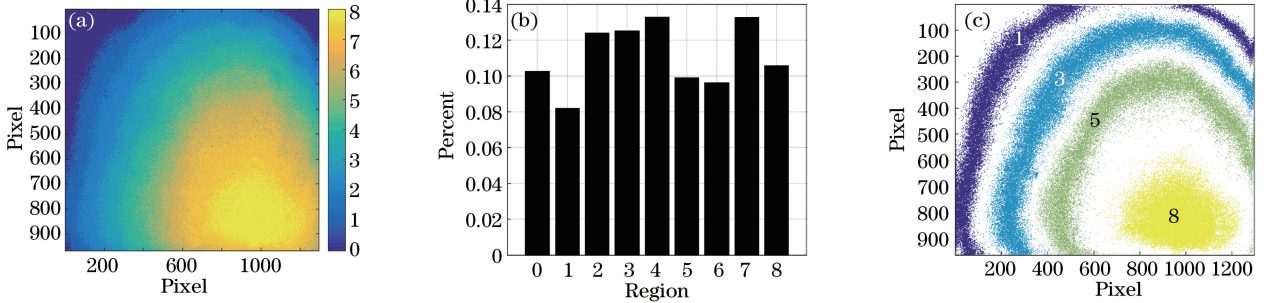


图 13 投射单一灰度值图像于标准白板表面的结果。(a)区域划分结果;(b)区域划分结果直方图统计;(c)部分区域轮廓

Fig. 13 Results of an image projected on a standard whiteboard with smooth surface. (a) Regional division results; (b) histogram of regional division results; (c) partially sub-regional profile

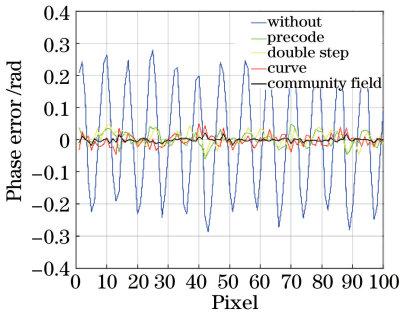


图 14 不同方法补偿效果

Fig. 14 Phase errors with different methods

根据标定的相机参数和求取的绝对相位,即可得到物体的三维坐标信息。提取标定摄像机和投影仪内外参数所用的标准棋盘格的 88 个角点,如图 15 所示。

表 1 不同区域的误差补偿模型参数

Table 1 Error compensation model parameters in different regions

| Region | a_1 | b_1 | c_1 | a_2 | b_2 | c_2 |
|--------|--------|-------|-------|---------|-------|--------|
| 1 | 0.2564 | 2.979 | 1.558 | 0.06785 | 5.996 | 3.084 |
| 3 | 0.2314 | 3.028 | 1.556 | 0.0703 | 6.031 | -3.196 |
| 5 | 0.2439 | 2.973 | 1.574 | 0.06999 | 6.011 | -3.217 |

占比例;图 13(c)所示为图 13(a)提取的几个分区的轮廓,图中的 1、3、5、8 与图 13(a)中的区域 1、3、5、8 相对应。图 14 所示为不同方法补偿效果。表 1 给出了其对应的拟合模型信息。

表 1 给出了 4 个分区模型的信息,其中第一列为分区编号,与图 13(c)所显示的区域编号一致。 a_1 、 b_1 、 c_1 和 a_2 、 b_2 、 c_2 均为误差补偿系数,此处取二阶。表 2 中,Std 为标准差,Max 为相位差绝对值的最大值。可以看到,相比于没有任何补偿措施以及其他只考虑单一 Gamma 值的补偿方法,本文方法效果显著;与只考虑单一 Gamma 值的拟合法相比,分区域误差补偿的标准差减少了 28.2%。

| | | | | | | |
|---|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
| 8 | 0.2143 | 2.985 | 1.165 | 0.0881 | 5.992 | 3.095 |
|---|--------|-------|-------|--------|-------|-------|

表 2 不同方法下的相位误差结果

Table 2 Phase error results under different methods

| Algorithm | Max | Std |
|---------------|-------|-------|
| Without | 0.308 | 0.180 |
| Double step | 0.071 | 0.031 |
| Precode | 0.090 | 0.043 |
| Curve fitting | 0.058 | 0.021 |
| Community | 0.031 | 0.012 |

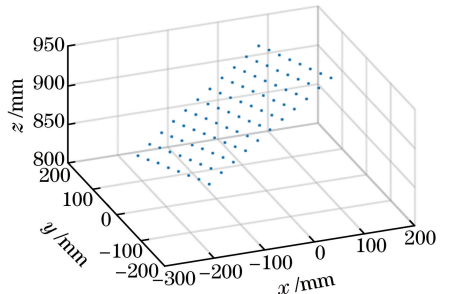


图 15 标准棋盘格角点

Fig. 15 Standard checkerboard corner points

实际中棋盘格的表面标记点共面。将 88 个点拟合为一个平面,通过角点的共面性误差,即点到平面的距离衡量校正效果。校正前,测量结果如图 16

(a) 所示, 88 个角点的共面性误差平均值为 0.232 mm; 校正后测量结果如图 16(b) 所示, 88 个角点的共面性误差平均值为 0.163 mm, 平均值误差

减少了 26.7%。图 17 给出了校正前、后拍摄维纳雕像进行三维重建的结果。

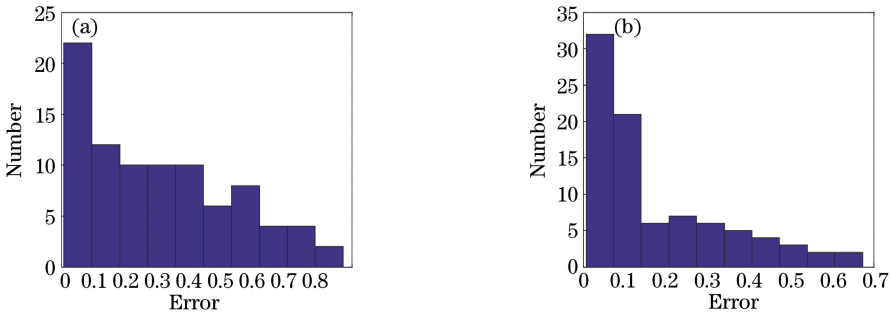


图 16 校正前后共面性偏差分布。(a)校正前;(b)校正后

Fig. 16 Coplanarity deviation distributions before and after correction. (a) Before correction; (b) after correction

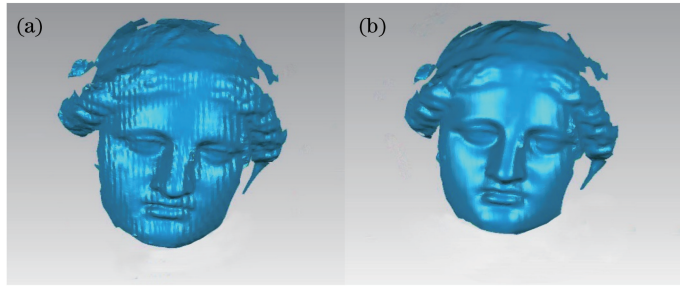


图 17 校正前后的维纳雕像。(a)校正前;(b)校正后

Fig. 17 Wiener statues before and after correction. (a) Before correction; (b) after correction

4 结 论

分析光栅投影三维测量中 Gamma 值畸变与相位误差的关系可知, Gamma 非线性畸变导致采集的光栅条纹出现高次谐波, 进而导致相位出现较大误差。本文推导了 Gamma 畸变与相位误差之间的关系模型, 即相位误差与非线性 Gamma 值、相移步数 N 和相位值之间的关系, 进而建立了误差补偿多项式。同时, 考虑到投影仪亮度分布不均匀导致 Gamma 值不同的问题, 根据不同的 Gamma 值, 将 Gamma 值的分布转化为灰度值的分布, 将投影仪靶面进行分区, 建立不同的相位误差补偿模型并进行补偿, 最后得到实际相位。

该方法不需要投射更多的光栅条纹和复杂的计算, 大幅提高了相位测量的精度, 通过一次建模, 对于任何物体的测量都可以使用, 该方法实用性好, 准确性高。

参 考 文 献

[1] Su H. High accuracy structured light vision measurement method [D]. Harbin: Harbin

Engineering University, 2014.

苏航. 高精度结构光视觉测量方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.

[2] Willi S, Grundhofer A. Robust geometric self-calibration of generic multi-projector camera systems [C] // IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 2017: 42-51.

[3] Nguye H, Nguyen D, Wang Z, *et al.* Real-time, high-accuracy 3D imaging and shape measurement [J]. Applied Optics, 2015, 54(1): A9-A17.

[4] Hoang T, Pan B, Nguyen D, *et al.* Generic gamma correction for accuracy enhancement in fringe-projection profilometry [J]. Optics Letters, 2012, 35(12): 1992-1994.

[5] Zheng D L, Da F P. Gamma correction method for accuracy enhancement in grating projection profilometry [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0512003.

郑东亮, 达飞鹏. 提高数字光栅投影测量系统精度的 gamma 校正技术 [J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0512003.

[6] Xiao Y S, Cao Y P, Wu Y C, *et al.* Gamma nonlinearity correction based on Fourier spectrum analysis for phase measuring profilometry [J]. Acta

- Optica Sinica, 2012, 32(12): 1212004.
肖焱山, 曹益平, 武迎春, 等. 基于傅里叶频谱分析的相位测量轮廓术系统 Gamma 非线性校正方法[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1212004.
- [7] Lin J Y, Huang J Q, Jiang K Y. Subregional Gamma pre-coding correction for phase error compensation [J]. Opto-Electronic Engineering, 2016, 43(9): 32-38.
林俊义, 黄剑清, 江开勇. 分区域 Gamma 预编码校正的相位误差补偿[J]. 光电工程, 2016, 43(9): 32-38.
- [8] Li Z, Li Y. Gamma-distorted fringe image modeling and accurate gamma correction for fast phase measuring profilometry[J]. Optics Letters, 2011, 36(2): 154-156.
- [9] Chen Y, Zhai L, Bao Q, *et al.* Nonlinear error correction method for entocentric projection in phase measuring profilometry [J]. Journal of Donghua University, (Natural Science) 2017, 43(1): 150-154.
陈益松, 翟丽娜, 鲍秋赞. 相位法轮廓测量中光栅近心投射的非线性误差校正算法[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2017, 43(1): 150-154.
- [10] Zhang S, Yau S T. Generic nonsinusoidal phase error correction for three-dimensional shape measurement using a digital video projector [J]. Applied Optics, 2007, 46(1): 36-43.
- [11] Zheng D L, Da F P. Double-step phase-shifting algorithm for fringe-projection measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0512004.
郑东亮, 达飞鹏. 双步相移光栅投影测量轮廓术[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0512004.
- [12] Yao J, Chen X, Zhou Y, *et al.* Phase error elimination considering gamma nonlinearity, system vibration, and noise for fringe projection profilometry [J]. Optical Engineering, 2014, 53(9): 094102.
- [13] Pan B, Kemao Q, Huang L, *et al.* Phase error analysis and compensation for nonsinusoidal waveforms in phase-shifting digital fringe projection profilometry[J]. Optics Letters, 2009, 34(4): 416-418.
- [14] Ma S, Quan C, Zhu R, *et al.* A fast and accurate gamma correction based on Fourier spectrum analysis for digital fringe projection profilometry [J]. Optics Communications, 2012, 285(5): 533-538.
- [15] Zhou P, Liu X, He Y, *et al.* Phase error analysis and compensation considering ambient light for phase measuring profilometry [J]. Optics & Lasers in Engineering, 2014, 55(7): 99-104.
- [16] Zhang C, Zhao H, Zhang L, *et al.* Full-field phase error detection and compensation method for digital phase-shifting fringe projection profilometry [J]. Measurement Science & Technology, 2015, 26(3): 035201.
- [17] Majumder A, Stevens R. Color nonuniformity in projection-based displays: analysis and solutions[J]. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics, 2004, 10(2): 177-188.
- [18] Lv F, Xing S, Guo H. Self-correction of projector nonlinearity in phase-shifting fringe projection profilometry [J]. Applied Optics, 2017, 56(25): 7204-7216.
- [19] Xiao Y, Cao Y, Wu Y, *et al.* Single orthogonal sinusoidal grating for gamma correction in digital projection phase measuring profilometry [J]. Optical Engineering, 2013, 52(5): 053605.
- [20] Cui Y J, Zhang W F, Li J X, *et al.* A Method of Gamma correction in fringe projection measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0112002.
崔艳军, 张文峰, 李建欣, 等. 条纹投影三维测量的 Gamma 畸变校正方法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0112002.
- [21] Xiao C, Chen F, Zhong M. Method for improving measurement accuracy of inverse fringe [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(11): 111204.
肖朝, 陈锋, 钟敏. 一种提升反向条纹测量精度的方法[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(11): 111204.