

基于数字投影仪的光栅相位自校正方法

盖绍彦¹ 达飞鹏¹

摘要 提出了一种针对数字投影仪的光栅相位自校正方法. 在基于光栅投影的主动式视觉三维测量技术中, 投影出具有标准正弦分布的光栅条纹是其关键环节之一. 对投影仪投出的光栅条纹, 应用 n 步相移法通过条纹图像得到其理想的相位分布, 然后根据理想相位分布和实际相位分布的映射关系, 对投影仪的光栅模式进行自校正. 实验结果表明, 经过 3~5 次自校正后, 投影仪投影出的光栅条纹质量有了很大的提高, 可以得到较理想的正弦分布的投影光栅.

关键词 主动式视觉, 投影光栅, 相位自校正
中图分类号 TP391

A New Phase Alignment Method for Digital Projector in Phase Measuring Profilometry

GAI Shao-Yan¹ DA Fei-Peng¹

Abstract A new phase alignment method for digital projector is proposed. In the phase measuring profilometry, a key problem is to project sinusoidal fringes. By the n step phase shifting method, the ideal phase can be obtained by the image of the fringes, then based on the mapping relations of the ideal phase and the actual phase, the phase pattern on the digital projector can be aligned automatically. Experiments show that the proposed method can decrease the error of the projected fringes effectively, and that better sinusoidal fringes can be achieved to improve the measurement precision.

Key words Optical measurement, projected fringe, phase alignment

三维视觉技术^[1-5] 是目前国际上的研究热点, 按光源的照明方式三维视觉可分为被动式和主动式两种. 被动式三维视觉是指不需要额外的光源, 在自然光照明情况下利用两个或多个摄像机所观测到景物的视差来重建物体的三维形状. 这种方法所需的设备简单、易用, 信息获取速度较快, 但结果在精度方面受到限制. 主动式视觉是指用特殊设计的光点、光线或者其他结构光主动照射被测物体, 然后通过摄像机得到变形的结构光的图像, 来重建物体的三维形状. 通过对结构光以及摄像机空间结构关系的分析, 可以获得精度较高的三维重建结果.

基于相位法的光栅投影技术^[6-12] 是近年发展起来的, 具有代表性的一种主动式视觉技术. 这种方法通过向被测物体投影正弦光栅条纹, 由条纹图像获得高精度的光栅相位场分布, 进而得到物体的三维形状. 投影系统投影出的光栅条纹需要满足标准的正弦分布, 这是决定整个视觉系统精度的关键环

节之一. 投影光栅条纹的非正弦性误差和相移误差是两个主要误差源^[4].

近年来, 以液晶投影仪 (Liquid crystal display, LCD) 和数字光处理器 (Digital lighting process, DLP) 为代表的数字投影仪被广泛地应用于光栅投影系统中^[6-7]. 数字投影仪通过对投影像素单元的直接设置来实现各种投影, 在理论上可将投影像素单元设置为标准的正弦分布, 以投影出标准的正弦光栅. 但实际上, 投影出的光栅条纹并不满足标准的正弦分布, 这主要是由于电子噪声、投影过程中的非线性误差等因素造成的. 另外, 由于投影仪中投影单元是均匀、离散地分布在投影面上的, 而投影到空间中的光栅条纹是连续的, 因此存在一个由离散信号变为连续信号的过程, 这直接导致了投影仪设置的光栅模式和实际得到的光栅场的差异. 文献 [9] 指出, 在光栅投影系统中, DLP 投射的光栅信号可视为对正弦模拟信号的抽样, CCD 采集到的光栅信号又是对 DLP 投影信号的抽样, 当两者的空间频率满足一定条件时, 将因为两次抽样产生莫尔条纹, 这使投影效果不如传统的罗奇光栅离焦投影. 针对投影光栅的非正弦性误差, 提出了一些补偿算法^[10-12]. Hu^[10] 通过图像像素的灰度梯度计算条纹的相移差, 克服光栅投影系统中条纹的非正弦和非周期性带来的误差. Guo^[11] 基于统计分析, 用 γ 校正的方法提高相位计算的精度. Zhang^[12] 等鉴于 γ 校正中的非线性因素, 建立了测量值与实际值的误

收稿日期 2007-09-11 收修改稿日期 2008-03-30
Received September 11, 2007; in revised form March 30, 2008
国家自然科学基金 (60775025), 新世纪优秀人才支持计划, 江苏省自然科学基金 (BK2007116) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (60775025), Program for New Century Excellent Talents in University, and Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK2007116)
1. 东南大学复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室 南京 210096
1. Key Laboratory of Measurement and Control for Complex System of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096
DOI: 10.3724/SP.J.1004.2008.01363

差表, 通过查表法直接补偿误差.

这些校正和补偿方法, 其侧重点都在于对已经投影出的光栅条纹的非正弦性误差进行补偿, 而不是如何提高光栅投影本身的正弦性. 本文提出一种相位自校正方法, 通过调整投影像素单元的灰度设置 (下面统一称之为光栅模式), 使投影出的光栅条纹在空间中的正弦性达到最优. 相位自校正方法的基本思想是: 利用投影仪可以方便、准确地实现相移的优点, 对设定好的光栅模式使用 n 步相移法得到条纹的理想相位和实际的畸变相位分布, 然后由灰度 (相位) 的映射关系得到光栅模式的校正值, 这样就完成了一次自校正. 在经过 3~5 次这样的自校正后, 投影仪投出的光栅相位场逐渐达到最佳的正弦分布.

1 光栅投影系统

如图 1 所示, 光栅投影系统由投影仪、摄像机和被测物体构成. I^s 为光栅模式, 即投影像素单元的灰度分布, 由人为设置, I^p 为投影出的光栅条纹在空间中的光强分布, I^c 为拍摄得到的条纹图像的灰度分布. 光栅在空间中应满足标准的正弦分布. 测量时, 根据系统的空间结构关系, 由条纹图像 I^c 重构出被测物体的表面形状. 光栅在空间中应满足标准的正弦分布.

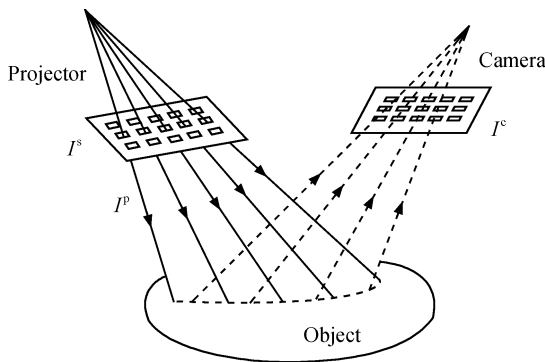


图 1 光栅投影系统光路图

Fig. 1 Optical geometry of fringe projection system

通常, 设置光栅模式 I^s 为标准正弦, 如下式

$$I^s(u, v) = a + b \cos[\theta^s(u, v)] \quad (1)$$

$$\theta^s(u, v) = \frac{2\pi}{T}u \quad (2)$$

式中 (u, v) 表示投影像素单元的坐标, $I^s(u, v)$ 为 (u, v) 点的灰度值, a 和 b 分别为正弦光栅的直流基波分量和振幅, $\theta^s(u, v)$ 为 $I^s(u, v)$ 对应的相位, 在本文算法中, 无论光栅模式 I^s 如何校正, θ^s 始终不变, 表示理想的、标准的正弦相位分布, 如式 (2) 所示, T 为设置的周期长度, 即一个周期所包含的投影

像素个数. 在理想情况下, 这样投影出的光栅的灰度 I^p 也满足标准正弦分布. 但正如前文中指出的, 在实际应用中很难做到这一点.

下面, 我们通过求解相位间的映射关系, 不断地调整 I^s 的设置, 获得正弦性较好的投影 I^p . 由于光栅的周期性, 研究一个周期内的灰度和相位关系即可用于整个光栅.

2 相位自校正

I^s 和 θ^s 分别是投影像素面上的灰度分布和相位分布. 在本文的自校正算法中, 无论光栅模式 I^s 如何校正, θ^s 始终不变, 表示理想的、标准的正弦相位分布, 如式 (2) 所示.

光栅模式被投影出来, 形成空间中的光强场和相位场, 即 I^p 和 θ^p . 可以表示为

$$\theta^p(u, v) = \theta^s(u, v) + \varepsilon(u, v) \quad (3)$$

其中 $\varepsilon(u, v)$ 表示相位场的畸变.

$$I^p(u, v) = A + B \cos[\theta^p(u, v)] \quad (4)$$

其中 A, B 是光栅场参数, 由投影仪光学系统决定.

注 1. 这种定义与通常的相位补偿算法不同, 后者通常直接建立由 I^s 到 I^p 的模型公式, 模型通常只考虑某一类或几类的畸变, 如 γ 系数等, 而且一般不考虑 θ^p .

下文中用 “ \sim ” 表示映射关系.

2.1 $\theta^p \sim \theta^s$ 映射关系的建立

将 I^s 在投影面上每次左移 1 个像素, 进行 T 次, 得到一组光栅模式 I_i^s

$$I_i^s(u, v) = I^s(u + i, v), \quad i = 1, 2, \dots, T \quad (5)$$

对应相位场产生 $i \frac{2\pi}{T}$ 的相移, 即

$$\theta_i^s(u, v) = \theta^s(u, v) + i \frac{2\pi}{T}, \quad i = 1, 2, \dots, T \quad (6)$$

由摄像机拍摄 $I_i^s(u, v)$, 得到 T 幅光栅图像, 即

$$I_i(m, n) = I'(m, n) + I''(m, n) \cos[\theta_i^p(m, n)] \quad (7)$$

式中 $I_i(m, n)$ 为第 i 幅图上 (m, n) 点的灰度值, $I'(m, n)$ 和 $I''(m, n)$ 分别是条纹图背景值和调制强度函数, $\theta_i^p(m, n)$ 为 (m, n) 点的相位场.

由式 (3)、(6) 和 (7), 得

$$I_i(m, n) = I'(m, n) + I''(m, n) \cos \left[\theta^s(m, n) + i \frac{2\pi}{T} + \varepsilon_i(m, n) \right], \quad i = 1, 2, \dots, T \quad (8)$$

式中 $\theta^s(m, n)$ 为该点的初始理想相位值, $\varepsilon_i(m, n)$ 为第 i 幅图上该点的相位畸变. 由于 $\varepsilon_i(m, n)$ 相对 $\left(\theta^s(m, n) + i\frac{2\pi}{T}\right)$ 是一个小量, 若忽略 $\varepsilon_i(m, n)$, 式 (8) 可整理为

$$I_i = w_0 + w_1 \cos\left(i\frac{2\pi}{T}\right) + w_2 \sin\left(i\frac{2\pi}{T}\right), i = 1, 2, \dots, T \quad (9)$$

式中 $w_0 = I'$, $w_1 = I'' \cos \theta^s$, $w_2 = -I'' \sin \theta^s$, 式中省略了 (m, n) . 式 (9) 即传统的 n 步相移法公式, 与通用的 4 步相移法相比, 需要采集的条纹图像数量多, 抗干扰性强, 对相位畸变 $\varepsilon_i(m, n)$ 不敏感. 由式 (9) 解出 θ^s 和 I' 、 I'' , 分别代入式 (6) 和 (7), 得

$$\theta_i^p(m, n) = \arccos \frac{I_i(m, n) - I'(m, n)}{I''(m, n)} \quad (10)$$

$$\theta_i^s(m, n) = \theta^s(m, n) + i\frac{2\pi}{T}, i = 1, 2, \dots, T \quad (11)$$

这样, 就得到了位于 (m, n) 点处的一组理想相位和实际相位的映射对 $\theta_i^s \sim \theta_i^p$, $i = 1, 2, \dots, T$. 下面, 用这个映射关系来校正光栅模式 I^s .

2.2 I^s 的校正

对 I^s 的校正需要用到 $\theta^s \sim I^s \sim I^p \sim \theta^p$ 的映射关系. 由于光栅沿横轴周期分布, 下文中我们用 $\theta^s(u)$ 、 $I^s(u)$ 、 $\theta^p(u)$ 、 $I^p(u)$, $u = 1, 2, \dots, T$, 表示一周期的各种灰度、相位. 为了简便起见, 有时也省略 u .

由式 (2), 得 $\theta^s(u)$ 的分布,

$$\theta^s(u) = \frac{2\pi}{T}u, u = 1, 2, \dots, T \quad (12)$$

结合式 (12), 系统中 $u = 1, 2, \dots, T$ 处的 $\theta^s \sim I^s \sim I^p \sim \theta^p$ 映射关系如下

$$\begin{array}{ccccccc} u & \theta^s & \rightarrow & I^s & \rightarrow & I^p & \rightarrow & \theta^p \\ 1 & \frac{2\pi}{T} & \rightarrow & I^s(1) & \rightarrow & I^p(1) & \rightarrow & \theta^p(1) \\ 2 & \frac{4\pi}{T} & \rightarrow & I^s(2) & \rightarrow & I^p(2) & \rightarrow & \theta^p(2) \\ 3 & \frac{6\pi}{T} & \rightarrow & I^s(3) & \rightarrow & I^p(3) & \rightarrow & \theta^p(3) \\ & \dots & & & & & & \dots \end{array} \quad (13)$$

式 (13) 的映射关系是校正算法的基础. 式中的每一行, 反映了各灰度、相位在整数点 $u = 1, 2, \dots, T$ 处的映射关系. 式中的每一纵列, 反映了灰度 (相位) 的分布函数. 具体地说, $I^p(u)$ 和 $\theta^p(u)$ 描述的是空间中投影出的光栅, 是连续量. 而 $I^s(u)$

和 $\theta^s(u)$ 是投影像素面上的灰度、相位分布, 是离散量, 但放在光学成像的角度, 它们产生了连续的 $I^p(u)$ 和 $\theta^p(u)$, 所以也可以看作是连续量.

这样, 式 (13) 的每一列, 可以看作是相应灰度 (相位) 分布函数的抽样点, 由这些抽样点, 我们可以采用线性插值的方法求出其任意位置的灰度 (相位) 值.

2.1 节中我们得到的映射对 $\theta_i^s \sim \theta_i^p$ 也是灰度 (相位) 分布函数的抽样点, 即

$$\begin{array}{ccccccc} i & \theta^p & \rightarrow & \theta^s & \rightarrow & I^s & \rightarrow & I^p \\ 1 & \theta_1^p & \rightarrow & \theta_1^s & \rightarrow & I_1^s & \rightarrow & I_1^p \\ 2 & \theta_2^p & \rightarrow & \theta_2^s & \rightarrow & I_2^s & \rightarrow & I_2^p \\ 3 & \theta_3^p & \rightarrow & \theta_3^s & \rightarrow & I_3^s & \rightarrow & I_3^p \\ & \dots & & & & & & \dots \end{array} \quad (14)$$

式中第 1、2 列即 2.1 节得到的 θ_i^p 和 θ_i^s , $i = 1, 2, \dots, T$. 式中第 i 行表示第 i 幅相移光栅的 $\theta^s \sim I^s \sim I^p \sim \theta^p$ 的映射关系. 式 (14) 是按照 θ^s 间隔 $2\pi/T$ 采样的, 这与式 (13) 相同, 只不过其采样的位置不同.

光栅自校正可以视为对式 (13) 和 (14) 的另一种采样. 即对于映射对 $\hat{\theta}^s(\hat{u}) \sim \hat{I}^s(\hat{u}) \sim \hat{I}^p(\hat{u}) \sim \hat{\theta}^p(\hat{u})$, $\hat{u} = 1, 2, \dots, T$, 选取合适的 $\hat{I}^s(\hat{u})$, $\hat{u} = 1, 2, \dots, T$, 使产生的 $\hat{I}^p(\hat{u})$ 和 $\hat{\theta}^p(\hat{u})$ 达到理想的正弦分布, 即

$$\hat{\theta}^p(u) = \frac{2\pi}{T}u, u = 1, 2, \dots, T \quad (15)$$

式中 $\hat{\theta}^p(u)$ 表示校正后的投影相位分布.

按式 (15) 给出的 $\hat{\theta}^p(\hat{u})$, 通过对式 (13) 和 (14) 进行插值, 可以得到相应的 $\hat{I}^p(\hat{u})$ 、 $\hat{I}^s(\hat{u})$ 等, 完成自校正. 具体方法如下:

步骤 1. 在式 (14) 中, 利用 $\theta^s \sim \theta^p$ 映射关系, 求出 $\hat{\theta}^p(\hat{u})$ 对应的 $\hat{\theta}^s(\hat{u})$, $u = 1, 2, \dots, T$.

步骤 2. 在式 (13) 中, 利用 $I^s \sim \theta^s$ 映射关系, 求出 $\hat{\theta}^s(\hat{u})$ 对应的 $\hat{I}^s(\hat{u})$, $u = 1, 2, \dots, T$.

得到的 $\hat{I}^s(\hat{u})$ 即为光栅模式的校正值. 将 $\hat{I}^s(\hat{u})$ 设置为新的光栅模式, 至此完成第 1 次自校正. 然后, 将光栅模式 $\hat{I}^s(\hat{u})$ 再投影到空间中, 按 2.1、2.2 节的方法再进行第 2 次、第 3 次... 自校正. 在实验中发现, 一般 3 ~ 5 次自校正即可获得较好的结果.

3 实验

为验证算法的有效性, 按照图 2 (见下页) 原理构建一个光栅投影系统进行实验. 系统由投影仪 (Optoma 公司 EP737)、CCD 相机 (UNIQ 公司

UP1800) 及图卡 (Matrox 公司 Meteor II) 和计算机组成.

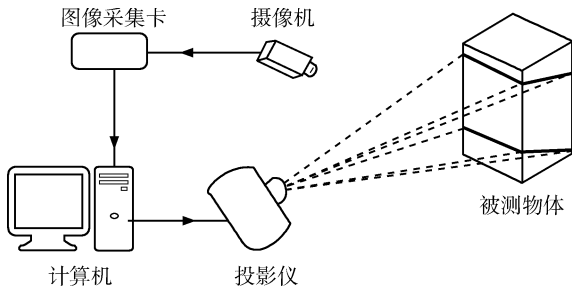


图 2 光栅投影系统结构图

Fig. 2 The fringe projection system

如图 2 所示, 摄像机和投影仪之间相距约 25 cm, 被测物体放置于投影仪前方 80 cm 处. 实验时, 由计算机控制投影仪投影光栅条纹, 条纹图像由摄像机采集, 经图卡输入到计算机中, 进行光栅自校正. 实验中, 投影模式的设置、投影、自校正过程均由程序控制自动完成.

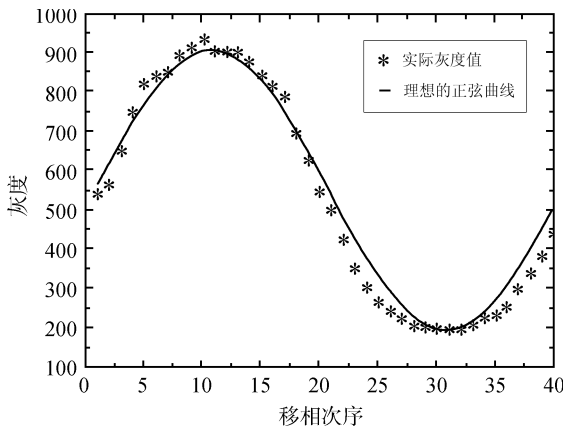
实验分为 2 部分, 主要检验自校正算法对投影光栅正弦性和相位求解精度的作用.

实验 1. 光栅自校正

投影仪光栅模式的初始设置为标准正弦分布, 周期 T 为 40, 对光栅进行 20 次自校正.

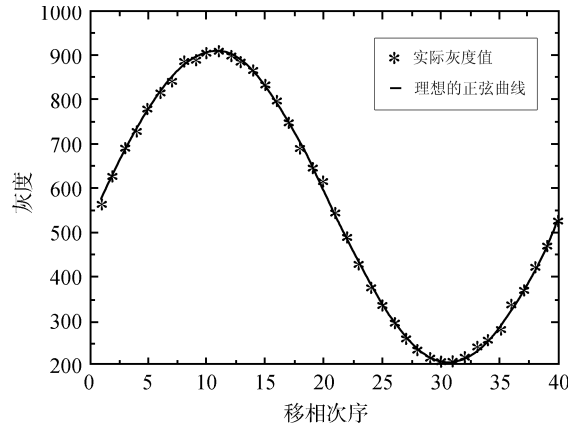
图 3 为自校正结果, 图中 “*” 点表示条纹图像的实际灰度值, 实线表示理想的正弦曲线, 以两者差的标准差作为正弦性误差. 图 3(a) 是初始光栅模式的结果, 正弦性误差为 34.7828, 图 4(b) 是经过 5 次自校正后的结果, 误差为 6.675 44, 比初始误差降低了 80.8 %.

图 4 为自校正误差图, 表示随着自校正的进行, 正弦性误差的变化曲线. 可以看出, 算法可以迅速降低正弦性误差, 在 3 ~ 5 次自校正后即可将误差降到一个比较小的范围.



(a) 初始光栅模式结果

(a) The result of initial fringe phase



(b) 五次自校正结果

(b) The result of fifth phase alignment

图 3 光栅自校正结果

Fig. 3 The result of phase alignment

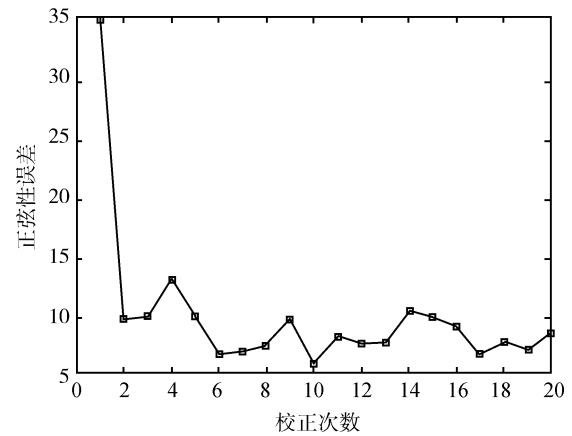


图 4 光栅自校正误差

Fig. 4 The error of phase alignment

实验 2. 解相位结果

实验 2(a), 对投影光栅用 4 步相移法求解相位, 再以 n 步相移法求出的理想相位, 进行对比, 以两者的差的标准差作为解相位误差. 图 5(a)、(b) (见下页) 分别是初始光栅模式和二次自校正的解相位结果, 误差分别为 0.169 125 和 0.020 906 4. 经过二次自校正后, 误差降低了 87.6 %.

实验 2(b), 相位求解实验. 被测物体为一个平板, 先后投影初始光栅模式和经过 3 次自校正后的光栅模式, 分别用 4 步相移法求解相位. 结果如图 6 所示 (见下页). 图中 X 轴和 Y 轴分别表示像素的横、纵坐标, Z 轴表示相位值. 以相位场的拟和平面为标准相位, 以标准相位与原相位的差的标准差作为相位误差, 得自校正前后, 相位误差分别为 0.140 020 和 0.039 222 1, 单位为弧度.

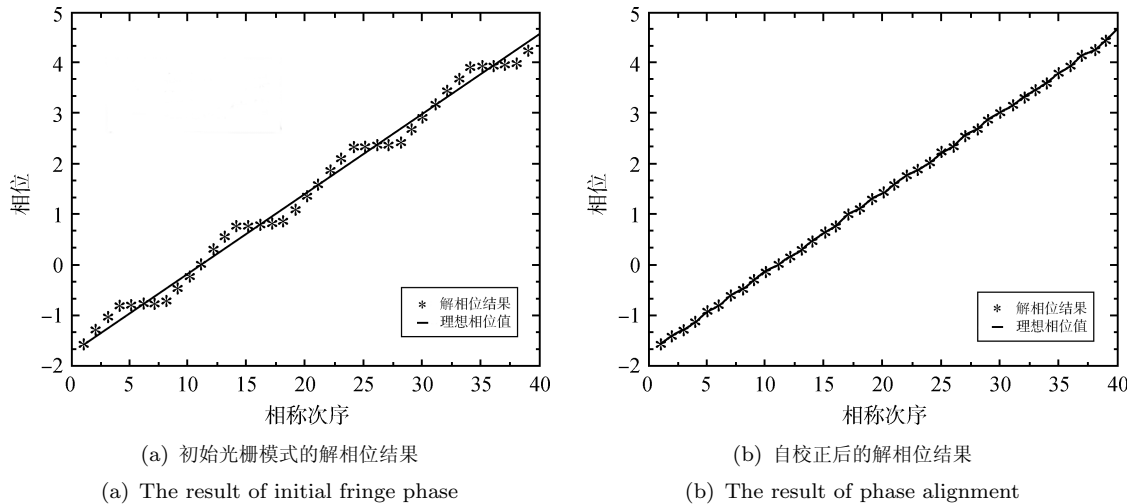


图5 解相位结果
Fig.5 The result of phase obtain

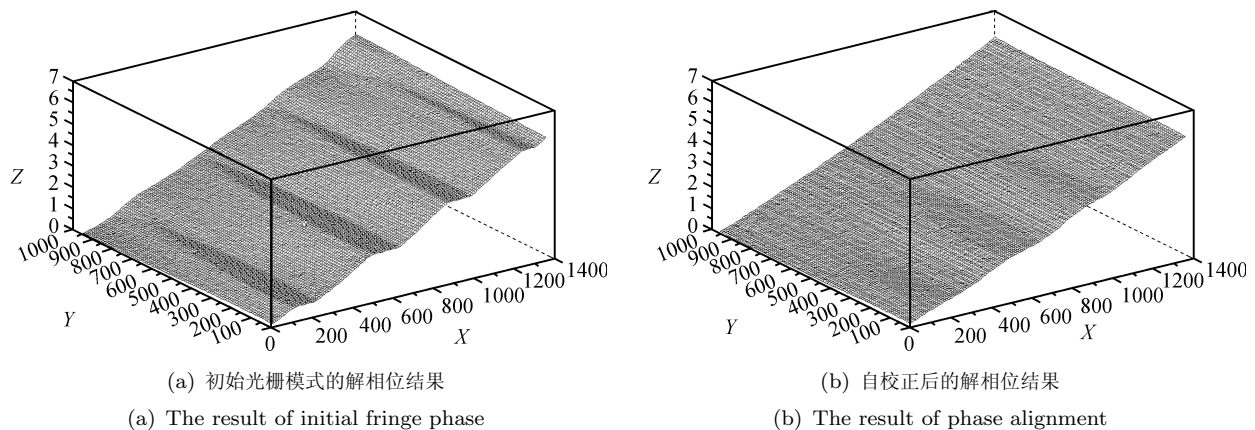


图6 解相位结果 (平板)
Fig.6 The result of phase obtained (plate)

4 结论

本文提出了一种光栅相位自校正方法. 通过求解投影光栅的理想相位和实际相位分布的映射关系, 对投影仪光栅模式进行自动调整, 使投影出的光栅条纹具有极高的正弦性. 与传统方法相比, 光栅相位自校正方法有如下特点:

1) 这种方法属于投影系统本身的自校正, 而传统方法是对投影出、已经定型的光栅进行误差补偿, 并非对投影系统本身进行调整.

2) 通过实际相位 θ^p 来描述投影光栅场, 可以表示受各种非线性因素影响投影光栅场, 而传统方法中, 通常直接建立投影光栅灰度的模型公式, 且模型中通常只考虑某一类或几类的畸变, 如 γ 系数等.

3) 自校正方法的基础是投影系统中灰度 (相位)

的映射关系, 这实质上是一种通过采样来建立投影系统输入/输出关系的方法, 并不依赖于某种特定的系统模型, 具有很强的适应性.

References

- 1 Wang Cheng-Zhang, Yi Bao-Cai, Sun Yan-Feng, Hu Yong-Li. An improved 3-D face modeling method based on morphable model. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(3): 232–239
(王成章, 尹宝才, 孙艳丰, 胡永利. 改进的基于形变模型的三维人脸建模方法. *自动化学报*, 2007, **33**(3): 232–239)
- 2 Gai Shao-Yan, Da Fei-Peng. A new fast phase unwrapping method. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 259–267
(盖绍彦, 达飞鹏. 一种新的快速解相位方法. *光学学报*, 2008, **28**(2): 259–267)
- 3 Lou Jian-Guang, Liu Qi-Feng, Tan Tie-Niu, Hu Wei-Ming. 3-D model based visual traffic surveillance. *Acta Automatica Sinica*, 2003, **29**(3): 434–449

- (楼建光, 柳崎峰, 谭铁牛, 胡卫明. 基于三维模型的交通场景视觉监控. 自动化学报, 2003, **29**(3): 434–449)
- 4 Hibino K, Oreb B F, Farrant D I, Larkin K G. Phase shifting for nonsinusoidal waveforms with phase-shift errors. *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*, 1995, **12**(4): 761–768
 - 5 Zeng Hui, Wu Fu-Chao, Hu Zhan-Yi. Robot self-localization based on planar laser measurement. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(2): 138–144
(曾慧, 吴福朝, 胡占义. 基于平面激光测量的移动机器人自定位方法. 自动化学报, 2007, **33**(2): 138–144)
 - 6 Da F P, Gai S Y. Flexible three-dimensional measurement technique based on a digital light processing projector. *Applied Optics*, 2007, **47**(3): 377–385
 - 7 Gai Shao-Yan, Da Fei-Peng. A new model of 3-D shape measurement system based on phase measuring profilometry and its calibration. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(9): 902–910
(盖绍彦, 达飞鹏. 一种新的相位法三维轮廓测量系统模型及其标定方法研究. 自动化学报, 2007, **33**(9): 902–910)
 - 8 Jiang Yu, Yang Guo-Hui. 3-D feature extract method for tool wear based on grating projection. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(3): 390–395
(姜宇, 杨国辉. 基于光栅投影技术的刀具磨损三维特征提取方法. 光学精密工程, 2007, **15**(3): 390–395)
 - 9 Shao Shuang-Yun, Su Xian-Yu. Moiré effect in PMP using DLP and its influence on phase measurement. *Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)*, 2003, **40**(5): 882–887
(邵双运, 苏显渝. 采用 DLP 的 PMP 系统中的莫尔效应及其对位相测量的影响. 四川大学学报(自然科学版), 2003, **40**(5): 882–887)
 - 10 Hu Y S, Xi J T, Li E B, Chicharo J, Yang Z K. Three-dimensional profilometry based on shift estimation of projected fringe patterns. *Applied Optics*, 2006, **45**(4): 678–687
 - 11 Guo H W, He H T, Chen M Y. Gamma correction for digital fringe projection profilometry. *Applied Optics*, 2004, **43**(14): 2906–2914
 - 12 Zhang S, Yau S T. Generic nonsinusoidal phase error correction for three-dimensional shape measurement using a digital video projector. *Applied Optics*, 2007, **46**(1): 36–43



盖绍彦 博士后. 主要研究方向为三维重构和图像处理.

E-mail: qxxymm@163.com

(GAI Shao-Yan Postdoctor. His research interest covers surface reconstruction and image processing.)



达飞鹏 教授. 主要研究方向为三维重构, 智能控制, 计算可视化. 本文通信作者. E-mail: dafp@seu.edu.cn

(DA Fei-Peng Professor. His research interest covers surface reconstruction, intelligent control, and computer visualization. Corresponding author of this paper.)