文章编号:1001-5078(2012)09-1040-05 ·光电技术与系统·

基于相位法的三维测量系统的相移误差分析

吴禄慎,万露萍,李彧雯
(南昌大学机电工程学院,江西 南昌 330031)

摘 要:采用投影栅相位法进行三维测量时,光栅移动的精密控制是整个测量系统的基础。针对相移误差,对硬件系统进行设计,通过步进电机细分控制实现更小、更平稳的相移误差;并对传统的四步相位提取算法进行优化,在优化算法中,稳定的相移误差项可以作为中间变量,即其大小随机变化不再对相位计算结果产生影响。实验结果表明:设计的硬件系统调试简单,步进电机可以实现最小1/128细分;优化后的算法有效地抑制了相移误差对测量结果的影响,进一步提高了表面微观形貌的测量精度和可靠性;从而使得测量系统的整体性能指标得到提升。

关键词:投影栅相位法;细分控制;相移误差;相位提取算法
中图分类号:TN29 **文献标识码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2012.09.017

Phase-stepping error analysis of 3D measuring system based on phase method

WU Lu-shen, WAN Lu-ping, LI Yu-wen
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: The precise control of grating phase-stepping is the foundation of measuring instrument based on projected grating phase method. In order to eliminate the phase-stepping error, the hardware system is designed for higher precision movement of step-motor. An improved algorithm is introduced based on the traditional four-step phase extracting algorithm. Using the new system, the minimal segmentation for the step-motor becomes 1/128. The improved algorithm is immune to the phase-stepping error since the stable error becomes the intermediate variable that does not influence the phase results. The experiment indicates: the improved hardware system is easier to operate; the improved algorithm restrains the movement error and then enhances the accuracy, reliability and the system's performance.

Key words: projected grating phase method; subdivision driving; phase-stepping error; phase-extracting algorithm

1 引 言

在众多的三维测量技术当中,基于投影栅相位法的三维测量技术因具有非接触、全场性、高精度和实时自动处理等特点,一直是研究的热点[1-3]。在此法中光栅移动的相移误差[4]是整个测量系统的重要误差,一般的相移装置是由步进电机配合机械传动机构来完成,因此步进电机的控制精度直接影响到此误差及整体测量精度。传统的步进电机的控制是由单片机以及模拟电路构成,比较复杂,控制精度低,误差不稳定;在算法上,传统的四步相位提取方法[5]对相移误差比较敏感。本文针对相移误差,分别进行了硬件系统的设计和算法上的优化研究。

2 投影栅相位法的相位调制原理

在图1中,G 为黑白相间且节距恒定为 P 的正弦光栅[6],E_P,E'_P 分别为光栅投影系统镜头出瞳和入瞳的光心,E_C,E'_C 分别为CCD图像采集镜头的入瞳和出瞳的光心,R 为参考平面,S 为接收光栅图像的成像面。投影系统光心与CCD镜头光心之间

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 51065021)资助。
作者简介:吴禄慎(1953-),男,教授,博士生导师,研究方向为光机电一体化系统设计,实验与仿真;测试,传感与光机电一体化,三维图像测量技术与逆向工程。E-mail:wulushen@163.com
收稿日期:2011-12-20;**修订日期**:2012-01-09

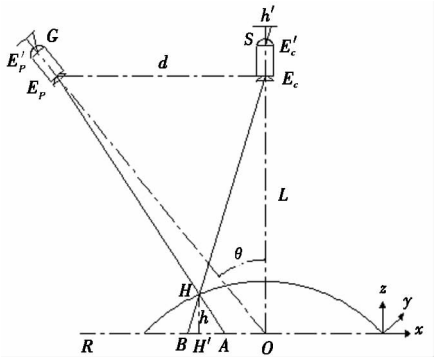


图 1　投影栅相位法光路原理图

的距离为 d,CCD 镜头光心到参考平面的距离为 L。H 为被测物体表面上任一点,此点在参考平面上的投影为 H',显然线段$\overline{HH'}$的长度即为被测物体在点 H 处的高度 h。A,B 点分别是 H 点与投影系统光心、摄像系统光心连线的延长线与参考平面 R 的交点。在放入被测物体前后所拍摄的两幅图像上 H 的像点相位值分别为 A,B 点的相位 ϕ_A,ϕ_B,二者之间的相位差为 $\Delta\phi(x,y)=\phi_B-\phi_A$,由几何条件得到测量物体高度为:

$$h(x,y)=LP\Delta\phi(x,y)/[P\Delta\phi(x,y)+2\pi d] \quad (1)$$

由上述相位调制原理可知,L,d,P 是测量系统与正弦光栅的的几何参数,物体的高度信息就调制在光栅光强函数的相位变化 $\Delta\phi(x,y)$ 中,只要求得全场的 $\Delta\phi(x,y)$ 的值,就可以获得物体表面轮廓上每个点的高度,进而得到被测物体的三维尺寸信息。

3　三维测量系统的硬件设计

三维精密测量系统的硬件设计总体框图如图 2 所示,其中核心部分便是步进电机细分驱动电路,它控制步进电机运行的工况,并与精密器件丝杆一起决定光栅的移动。

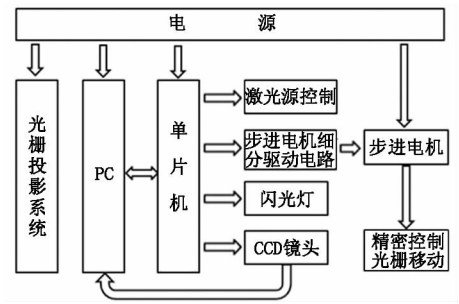
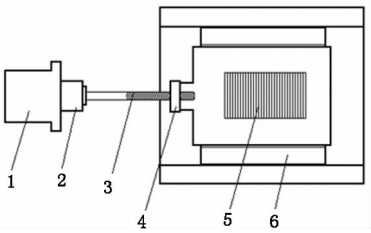


图 2　硬件系统结构图

3.1　光栅相移精密控制系统

经实践证明,运用投影栅相位法时,一般采用四步相移动法进行解相,硬件上即黑白正弦光栅沿垂直于投影光路方向每次移动 1/4 栅距,分四步走完,要求步进电机有很高的定位精度和分辨率。光栅相移系统主要包括步进电机、联轴器、丝杆、螺母、正弦光栅和导轨 6 个部分。光栅镶嵌在定位块上,定位块再在导轨上移动,结构设计方案如图 3 所示。



1 – 步进电机;2 – 联轴器;3 – 丝杆
4 – 螺母;5 – 正弦光栅;6 – 导轨

图 3　投影光栅相移装置

对于导轨的选择,有以下决定因素:正弦光栅要求响应速度快、摩擦小、定位精度比较高且行程比较短,所以本文选择一级精度的滚动导轨。滚动导轨的定位精度高,由于摩擦系数小,可以节省很多能源,且运行速度比较快,寿命长,定位块选择滑块,灵敏度高,运动平稳且低速时不易发生爬行现象,高速停止振动小。

传动机构采用滚珠丝杆,滚珠丝杆的丝杠轴与丝母之间有很多滚珠在做滚动,所以能得到较高的运动效率,与过去的滑动丝杠相比驱动力矩达到1/3 以下,即达到同样运动结果所需的动力为使用滚动丝杠的 1/3。滚珠丝杆由于是利用滚珠运动,所以启动力矩极小,不会出现滑动运动那样的爬行现象,能保证实现精确的微进给。可以施加预压,由于预压力可使轴向间隙达到负值,进而得到较高的刚性。

光栅相移系统的分辨率与滚珠丝杠螺距、步进电机步距角有关。假设滚珠丝杠螺距为 P_s,步进电机步距角为 α,那么步进电机每转动一步正弦光栅水平移动距离为 $l=P_s\alpha/360$,显然越小的 P_s 和 α 会提高光栅相移系统的分辨率。根据此系统参数可得到,如果在 n 细分下的步进电机控制电路中,相移系统的最小移动距离为 $l=P_s\alpha/(360\times 2^n)$,因此,为了提高光栅相移系统的分辨率和定位精度,应该提高步进电机的控制精度。

3.2　步进电机控制方案

控制方案选取的步进电机型号为北京和利时公司的“森创”两相混合式步进电机 28BYG250C,工作电流为 0.7 A。传统的步进电机驱动电路一般需要的器件过多,如传统的由 L297,L298 等元件构成的驱动电路,励磁状态转换时比较繁琐,需要将每一路存储器重新烧录、安装,工作量大,后期的调试和修正也相当困难[7-8]。因此,本文采用基于常用的

8051 单片机控制下的步进电机细分驱动集成芯片 THB7128，其特点如下：双全桥 MOSFET 驱动；低导通电阻 0.53 Ω；最高耐压 40 VDC；峰值电流 3.3 A；多种细分可选（1，1/2，1/4，1/8，1/16，1/32，1/64，1/128）；自动半流锁定功能；内置混合式衰减模式；内置输入下拉电阻；内置温度保护及过流保护[9]。对应此步进电机细分驱动电路图如图 4 所示。

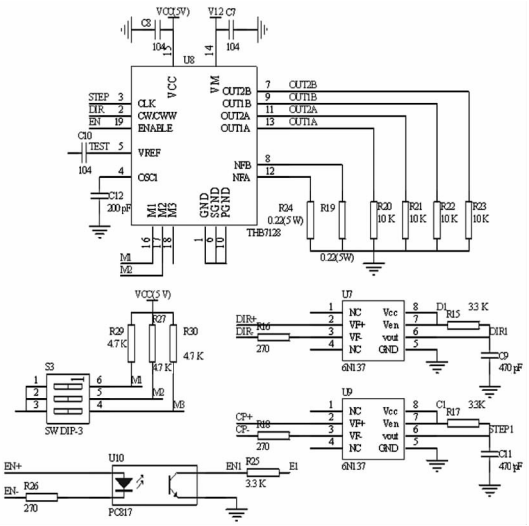


图 4 步进电机细分驱动电路

通过 THB7128 的工作电流设定端口（VREF）设置步进电机的工作电流为 0.7A，单片机通过 THB7128 的细分设置端（M1，M2，M3）设置步进电机的细分数。

改进后的步进电机细分驱动电路，很大程度上减轻了电路的复杂程度，减少了电路的前期调试和后期修正的难度和工作量。另外，由于 THB7128 芯片对步进电机的最高细分数高达了 1/128，在控制精度上远远高于以往的驱动方式，通过步进电机细分控制实现更小、更平稳的相移误差。

4 优化四步提取算法研究

在相移技术中，投影系统和成像系统都远离物体，因而物体深度范围内的聚焦偏差可以忽略。当一个正弦光栅图样投影到物体上时，探测到成像的变形光场可以描述为：

$$I(x,y)=R(x,y)\{A(x,y)+B(x,y)\cos[\varphi(x,y)]\} \tag{2}$$

式中，$R(x,y)$ 表示物体表面各点的反射率；$A(x,y)$ 代表背景光强；$B(x,y)/A(x,y)$ 代表条纹对比度，相位函数 $\varphi(x,y)$ 代表条纹图样的特征，包含了物体面形的高度信息。

由于物体各点的反射率 $R(x,y)$ 变化不大，可以假定为一个常数，因此第 i 帧相移图的光强表达式为：

$$I_i(x,y)=I_0(x,y)\{1+\gamma\cos[\varphi(x,y)+\alpha_i]\} \tag{3}$$

式中，$I_0(x,y)$ 为直流光强；γ 为干涉图对比度；$\varphi(x,y)$ 为被测波面与参考波面间的相位差；α_i 为参考相位移动量。

针对硬件改进后仍然存在的稳定的相移误差，本文推导出了对相移误差免疫的四步相位提取法。不同于传统四步算法 0°，90°，180°，270° 的相位分布，优化算法采用了 -3α，$-\alpha$，α，3α 的相位分布。因此四个相位上的光强表达式为：

$$\begin{aligned}
I_1(x,y)&=I_0(x,y)\{1+\gamma\cos[\varphi(x,y)-3\alpha]\}\\
I_2(x,y)&=I_0(x,y)\{1+\gamma\cos[\varphi(x,y)-\alpha]\}\\
I_3(x,y)&=I_0(x,y)\{1+\gamma\cos[\varphi(x,y)+\alpha]\}\\
I_4(x,y)&=I_0(x,y)\{1+\gamma\cos[\varphi(x,y)+3\alpha]\}
\end{aligned} \tag{4}$$

对 $I_1(x,y)$，$I_2(x,y)$，$I_3(x,y)$ 三帧光强方程组联立解得：

$$\tan\varphi_1=\frac{\sin2\alpha}{\cos2\alpha-\dfrac{I_1(x,y)-I_2(x,y)}{I_2(x,y)-I_3(x,y)}} \tag{5}$$

由于硬件上的改进，步进电机能够更加精确平稳地运行，因此假设相移系统每行进 α 时相移误差恒定为 $\Delta\alpha$，则实际相移 $\alpha^*=\alpha+\Delta\alpha$，对光强方程的前三帧算式 $I_1(x,y)$，$I_2(x,y)$，$I_3(x,y)$，设 $\alpha^*=\pi/4+\Delta\alpha$，$\varphi_1(x,y)$ 为 $\Delta\alpha$ 为 0 时的理想相位值，则：

$$\tan\varphi_1=\frac{I_2(x,y)-I_3(x,y)}{I_2(x,y)-I_1(x,y)} \tag{6}$$

同理对于 $I_2(x,y)$，$I_3(x,y)$，$I_4(x,y)$ 构成的三帧光强方程组解得：

$$\tan\varphi_2=\frac{I_2(x,y)-I_3(x,y)}{I_3(x,y)-I_4(x,y)} \tag{7}$$

对于实际相移 $\alpha^*=\alpha+\Delta\alpha$，四个新相位下的实际光强方程为：

$$\begin{aligned}
I'_1(x,y)&=I_0(x,y)\{1+\gamma\cos[\varphi(x,y)-3\alpha-3\Delta\alpha]\}\\
I'_2(x,y)&=I_0(x,y)\{1+\gamma\cos[\varphi(x,y)-\alpha-\Delta\alpha]\}\\
I'_3(x,y)&=I_0(x,y)\{1+\gamma\cos[\varphi(x,y)+\alpha+\Delta\alpha]\}\\
I'_4(x,y)&=I_0(x,y)\{1+\gamma\cos[\varphi(x,y)+3\alpha+3\Delta\alpha]\}
\end{aligned} \tag{8}$$

将 $I'_1(x,y)$，$I'_2(x,y)$，$I'_3(x,y)$ 代入公式（6），可以得到：

$$\tan\varphi'_1=\frac{I'_2(x,y)-I'_3(x,y)}{I'_2(x,y)-I'_1(x,y)}$$

$$=\frac{\cos[\varphi(x,y)-\alpha-\Delta\alpha]-\cos[\varphi(x,y)+\alpha+\Delta\alpha]}{\cos[\varphi(x,y)-\alpha-\Delta\alpha]-\cos[\varphi(x,y)-3\alpha-3\Delta\alpha]} \tag{9}$$

经过一系列数学运算,可以化简为:

$$\tan\varphi'_1=\frac{\tan\varphi}{\cos(2\Delta\alpha)+\sin(2\Delta\alpha)\tan\varphi} \tag{10}$$

同理将 $I'_2(x,y)$,$I'_3(x,y)$,$I'_4(x,y)$ 代入公式(7),可以得到:

$$\tan\varphi'_2=\frac{I'_2(x,y)-I'_3(x,y)}{I'_3(x,y)-I'_4(x,y)}$$

$$=\frac{\cos[\varphi(x,y)-\alpha-\Delta\alpha]-\cos[\varphi(x,y)+\alpha+\Delta\alpha]}{\cos[\varphi(x,y)+\alpha+\Delta\alpha]-\cos[\varphi(x,y)+3\alpha+3\Delta\alpha]} \tag{11}$$

经过一系列数学运算,可以化简为:

$$\tan\varphi'_2=\frac{\tan\varphi}{\cos(2\Delta\alpha)-\sin(2\Delta\alpha)\tan\varphi} \tag{12}$$

联立公式(10)和式(12),并结合三角函数关系 $\sin^2(2\Delta\alpha)+\cos^2(2\Delta\alpha)=1$,可得:

$$\tan\varphi=\pm\sqrt{\frac{4\tan^2\varphi'_1\tan^2\varphi'_2-(\tan\varphi'_2-\tan\varphi'_1)^2}{(\tan\varphi'_1+\tan\varphi'_2)^2}} \tag{13}$$

由式(13)可知,误差项 $\sin(2\Delta\alpha)$ 和 $\cos(2\Delta\alpha)$ 被作为中间项消去。此算法充分利用了四步相移记录,对线性相移误差有较好的免疫作用。

5　实验与测量结果

对常见的鞋楦模型进行了表面测量与分析实验。图 5 是鞋楦实物图,对光强方程组分别采用传统四步相位提取算法和优化四步提取算法,再经过去包裹等处理得到鞋楦表面的三维点云图。由图 6 和图 7 可以看出,传统四步相位提取算法中,点云 - 模型的标准偏差是 0.304 mm,平均偏差值为 +0.093/ -0.102 mm;而在采用了本文中提出的优化四步相位提取算法之后,点云 - 模型的标准偏差是 0.210 mm,并且平均偏差值变为 +0.083/ -0.089 mm。由此可见,本文提出的优化算法较好的还原了物体表面形貌。

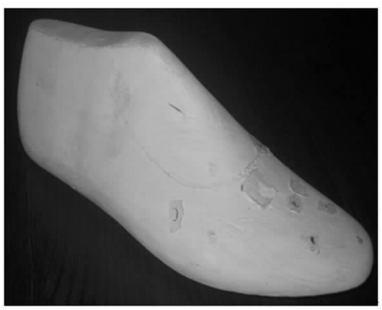


图 5　鞋楦实物图

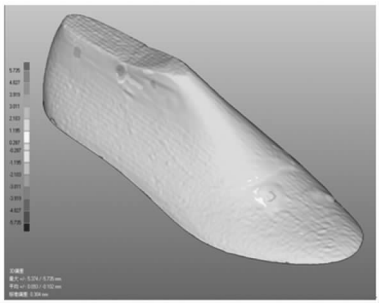


图 6　传统四步相位提取算法的鞋楦点云误差分析

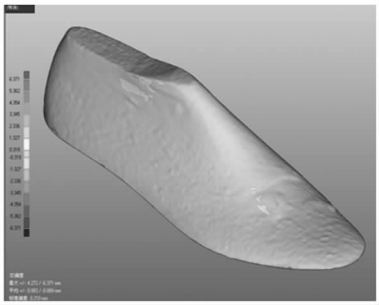


图 7　优化算法的鞋楦点云误差分析

6　结　论

本文就基于投影栅相位法测量系统中的相移误差进行研究,分别在硬件和算法上进行了设计和优化,硬件上采用了集成度和控制精度更高的 THB7128 步进电机驱动控制芯片,再配合精密的相移控制系统,使得测量系统的相移误差更小,更稳定,进而提高相移系统的精度和分辨率;在算法上,对传统的四步相位提取算法进行优化,相移误差项可以作为中间变量,使得此种算法对相移误差不再敏感。通过对鞋楦模型的实验表明,采用优化四步相位提取算法后,能够更好地还原物体地表面形貌。

参考文献:

[1] Li Yonghuai, Feng Qibo. Overview of optical 3 D profile measurement [J]. Laser & Infrared, 2005, 35 (3): 143 - 147. (in Chinese)
李永怀,冯其波. 光学三维轮廓测量技术进展[J]. 激光与红外,2005,35(3):143 - 147.

[2] Tao Tao, Guo Hongwei, He Haitao. Overview of optical three-dimensional measurement technique for specular reflection surfaces[J]. Optical Instruments, 2005, 27(2): 89 - 95. (in Chinese)
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):89 - 95.

[3] Chen F, Brown G M, Song M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. Opt Eng, 2000, 39(1): 10 - 22.

[4] Hibino K, Oreb B F. Phase shifting for nonsinusoidal

waveforms with phase-shift errors[J]. Opt Soc Am,1995, 12(4):761 – 768.

[5] Hou Lizhou, Qiang Xifu, Sun Xiaoming. Analysis and comparison of errors in several phase-stepping algorithm with an arbitrary step[J] Optical Technique, 1995, 5: 7 – 10. (in Chinese)
侯立周,强锡富,孙晓明. 几种任意步距步进相移算法的误差分析与对比[J]. 光学技术,1999,5:7 – 10.

[6] Zhao Jianjun, Song Chunrong, Chen Hongye. Theoretical study of detect laser information by sinusoidal grating[J]. Laser & Infrared,2010,40(9):989 – 992. (in Chinese)
赵建君,宋春荣,陈红叶. 利用正弦光栅探测激光信息的理论研究[J]. 激光与红外,2010,40(9):989 – 992.

[7] Diao Fengli. The design and realization for two-phase stepping motor subdivision driver[D]. Xi′an: Xi′an University of Technology,2006. (in Chinese)
刁奉丽. 二相混合式步进电机微步驱动技术的研究与实现[D]. 西安:西安理工大学,2006.

[8] Wang Xiaodan. Research on stepping motor subdivision driving system based on microcontroller[D]. Changsha: Central South University,2008. (in Chinese)
王晓丹. 基于单片机的步进电机细分驱动系统的研究[D]. 长沙:中南大学,2008.

[9] Huang Tao. Design for high power stepping motor driver [J]. Science & Technology Information, 2010, 18: 124 – 125. (in Chinese)
黄涛. 一种高细分,大功率步进电机驱动器设计[J]. 科技资讯,2010,18:124 – 125.