

文章编号 : 0253-2239(2001)10-1239-06

一种新的投影莫阿三维轮廓测试系统*

王学礼¹⁾ 赵 宏¹⁾ 李根乾²⁾ 谭玉山¹⁾

(1), 西安交通大学激光与红外应用研究所, 西安 710049)
(2), 西北工业大学航海学院, 西安 710072)

摘要: 基于投影莫阿原理, 考虑到传统投影莫阿测试系统结构难以达到均匀光照、机械结构相移速度慢且重复精度低的缺点, 设计出一种新的投影莫阿三维轮廓投影成像测试系统。利用计算机实时控制亮灭三个光源实现相移, 大大提高了系统测试速度, 相移重复精度高。采用垂直投影, 双电荷耦合器件(CCD)倾斜成像机构, 提高了光场的均匀性和可测物范围。该系统特点是测试速度快(全场测量 4 s~8 s), 相移精度高、测量面积大(最大可为 300 mm×300 mm), 光强照明均匀, 系统测量精度可达 40 μm。详细分析系统关键技术, 并给出具体实验结果。结果表明系统的设计原理是成功的, 为大面积物体三维轮廓快速测量提供了一种有意义的思路。

关键词: 投影莫阿; 三维测量; 变光源; 相移

中图分类号: TN206 文献标识码: A

1 引 言

光电三维面型测量技术利用被测物表面对主动入射光束的调制反射信息, 通过摄像机、监视器、计算机图像处理系统等装置和软件系统来记录和处理, 获得物体三维型貌。它具有非接触、无损、自动、高精度、高效率等一系列优点, 广泛应用于物体的三维轮廓、形变、振动、位移等参量的测量。

目前光电三维测量的主要方法有^[1-3]干涉法、结构光三角法、莫阿法、相位法等。干涉法测量精度最高, 有非接触、全场、速度的优点, 但测量范围小, 对大范围测量需用到复杂的面型拼接技术。结构光三角法中的激光点扫描和线扫描基本上是逐点或逐线测量, 每测量一次数据后激光束和被测物体间需相对位移, 具有原理简单、精度较高、易于实现的优点, 但速度较慢, 一次不能实现全场快速测量。莫阿法是通过分配条纹级次和确定条纹中心解调等高线上的高度信息来进行测量, 此方法失去了符号信息, 即无法从一幅等高线图上判断凹凸, 且只能获得等高线上的高度信息(即只测量了整数级相位), 而等高线间则需要插补运算, 测量精度低, 现在已很少使用。相位法计算出被测物上各点的真实高度, 精度比莫阿法有数量级上的提高, 可基于一幅或多幅条纹图的, 而基于多幅条纹图的相位法比基于一幅条

纹图的相位法限制少、精度高, 目前最常用。基于多幅条纹图的相位法主要是典型的 N 步相移法。

莫阿技术和相移法相结合, 大大提高了莫阿技术的测量精度。主要有两种形式: 相移阴影莫阿法和相移投影莫阿法。相移阴影莫阿法具有简单、实用等特点, 但由于光栅大小的限制, 一般只适合测量比较小的物体, 且为了减少光栅衍射的影响, 光栅周期必须较大, 光栅与物体的距离必须较近。相移投影莫阿法可以解决测量大面积物体的问题, 但实现起来要比阴影莫阿相移法困难一些, 会碰到光源强度、成像透镜精度要求很高、光栅衍射等问题(据笔者查阅资料统计, 目前实现的系统中, 几乎都采用相移阴影莫阿方式, 这也许是主要原因之一)。但随着测量面积加大、物体在深度方向测量范围加大、提高测量效率等要求的提高, 相移投影莫阿技术必将成为很有发展前途的测试手段。

2 系统原理、结构特色与相移机构

国内外有关学者在相移投影莫阿方面所做的工作^[4-7], 大都采用图 1 所示的结构。图中投影系统与参考平面成一定角度, 成像系统则垂直于参考平面。此系统主要优点是两光栅(投影光栅和解调光栅)皆为标准光栅, 皆可由光栅生产厂家制造, 但缺点是很难做到整个视场内投影光场的均匀性。

图 1 所示为传统相移投影莫阿系统结构图, 它的成像光轴垂直于水平参考平面, 投影光轴与成像

* 西安交通大学青年教师科研基金资助课题。

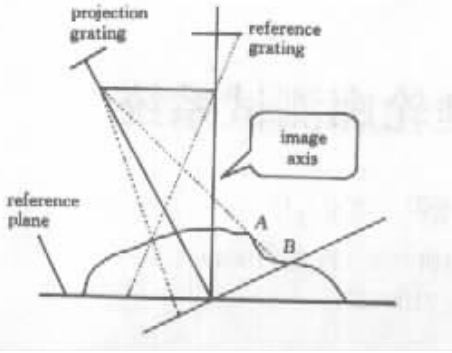


Fig.1 Traditional projection-moire structure

光轴有一定夹角。由图中可以明显看出,被测物体 AB 间不能被栅线照亮,成为不可测区域。另外,由于物体上不同区域与投影系统出瞳距离不同,即使能把整个视场全部投到,由于光线在传播中是不断衰减的,也不可能保证整个视场光强的均匀性。另外,采用的相移系统一般为机械式相移,且不说相移精度如何,其最大缺点是相移速度慢且重复性差。

本系统采用图 2 所示投影成像结构。从系统原理性结构而言,本系统可以做到整个光场投影的均匀性。另外,我们采用双电荷耦合器件(CCD)成像结构,对于图 1 中的不可测区域(AB 部分),在我们的测试系统中也成为可测区域,在某种程度上扩大了物体的可测范围并能提高测量精度。在相移方面,我们的投影部分有三套投影系统(作为一个整体),每个投影系统间有一确定性相移,采用计算机实时控制三个光源的亮灭,进行三步相移,大大提高了相移速度。具体结构如图 3 所示。

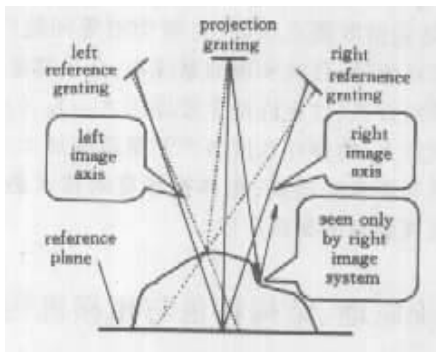


Fig.2 Structure used in this paper

为实现快速相移,我们采用了变光源的方式。通过三次或更多次轮流亮灭各光源,每次得到一不同相移量的条纹图,大大提高了获取莫阿条纹图的速度。最容易想到的实现方式是,以三个光栅——每个栅间有一固定相移量——的方式产生相移。而实际操作时,这种光栅不便制作在同一块基体上,如果分散制作,将来安装时的调节必将是一个非常棘

手的问题,因为需要每个光栅的栅线必须和另一光栅的栅线平行,而且需要固定的相移量,况且光栅的固定锁紧以及今后相移量的任意调节都成问题。为此,我们设计成另一种新结构,如图 3 所示。我们采用一块光栅作为投影光栅,整块光栅放入三个(三个以上即可)腔的中间截面部位,腔间有隔壁,防止各腔间光线互相影响,每个腔的上半部分是准直源,用来照亮各自腔中间对应的部分投影光栅。

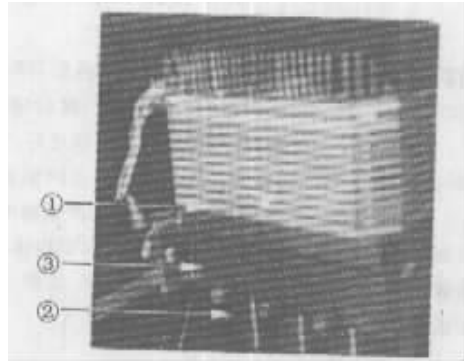


Fig.3 Phase shifting structure

每个腔的下半部分有三个高精度成像透镜。每个成像透镜的左右两侧装有投影微小平移调节旋钮,通过旋钮,可以方便地对各透镜实现所需相移量的调节与锁紧。图 3 中①为光栅槽位置,用来放置和固定光栅片;②为相移调整旋钮;③为高精度和高分辨率镜头。

系统设计中将三成像透镜设计在垂直于系统横梁的同一平面内,由于机械加工误差的存在,在设备安装好后,最好通过某一方法将三个成像透镜调整到同一平面内。首先在光栅槽中放入一光栅,其中心附近仅刻有一条线,分别投影此线到参考平面上,通过“电荷耦合器(CCD)靶面连接监视器观察”的方式,调整光栅旁边的平移微调装置即可把三个像调整到重合位置,这样即可认为三透镜位于同一平面内。

把测量光栅放上后,同样通过上面的调节和观察方式来调整我们所需要的相移。我们的“电荷耦合器(CCD)靶面连接监视器观察”方式中用的电荷耦合器(CCD)靶面如图 4 所示。通过水平仪调整参考面水平(参考面为曝制本系统的变周期光栅所用的平面),把与监视器连接好的电荷耦合器靶面水平放置在参考面上,通过参考面底部的微调旋钮,旋低参考面,使得电荷耦合器(CCD)靶面的光敏面处于参考面原来的高度。电荷耦合器(CCD)靶面上也有位置固定标记,打开某灯光源,投射光栅的像到电荷耦合器靶面,此时可从监视器上看到经过放大的

条纹。参考面上周期为 1 mm 左右的条纹可在监视器上观察到 80 mm 左右的宽度,用放大 10 倍左右的工具显微镜跟踪条纹边缘。我们所用电荷耦合器靶面的像素为 7 μm 左右,通过三步相移,每次相移 330 个 μm,这样相移精度可达到 2% 左右。



Fig.4 CCD detector

根据相移莫阿技术^[8],本系统采用的莫阿相位计算公式为:

$$\varphi(x, y) = \arctan \frac{-\sum_{k=1}^N I_k(x, y) \sin \frac{2\pi}{N}(k-1)}{\sum_{k=1}^N I_k(x, y) \cos \frac{2\pi}{N}(k-1)}, \quad (1)$$

由于采用三步相移技术,并且相对相移量为 2π/3,所以最终计算相位的公式为:

$$\arctan \frac{-I_2 \sin \frac{2\pi}{3}(2-1) - I_3 \sin \frac{2\pi}{3}(3-1)}{I_1 + I_2 \cos \frac{2\pi}{3}(2-1) + I_3 \cos \frac{2\pi}{3}(3-1)} = \arctan \left[\frac{\sqrt{3}(I_3 - I_2)}{2I_1 - I_2 - I_3} \right]. \quad (2)$$

3 若干关键技术问题及信息求解流程

3.1 光源选取问题

本文采用变光源移相,在一个测量的周期内,首先 1 号灯亮,左右成像系统各采集一幅相移量为 0 的图像;接着 1 号灯灭 2 号灯亮,左右成像系统各采集一幅相移量为 2π/3 的图像;最后 2 号灯灭 3 号灯亮,左右成像系统各采集一幅相移量为 4π/3 的图像。这要求光源具有快速闪频性能(下一灯闪亮前,上一灯必须完全灭掉),发光均匀、亮度高和冷光源特性(高光效低热效)。我们在实验过程中起初由于忽视了光源的热效应,结果使得一价值 2000 多元的光栅爆裂。经过多次实验,最终我们用高亮度发光二极管面阵制作自己的光源,效果良好。

3.2 自制光栅

系统结构设计的几何成像关系决定了我们应采用变周期光栅作为解调栅以形成莫阿条纹的像面位置。由于没有厂家常规生产我们所需要的变周期光栅,我们用特殊方法自己制作所需光栅。方法是在解调栅位置上放感光胶片或干版,把曝光系统设置成某一特定工作条件,曝光解调栅,冲洗并复位解调栅。此种方法计及系统误差,效果好。因为莫阿信息的信噪比是由叠加形成此莫阿信息的比较弱的周期性结构决定,自己曝制的光栅信噪比虽没有厂家生产的好,但此种因素不会对最终的莫阿条纹的信噪比产生影响。解调栅的复位过程是:打开曝光解调栅所用的那个灯,把解调栅放到原来的位置,并做细微调整,通过监视器观察莫阿现象(如果复位不准确,就会产生莫阿现象),直到莫阿现象完全去除为止,此时光场一片黑暗或一片明亮。

3.3 非等高线莫阿信息的解调与两维查找表的建立

传统投影成像结构决定了莫阿图中的莫阿条纹信息是“莫阿等高线”。在求解莫阿信息的过程中只需要建立一维查找表,其查找表的建立是相当方便的。而我们的新结构决定了我们采集的莫阿图中的莫阿条纹信息是“莫阿非等高线”,为解调莫阿信息,我们必须建立两维查找表。且建查找表时基准参考面倾斜方向和以后的查找方向也是有一定要求的。

图 5 和图 6 是作查找表时两种不同的倾斜方式。图 7 是图 5 所示倾斜方式(沿 y 轴旋转)时的某

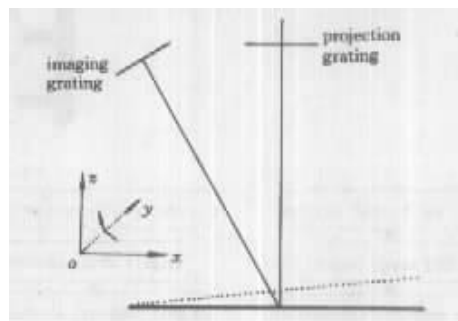


Fig.5 The first incline style

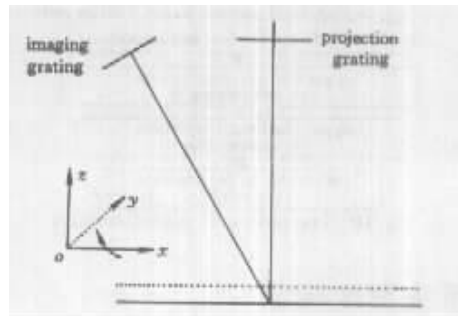


Fig.6 The second incline style

一幅莫阿图,图 8 是图 6 所示倾斜方式(沿 x 轴旋转)时的某一幅莫阿图。由于图 7 中的 $ABCD$ 是一斜面, AB 等高, CD 等高, 可是沿着 AC 方向条纹是不等间距的, 因此, 此种倾斜方式是无法建立查找表的。图 8 中 $A'B'C'D'$ 也是一斜面, $A'B'$ 等高, $C'D'$ 等高, 但沿着 $A'C'$ 方向平行的每一条纹是等间距的, 我们可沿着与 $A'C'$ 方向平行的每一条线分别建立查找表(每一查找列上的各点的物距是相同的, 不

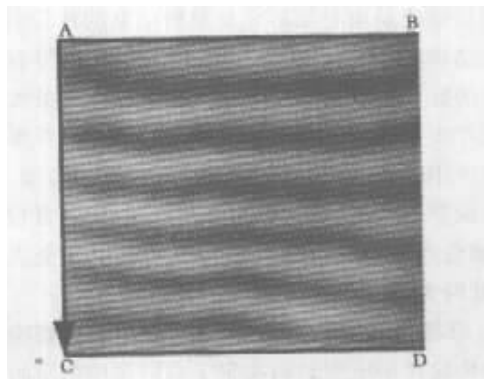


Fig. 7 Moiré visa Fig. 5

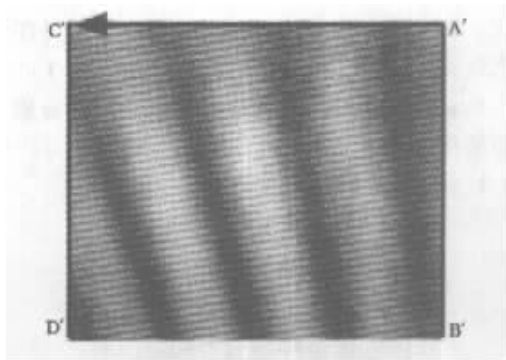


Fig. 8 Moiré visa Fig. 6

同查找列上的物距不同), 即建立两维查找表。这是由我们设备的特殊结构设计决定的。而对于传统的结构, 此两种倾斜情况均可建立查找表。

3.4 信息控制和求解流程

我们基于 VC++ 6.0 平台, 编制了系统控制与信息处理系统, 整个信息处理过程可以单步执行, 也可以全自动化执行, 并给出被测物体的三维数据文件和驱动 Matlab 对数据做直观显示, 数据采集与处理过程如图 9 和图 10 所示。

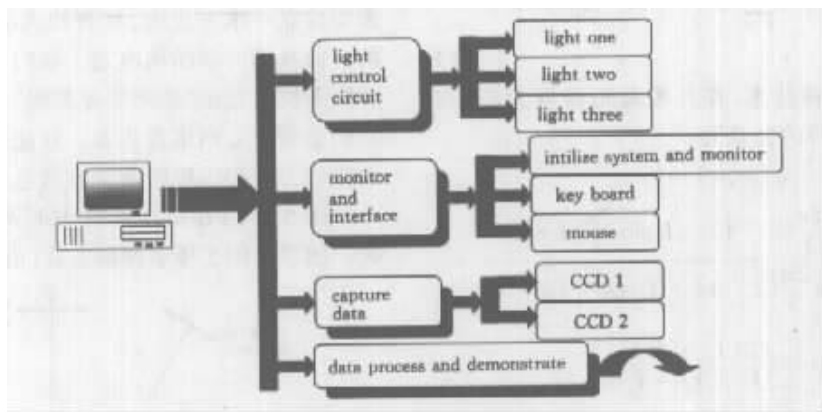


Fig. 9 Information control

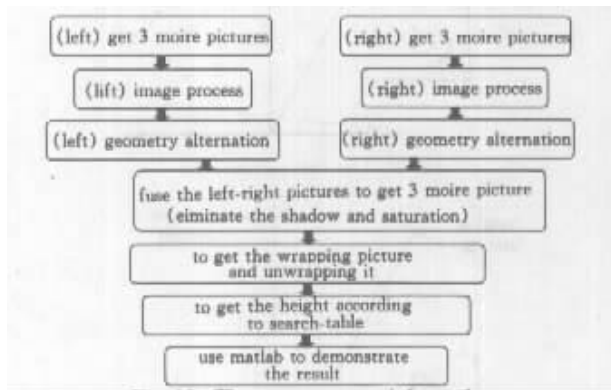


Fig. 10 The process to get information

下, 作为本系统重要组成部分的参考平面(350 mm × 350 mm 的正方形平面), 既是用来制作系统解调光栅的漫反射标准面, 也是本系统的标定平面。由于莫阿测试系统的系统误差会对结果带来不小的影响, 因此, 计算解调后的求解物体高度是通过实验查找表的方式得出的, 而不用理论查找表。本系统是通过将参考面倾斜某一角度的办法制作查找表, 因此查找表的精度基本上决定了最后的测试精度, 在制作完查找表后, 我们通过对斜斜面做任意方向倾斜后得到的实验高度与理论高度之差来标定出系统所能达到的实际精度。理论高度是根据参考平面的实际加工精度和抬高某一高度后, 在参考面上测试区域由千分表测得四个点的精确高度数据后, 经计

4 系统精度标定

实际系统的测试精度标定过程及有关结果如

算得出。

实际测试结果是对此种高度状态下由查找表得出的数值。比较此两组数据,可以标定出系统的实际精度范围。

标定范围为 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 的正方形区域。用千分表把四个角的高度值调整为 32.543 mm 、 32.543 mm 、 35.678 mm 和 35.678 mm 。在此区域内任意抽取若干条线,比较其理论精度与实际测量结果。其中某一行和列的结果如图 11 和图 12 所示。

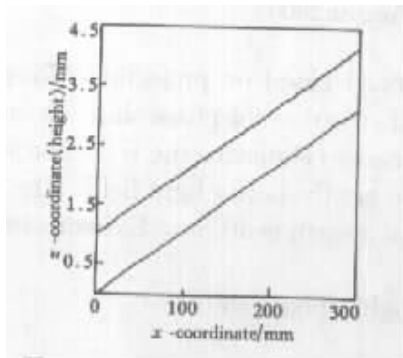


Fig. 11 The compare between theory value and the tested value of the 16th volume

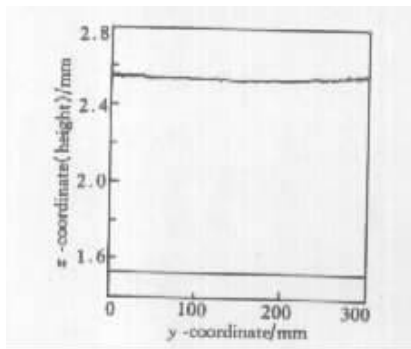


Fig. 12 The compare between theory value and the tested value of the 320th array

把倾斜面调整若干个高度,每次都随机抽取若干列和若干行进行数据比较,我们发现,处于镜头参考平面中央的区域,理论高度和实测高度相关无几,偏离中央区域越远,误差越大。经若干次测试抽样统计,在列方向的边缘区域,最大偏离理论值为 $33\text{ }\mu\text{m}$,在行方向,最大偏离理论值是 $37\text{ }\mu\text{m}$ 。因此我们认为此系统测试精度可达到 $40\text{ }\mu\text{m}$ 。

5 实验结果及其分析

利用此测试仪器测量一微小变形板,被测零件的材料为塑料,外形尺寸为 $190\text{ mm} \times 160\text{ mm}$,变形量为 $0 \sim 1.8\text{ mm}$ 。我们使用周期为 $9\text{ }\mu\text{m}$ 的光栅作

为投影栅。

为减小衍射影响,孔栅比经计算设为特定值。测量前,将板被测面喷涂白粉,处理成漫反射面;打开测试仪机箱门,放置被测对象;关闭测试仪机箱门,启动测量程序;自动生成测试结果。测试结果的曲面等高线如图 13 所示。

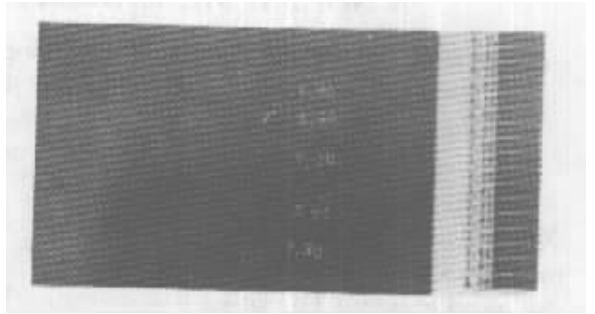


Fig. 13 The test result of a small-deformed plane

青岛元通电器制品有限公司对本仪器的测试结果表明:此测试仪能准确地测量零件的微小变形,测量结果能够直接用计算机处理,快速地为计算机辅助设计和分析提供原始数据,测量精度达到合同技术要求。

结论 从克服传统投影莫阿测试系统结构难以达到均匀光照、机械结构相移速度慢且重复精度低等缺点出发,基于投影莫阿原理设计出一种新的三维形貌测试系统。该系统具有如下特点:垂直投影双电荷耦合器 (CCD) 倾斜成像机构(提高了光场的均匀性和可测物范围)、快速变光源相移(全场测量: $4\text{ s} \sim 8\text{ s}$)、相移精度高(可达到 2% 左右)、测量面积大(最大可为 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$)、实际实验中系统测量的精度达到 $40\text{ }\mu\text{m}$ 。

参 考 文 献

- [1] Lenung K M, Wabg W N. Deformation measurement of surface mount assembly under power cycling using optical interferometry. *Proc. SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 1996, **2888**(6-7) 2~4
- [2] 赵宏, 陈文艺, 谭玉山. 一种新的相位测量轮廓术. *光学学报*, 1995, **15**(5) 897~901
- [3] 郝栋, 赵洋, 李达成. 光学投影式三维轮廓测量技术综述. *光学技术*, 1998, **24**(5) 57~60
- [4] Pirodda L. Shadow and projection Moiré techniques for absolute or relative mapping of surface shapes. *Opt. Engng.*, 1982, **21**(4) 640~649
- [5] Zwemer D, Hassel P, Mazeika W et al.. Moiré measurements. *Aufbereitungs-Technik/Mineral Proc.*, 1997, **38**(4) 42~46
- [6] Han B, Guo Yifan, Choi H C. Out-of-plane displacement of printed circuit board by shadow Moiré with variable

- sensitivity. *American Society of Mechanical Engineers , EEP* ,1993 ,4(1) :179~185
- [7] 梁晓萍 苏显渝. 位相测量轮廓术的仿真研究 :系统结构参数的影响. *光电工程* ,1998 ,25(5) :53~60
- [8] Andresen K , Klassen D. Phase shift method applied to cross grating Moiré measurement. *Optics and Laser in Engineering* ,1986/1987 7(1) :101~114

A New 3-D Measurement System Based on Projection Moiré

Wang Xueli¹⁾ Zhao Hong¹⁾ Li Genqian²⁾ Tan Yushan¹⁾

(1) , *Research Institute of Laser and Infrared Applications , Xi'an Jiaotong University , Xi'an 710049*)
 (2) , *College of Navigation , Northwestern Polytechnical University , Xi'an 710072*)

(Received 24 April 2000 ; revised 21 August 2000)

Abstract : A new structure to 3-D measurement is developed based on projection Moiré. The method of changing lights is used instead of using mechanical structure for phase shift. It improves the speed greatly (The speed is 4 s~8 s). Two CCD are used to eliminate the reflection and the structure of vertical projecting and incline imaging are used to get the better light field. The system can measure big area (300 mm×300 mm). The precision of system is 40 μm. Experiment shows that the method is effective and satisfying.

Key words : projection Moiré ; 3-D inspection ; changing light ; phase shift