

基于双声光偏转器的变频三维数字成像*

张 鹏¹ 彭 翔^{1,2} 邱文杰¹ 韦林彬¹ 田劲东² 李恩邦¹ 张大卫³

(1 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

(2 深圳大学光电子学研究所, 教育部光电子器件与系统重点实验室, 深圳 518060)

(3 天津大学机械工程学院, 天津 300072)

摘 要 提出了一种基于双声光偏转器的时序变频三维数字成像系统. 此系统可以实时产生并投射具有不同空间频率的条纹结构光序列照明被测物体, 可以以视频速率完成任意形状物体的三维传感. 整体系统采用全固态结构, 无任何机械运动部件, 具有高精度、全场测量、动态可编程、普适性好等特点. 给出了该三维数字成像系统对一个台阶状物体形貌测量的应用实例. 结果证明 DAOP 对于解决具有复杂几何形状或拓扑结构物体的三维形貌测量问题是一种有效技术.

关键词 三维形貌测量; 声光偏转器; 直接数字频率合成器; 多分辨率

中图分类号 TN863 **文献标识码** A

0 引言

物体表面的三维传感是三维数字成像及造型的核心之一^[1~5]. 在这一研究领域, 国际上提出了许多新的硬件装置以解决具有复杂几何形状或拓扑结构物体的三维形貌测量问题^[6,7]. 近来, 美国麻省理工学院林肯实验室的研究人员报道了基于声光调制原理的三维成像系统 AO-AFI^[8] (Acousto optic accordion fringe interferometry). AO-AFI 系统能够以视频速率完成任意形状物体的三维传感, 且无任何机械运动部件. 但该系统需要在较高的频率下对激光光源进行振幅调制从而对某一空间相位冻结行波条纹, 实现起来复杂度较高.

本文提出了一种基于双声光偏转器的时序变频三维数字成像系统 (DAOP-dual acousto-optic profilometry), 使得 AO-AFI 系统可以实现的功能大为简化. 实验结果证明 DAOP 对于解决具有复杂几何形状或拓扑结构物体的三维形貌测量问题是一种有效技术.

1 布喇格衍射与声光偏转

DAOP 系统的核心部件是两个声光偏转器 AOD (Acousto-optic deflector). 声光偏转器的基本原理是体光栅的布喇格衍射效应^[9], 如图 1. 其中 θ_i 为入射角, θ_d 为衍射角, λ_s 为声波波长. 当光束的

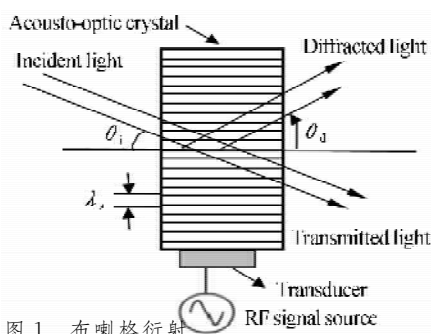


图 1 布喇格衍射
Fig. 1 Normal Bragg diffraction geometry

入射角 $\theta_i = \theta_B$ (其中 θ_B 为布喇格角, $\sin \theta_B = \frac{\lambda_0}{2n\lambda_s}$) 时, 将发生布喇格衍射, 根据布喇格衍射原理可计算出衍射角

$$\sin \theta_d = \sin \theta_B = \frac{\lambda_0}{2n\nu_s} f_s \quad (1)$$

式中 λ_0 为入射光在真空中的波长, n 为介质的折射率, f_s 为声波频率, ν_s 为声波在晶体中的传播速率. 从式(1)可以看出: 通过改变声波频率 (即改变射频驱动信号的频率) 可以使衍射角的大小发生变化, 从而改变光束的出射方向.

2 双声光偏转照明发射器

如图 2, 连续激光束经过分束器以后, 被分成两束等强度、平行且相干的光束. 两平行光分别进入左、右声光偏转器, 在声光偏转器上加上一定频率的超声波, 在声光相互作用下, 发生衍射. 两衍射光束将以一小角度离开声光偏转器, 该角度正比于声光偏转器射频驱动信号的频率. 利用两个声光偏转器的一级衍射光相干涉可以获得干涉条纹. 装置中的光楔用来对光束方向进行微调. 两束一级衍射光经过合束器, 分开比较大的两束光被压缩, 利于装置

* 国家自然科学基金资助项目 (60275012, 60472107)、广东省自然科学基金资助项目 (031804)、深圳市科技三项费用 (200341) 资助课题、教育部 985 资助项目
Tel: 022-87401745 Email: pengzhang@tju.edu.cn
收稿日期: 2005-04-01

的小型化. 短焦透镜将经过合束后的两束激光相交干涉, 干涉场在其右焦点附近. 最后利用显微物镜将条纹进行放大, 投射到被测物表面上. 通过计算机控制两个声光偏转器的射频驱动信号频率可以时序改变两 AOD 的一级衍射光的衍射角度, 从而可以产生不同空间频率的条纹结构光序列. 由于本系统中射频信号的变化可在几十个纳秒内完成, 故最终产生的时序变频条纹图照明可以大大高于视频速率(每帧约 40 ms).

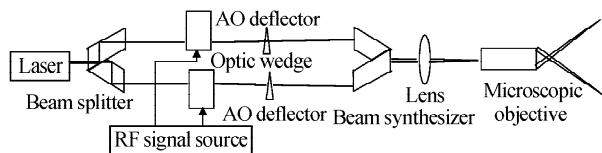


图 2 基于双声光偏转的结构光照明发射器原理
Fig. 2 Schematic diagram of dual-AODs based fringe projector

3 基于双声光偏转器的时序变频三维数字成像系统

图 3 为基于双声光偏转器的时序变频三维数字成像系统原理图, 主要由声光投影系统和成像系统两部分组成. 声光投影系统和成像系统中心距离为 $d = 160 \text{ mm}$, 参考平面到成像系统中心的距离为 $l = 1200 \text{ mm}$, 有效视场宽度为 $l_0 = 150 \text{ mm}$.

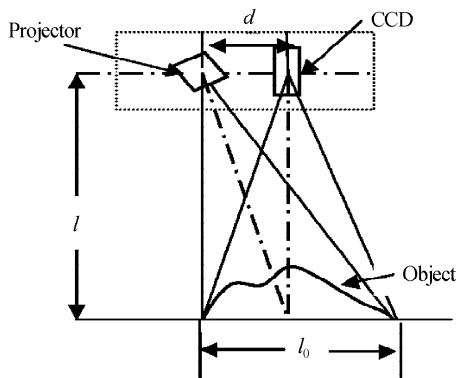


图 3 基于双声光偏转器的时序变频三维数字成像系统
Fig. 3 Dual-AODs based optical profilometer

3.1 声光投影系统

声光投影系统的原理如图 2. 该系统主要由相干光源、光束分束器、双声光偏转器、直接数字频率合成器 DDS(Direct Digital Synthesizer)、射频放大器、光楔、合束器、聚焦透镜和显微物镜等部分组成. 光源采用 SUNTTECH G-SLM-020 单模激光器, 波长 532 nm , 输出功率 21 mW . 声光偏转器采用法国 A. A 公司的 DTS. X-250, 晶体材料为 TeO_2 , 工作中心光波波长 532 nm , 中心频率 82 MHz , 带宽 $\pm 25 \text{ MHz}$. 聚焦透镜的焦距为 10 mm . 显微物镜的放大倍率为 40 倍. 该声光投影系统可以实时产

生并投射不同空间频率的条纹结构光序列.

3.2 成像系统

成像系统由 CCD 摄像机、成像镜头、图像采集卡、PC 机组成. 其中 CCD 摄像机采用德国 BASLER 公司的 A302b 面阵数字 CCD 摄像机, 并配置 $25 \text{ mm}(f/1.4)$ 的镜头. 图像采集卡采用加拿大 Matrox 公司的 Meteor-II/Digital 图像卡, 采样速率 40 MHz , 水平及垂直双方向可从 2 至 16 倍抽样采集.

3.3 基于 DDS 技术的动态可编程射频驱动源

基于先进的直接数字频率合成技术, 设计了一种高精度动态射频驱动源. 该驱动源具有频率转换时间短、分辨率高、全数字化等特点, 并具有长期稳定性和高速可编程能力. 与锁相环技术不同, 直接数字频率合成技术是一种新颖的全数字频率合成技术. 通过编程改变相位累加器的频率控制字 FCW(Frequency Control Word), 可以确定输出信号的频率值.

图 4 为基于 DDS 技术的动态可编程射频驱动源原理图. 驱动源由 DDS、双射频放大器、射频信号分配器、通讯接口电路等组成. 其中直接数字频率合成器采用 A. A 公司的 DDS 模块, 可接受 15 bit 的频率控制字输入, 频率范围 $57 \text{ MHz} \sim 107 \text{ MHz}$, 最小频率步长约为 15 kHz , 频率建立时间小于 40 ns . 射频放大器采用 AA. AMP. B7, 带宽为 $40 \text{ MHz} \sim 500 \text{ MHz}$, 精心调节射频放大器的增益, 使得输出射频信号的功率至 600 mW , 从而使得声光偏转器的衍射效率达到最优($\geq 70\%$). 通过在 PC 机平台上编制控制软件, 可以灵活地改变 DDS 的频率控制字, 从而确定驱动源输出射频信号的频率值.

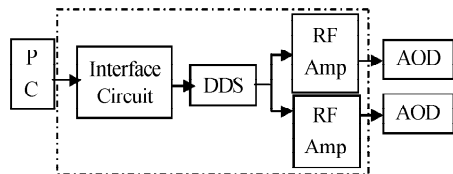


图 4 基于 DDS 技术的动态可编程射频驱动源
Fig. 4 Block diagram of DDS based dynamic programmable RF driver

4 实验过程和数据处理结果

为了验证本系统适用于各种不同类型的物体, 曾对大量具有不同几何形状和拓扑结构的物体进行了实验. 本文介绍一个“台阶状”物体的实验过程及结果. 首先, 通过在 PC 机平台上编制的控制软件向射频驱动源的通讯端口写入不同的控制字以便获得不同频率的射频信号, 从而能向被测物投射具有不同空间频率的条纹结构光序列. 图 5(a)~(c)是

相应产生的编码条纹图,其中条纹个数分别为 25, 47 和 95. 编码条纹图可实时由 CCD 摄像机摄取并传递至计算机进行下一步的数据处理. 图 5(d)~

(f)是相应的折叠相位图,运用“改进的时间相位展开算法”,可实现三维数字像的多分辨重构^[10],获得最终展开相位图,图 6 为其三维视图.

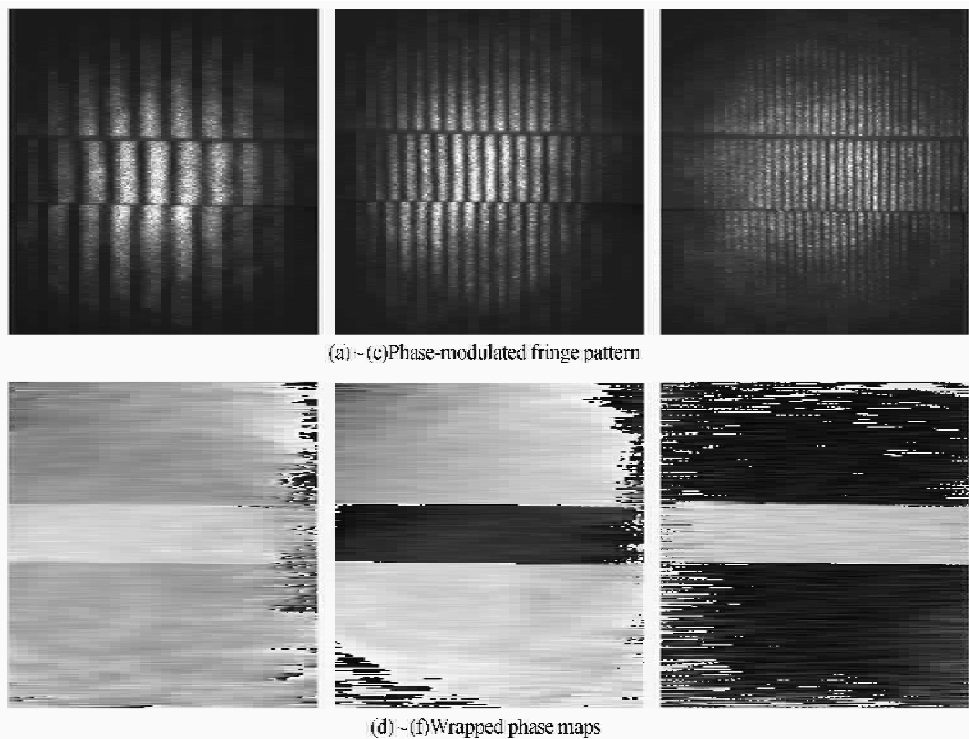


图 5 台阶状物体的实验结果

Fig. 5 Experiment results for step-like object

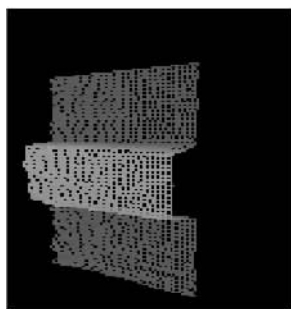


图 6 重构的台阶状物体的三维视图

Fig. 6 3-D plot of reconstructed test surface with step-like discontinuities

5 结论

本文提出了一种基于双声光偏转器的时序变频三维数字成像系统,该系统具有以下特点:1)采用全固态结构,无任何机械运动,稳定性和重复性很好. 2)实时性好,可完成任意形状物体的快速三维传感. 3)照明发射器采用“等光程”对称结构,可补偿空气扰动影响. 4)具备高速动态可编程能力,结构光序列的空间频率可灵活的现场更改、配置,普适性好.

参考文献

1 Chen F, Brown G M, Song M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods. *Opt Eng*, 2000, **29**(1): 10~22

2 彭翔,杨昭亮,牛憨笨. 时间维相位重建的改进算法. 光子学报, 2004, **33**(11): 880~883
Peng X, Yang Z L, Niu H B. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11): 880~883

3 翁嘉文,钟金钢. 加窗傅里叶变换在三维形貌测量中的应用. 光子学报, 2003, **32**(8): 993~996
Weng J W, Zhong J G. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8): 993~996

4 王冬梅,方如华,张修银. 载波相移云纹干涉法研究. 光子学报, 2001, **30**(11): 1376~1380
Wang D M, Fang R H, Zhang X Y. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(11): 1376~1380

5 赵焕东,李志能,陆建刚. 凯泽—贝塞耳窗在傅里叶变换轮廓技术中的应用. 光子学报, 2001, **30**(8): 1028~1032
Zhao H D, Li Z N, Lu J G. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(8): 1028~1032

6 Saldner H, Huntley J M. Profilometry by temporal phase unwrapping and spatial light modulator based projector. *Opt Eng*, 1997, **36**(2): 610~615

7 Huang P S, Hu Q, Jin F, et al. Color-encoded digital fringe projection technique for high-speed 3-D surface contouring. *Opt Eng*, 1999, **38**(6): 1065~1071

8 Mermeistein M S, Feldkhum D L, Shirley L G. Video-rate surface profiling with acousto-optic accordion fringe

- interferometry. *Opt Eng*, 2000, **39**(1): 106~113
- 9 Saleh B E, Teich M C. Fundamentals of Photonics. New York: John Wiley & Sons, 1991. 799~831
- 10 Peng X, Yang Z L, Niu H B. Multi-resolution reconstruction of 3-D image with modified temporal unwrapping algorithm. *Opt Commun*, 2003, **224**(1-3): 35~44

Frequency-varying 3-D Digital Imaging Based on Dual Acousto-optic Deflectors

Zhang Peng¹, Peng Xiang^{1,2}, Qiu Wenjie¹, Wei Linbin¹, Tian Jindong², Li Enbang¹, Zhang Dawei³

¹ National Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrumentation, Tianjin University, Tianjin 300072

² Institute of Optoelectronics, Shenzhen University, Key Laboratory of Optoelectronics Devices and Systems of Education Ministry, Shenzhen 518060

³ College of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072

Received date: 2005-04-01

Abstract A three-dimensional profilometry based on a dual-acousto-optic fringe projection is presented. The fringe projector is able to generate a time-series, frequency-varying fringe patterns by using the acousto-optic interaction effect. The system is qualified for video-rate 3-D profilometry of arbitrary shape objects. The AO technique for producing interference patterns provides significant benefits, such as high precision, full field and dynamic programmable ability. Experimental results of a step-like surface are also carried out to demonstrate the effectiveness of our approach.

Keywords Three-dimensional shape measurement; Acousto-optic deflector; Direct digital synthesizer; Multi-resolution



Zhang Peng was born in May 1979. He is currently working toward the Ph. D. degree at the College of Precision Instrumentation and Optoelectronics Engineering, Tianjin University. His research interests include digital signal processing, 3D imaging and modeling, optical and laser metrology, and optical information security.