

文章编号 : 0253-2239(2001)12-1506-03

动态液面面形测量*

张启灿 苏显渝

(四川大学光电科学技术系 , 成都 610064)

摘要 : 将傅里叶变换轮廓术(FTP)运用到动态液体面形测量 , 采用 CCD 快速获取由龙基(Ronchi)光栅投影到处于动态变化过程的液体表面上的一系列变形条纹 , 经过傅里叶变换、频谱滤波、逆傅里叶变换、三维相位展开等处理后得到重建的一系列液面面形 , 能再现动态液面的变化过程 , 也能获取液体旋涡的一些特征参数 , 为流体力学相关研究提供了一种新的方法。

关键词 : 傅里叶变换轮廓术 ; 动态面形 ; 液面

中图分类号 : TN206 文献标识码 : A

液面面形测量在液体表面现象、流体力学等相关研究中具有重要意义^[1]。三维面形测量中的光学测量方法 , 其优点是非接触、测量速度快和精度高 , 易于实行自动化测量 , 已被广泛用于机器视觉、实物仿形、工业制造与检测、生物医学等领域。傅里叶变换轮廓术^[2-6]是其中应用较为广泛的一种方法 , 它与相位测量轮廓术(PMP)^[7,8]相比具有只需采样一帧变形条纹 , 测量速度快的优点 , 易于处理动态过程。基于此 , 本文研究了傅里叶变换轮廓术用于动态液体表面测量的原理、数据获取和处理的方法。旨在拓宽傅里叶变换轮廓术的应用领域 , 期望给流体力学的研究提供一种新的方法和强有力的手段。

1 理论基础

傅里叶变换轮廓术处理静止物体时 , 高度 h 只是 x, y 的二维函数 , 只需要考虑 x, y 方向上的相位获得和展开 , 运用到处理动态过程时 , 高度 h 是 x, y, t 的三维函数 :

$$h(x, y, t) = \frac{l_0 \Delta\phi(x, y, t)}{\Delta\phi(x, y, t) - 2\pi f_0 d} \approx - \frac{l_0 \Delta\phi(x, y, t)}{2\pi f_0 d}, \quad (1)$$

式中 l_0, d 分别代表成像系统与参考平面、成像系统与投影系统之间的距离 , f_0 为光栅像的空间基频 ($f_0 = 1/p_0, p_0$ 为光栅像的空间周期) , 而增加的 t 方向 , 恰好又给相位的获得和展开带来了新的途径

和方便 , 使得三维相位场的展开路径不再局限于 x, y 两个方向 , 增加了对不连续点展开的可靠性和自由度。三维相位场的获得可以直接计算每个 t 时刻的变形条纹相对于参考平面的相位差 $\Delta\phi(x, y, t)$; 也可以依次求出相邻的两帧变形条纹之间的帧间相位差 $\Delta\phi_i(x, y)$, 再将每个 t 时刻以前所有的帧间相位差相加而得到 t 时刻变形条纹相对于参考平面的相位差 :

$$\sum_{i=1}^t \Delta\phi_i(x, y) = \Delta\phi(x, y, t). \quad (2)$$

已经研究了多种复杂相位场展开的方法^[9-12]。常用的三维相位展开方法有 :

1) 简单的直接展开法 : 首先对一帧物体变化不大的相位图沿行方向独立地行扫描展开 , 在此基础上又逐列展开 , 消除各行间的不连续值 , 得到该帧的正确相位分布。最后依照这帧上各点的正确相位值沿 t 方向上展开 , 最终获得一个连续的三维相位场。这种方法简单、快速 , 但无法展开复杂的相位场。

2) 基于相位差的三维相位展开法 : 用快速摄像的方式获得动态过程的变形条纹 , 只要拍摄的帧速足够快 , 在 t 方向上的时间间隔 Δt 很小 , 两帧之间的相位差远小于 π , 便可采用这种方法。首先展开一帧物体变化不大的相位图得到 $\phi_{uw1}(x, y, 1)$, 再直接加上 $\Delta\phi_i(x, y)$ 便能获得连续三维相位场 :

$$\phi_{uwk}(x, y, k) = \phi_{uw1}(x, y, 1) + \sum_{i=1}^k \Delta\phi_i(x, y), \quad (3)$$

式中 ϕ_{uwk} 代表展开后 k 时刻的相位分布。

* 国家自然科学基金(69827001)资助课题。

2 实验结果和讨论

用液体广告颜料作了实物实验。将液体置于搅拌杯中,采用电磁搅拌仪使液体在杯内旋转,形成液体旋涡,CCD 选用 TM-560 型,摄像镜头焦距为 12 mm。计算机的内存为 16 Mb,投影系统出瞳到成像系统入瞳的距离为 890 mm,成像系统出瞳到液面的距离为 290 mm,光栅的周期为 3 l/mm,采样范围为 320×240 像素,快速摄像时,CCD 摄像机所采集到的数据经专用图像板后暂存于计算机的扩展内存,采集完毕后,转存到硬盘。搅拌仪先不通电让液面处于静止状态拍下参考平面,然后在通电的同时开始拍摄颜料液体表面从静止到转动相对稳定的动态过程。一共拍摄了 10.4 s,共获得 205 帧动态图像,图 1 为其中的一帧,图中虚线框标明了本实验的处理区域 ($128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$)。



Fig.1 The liquid vortex for measurement (the area inside the dashed frame is to be reconstructed)

研究了液体从静止到旋转相对稳定的动态过程。由于液面存在反光问题,一旦反射光强到足以淹没条纹的程度,会使条纹产生截断,引起相位信息的误差,最终无法获得正确的高度分布。

在实验中,分别在投影系统的出瞳后和成像系统的入瞳前各加了一个偏振片,调节二者的透振方向尽可能地减小镜面反射,但旋转形成的旋涡所产生的曲面反射只能减小而无法最终避免。尽管如此,我们仍然在保证条纹未被截断的条件下获得了很好的实验结果。

在对频谱滤波时,考虑到液体旋涡在旋转的同时有可能会漂移。为了避免滤波不准导致的相位错误,我们采用半自动的二维汉宁窗滤波,先在基频可能出现的位置左右一定范围内自动搜寻基频峰值坐标,再以该坐标位置为中心向两旁延伸滤出一个滤波长度的频谱带,进行逆傅里叶变换以获取相位场(滤波长度取略大于参考平面上的光栅像周期的奇数 $\text{int}[(p+1)/2] \times 2 + 1$ 时,实验的结果最好)。这样不仅取出了基频中的高度信息,也滤掉了部分二维分布噪声,使相位分布更平滑,易于正确地展开。

图 2 是重建的旋涡在第 1、56、64、72、80、96 帧(对应时刻分别为第 0.05 s、2.84 s、3.25 s、3.65 s、4.06 s、4.87 s、

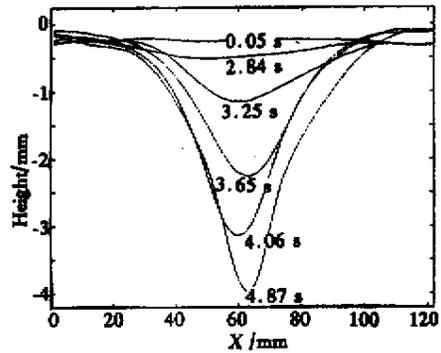


Fig.2 The profile chart of restored liquid vortex (the mark beside each curve is time)

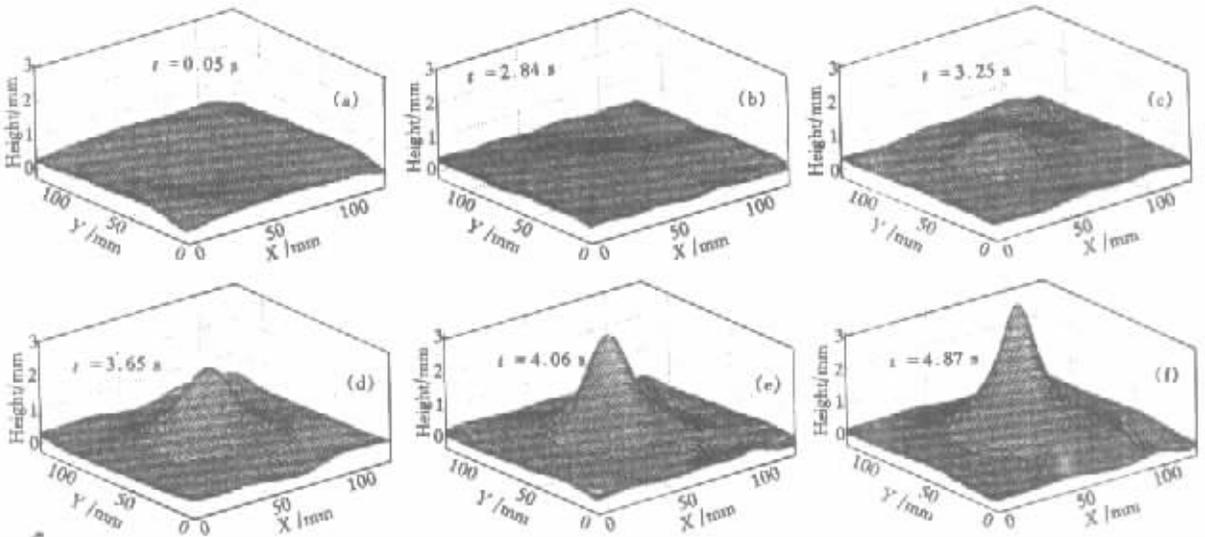


Fig.3 The restored surface of liquid vortex (drawing - h for convenient observing)

4.06 s、4.87 s)时的剖面图。图 3 是图 2 中相应帧的重建三维网格图,为了方便观察,将旋涡反转,在图中画的是 $-h$,由图示可以很明显地看出旋涡从出现到加深的整个过程。

以上对液体表面从静止到稳定旋转的动态过程实验研究结果表明:

1) 将三维面形测量中的傅里叶变换轮廓术方法应用到流体力学的研究领域,能正确恢复液体面形及其动态变化过程,也可以在校正相位与高度的对应关系后获取液体表面形态的一系列特征参数(如旋涡的漂移轨迹、半宽以及深度等),为进一步研究打下基础。可望在对液体流动、涡环、涡对、尾迹以及诸如卡门涡街等现象的研究中发挥作用。

2) 传统的傅里叶变换轮廓术方法需要投影系统光轴与成像系统光轴在一个平面内。在液体实验中,如果两光轴在一个平面内,CCD 将接收到更多的镜面反射光。在本文实际实验过程中,我们只保证两系统光心连线与液面平行,而不将两光轴置于同一平面,这样一来,相位和高度对应关系不再是简单的线性关系,而变得较为复杂。有关正确的相位和高度对应关系将另文讨论。

参 考 文 献

[1] Gharib M, Weigand A. Experimental studies of vortex disconnection and connection at a free surface. *J. Fluid Mech.*, 1996, **321**: 59 ~ 86

- [2] Takeda M, Motoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24): 3977 ~ 3982
- [3] Su Xianyu, Li Jian, Guo Lirong. An improved Fourier transform profilometry. *Proc. SPIE*, 1990, **954**: 32 ~ 35
- [4] Lin Jinfeng, Su Xianyu. Two-dimensional Fourier transform profilometry for the automatic measurement of three-dimensional object shapes. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(11): 3297 ~ 3302
- [5] 苏显渝,谭松新,向立群等. 基于傅里叶变换轮廓术方法的复杂物体三维面形测量. *光学学报*, 1998, **18**(9): 1228 ~ 1234
- [6] 吴春才,苏显渝. 动态过程的三维面形测量. *光电子·激光*, 1996, **7**(5): 273 ~ 278
- [7] Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase measuring profilometry of 3-D diffuse object. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(18): 3105 ~ 3108
- [8] Su Xianyu, Zhou Wensen, Bally C. Automated phase-measuring profilometry using defocused projection of a Ronchi grating. *Opt. Commun.*, 1992, **94**(6): 561 ~ 573
- [9] Judge T R, Bryyanston-Cross P J. A review of phase unwrapping techniques in fringe analysis. *Opt. & Lasers in Engng.*, 1994, **21**(4): 199 ~ 239
- [10] Su Xianyu, Bally G, Vukicevic. Phase-stepping grating profilometry: Utilization of intensity modulation analysis in complex objects evaluation. *Opt. Commun.*, 1993, **98**(1): 141 ~ 150
- [11] Su Xianyu. Phase unwrapping techniques for 3-D shape measurement. *Proc. SPIE*, 1996, **2866**: 460 ~ 465
- [12] Li Jieli, Su Xianyu, Li Jitao Li. Phase Unwrapping algorithm-based on reliability and edge-detection. *Opt. Engng.*, 1997, **36**(6): 1685 ~ 1690

Dynamic Liquid Surface Shape Measurement

Zhang Qican Su Xianyu

(*Opto-Electronics Department, Sichuan University, Chengdu 610064*)

(Received 21 July 2000; revised 11 December 2000)

Abstract: Fourier transform profilometry (FTP) is used for dynamic liquid surface shape measurement. A sequence of dynamic deformed fringe images can be grabbed by CCD camera and saved on disk rapidly. By Fourier transform, filtering, inverse Fourier transform and unwrapping these phase maps in 3-D phase space, the shape of a vortex at different times is obtained. The experimental results show that FTP can efficiently deal with the dynamic liquid surface shape measurement.

Key words: Fourier transform profilometry; dynamic shape; liquid surface