

液面三维面型测量技术综述

周文俊¹, 冯诗愚¹, 李超越², 彭浩³, 潘俊⁴

(1. 南京航空航天大学 航空学院

飞行器环境控制与生命保障工业和信息化部重点实验室, 南京 210016;

2. 金陵科技学院 机电工程学院, 南京 211169;

3. 上海海事大学 航运仿真技术教育部工程研究中心, 上海 201306;

4. 中国航空工业集团有限公司 金城南京机电液压工程研究中心

航空机电系统综合航空科技重点实验室, 南京 211106)

摘 要: 综述了目前被用于液体液面三维重建的光学测量方法, 目的是将光学三维测量方法用于飞机燃油箱中来测量油箱油位和燃油晃动时液面的三维形态。主要介绍了立体视觉匹配法、条纹分析法和条纹放置法的基本原理, 简述了 3 种方法在测量液面面型的应用场景和发展现状, 分析了 3 种方法在不同场景使用时的优劣。总结和归纳了液面面型测量技术目前面临的挑战, 包括了对透明液体液面三维面型测量研究相对较少、传统三维测量方法无法直接使用、求解速度是否能达到实时动态测量, 表明了光学三维测量技术应用于飞机燃油箱油位测量和油面检测将朝着更加快速、精确和智能的方向发展。

关 键 词: 油位测量; 燃油量测量; 光学测量; 结构光; 液面三维(3D)重建

中图分类号: V228.1; TP391

文献标志码: A

Summary of three-dimensional measurement technology of liquid surface

ZHOU Wenjun¹, FENG Shiyu¹, LI Chaoyue², PENG Hao³, PAN Jun⁴

(1. Key Laboratory of Aircraft Environment Control and Life Support of Ministry of Industry and Information Technology, College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering,

Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China;

3. Engineering Research Center of Ministry of Education of Shipping Simulation Technology, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

4. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Aero Electromechanical System Integration, Jincheng Nanjing Engineering Institute of Aircraft System, Aviation Industry Corporation of China Limited, Nanjing 211106, China)

收稿日期: 2021-03-02

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国民用航空局民航联合研究基金(U1933121); 中央高校基本科研业务费专项资金; 江苏高校优势学科建设工程; 金陵科技学院高层次人才科研启动基金(jit-b-202044); 南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfj20200110)

作者简介: 周文俊(1997—), 男, 硕士生, 主要研究方向为飞机燃油系统燃油惰化、油量测量等。

通信作者: 冯诗愚(1974—), 副教授, 博士, 主要从事飞机燃油箱惰化、机载制冷、燃油结冰和膜蒸馏技术等方面的研究。

E-mail: shiyuf@nuaa.edu.cn

引用格式: 周文俊, 冯诗愚, 李超越, 等. 液面三维面型测量技术综述[J]. 航空动力学报, 2022, 37(2): 375-382. ZHOU Wenjun, FENG Shiyu, LI Chaoyue, et al. Summary of three-dimensional measurement technology of liquid surface[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(2): 375-382.

Abstract: The optical measurement methods used in the three-dimensional reconstruction of liquid level was summarized to use the optical three-dimensional measurement method in the aircraft fuel tank to measure the three-dimensional shape of the liquid level when the fuel tank and fuel sloshed. The basic principles of stereo vision matching method, fringe analysis method, and fringe placement method were mainly introduced, the application scenarios and development status of the three methods in measuring the liquid surface were briefly described, and the advantages and disadvantages of the three methods in different scenes were analyzed. The challenges of liquid surface measurement technology were also summarized, including the relative lack of research on transparent liquid three-dimensional surface measurement, the fact that traditional three-dimensional measurement method can not be used directly, and whether the solution speed can achieve real-time dynamic measurement. It shows that the application of optical 3D measurement technology to aircraft fuel tank level measurement and oil level detection will develop towards a faster, more accurate and intelligent direction.

Key words: oil level measurement; fuel quantity measurement; optical measurement; structured light; three-dimensional (3D) reconstruction of the liquid surface

飞机燃油系统需在机动过程中连续平稳地为发动机输送燃油,同时还需准确提供燃油余量信息,因此油位测量具有举足轻重的作用。据统计,测量精度每提高 1%,承载质量可增加 200 kg,精准的燃油测量可减少运营成本。同时,大量燃油在机动过程中产生的晃动也会对油箱产生冲击力从而影响飞机稳定性和可操控性。此外,燃油在油箱中晃动也容易产生液滴和喷雾,造成油箱可燃性增加,危害飞机安全^[1-2]。

目前常使用传感器方法来进行油箱油位的测量。测量方法有电容式传感器测量、光纤式传感器测量、超声波传感器测量和线性传感器结合插值技术等^[3]。但飞机油箱的形状常常是不规则的,而且在机动过程中,油箱内燃油会发生晃动,导致液面也变得不规则,此时使用传感器来测量燃油余量导致误差极大增加。

引入光学测量方法来监测燃油余量和油面的波动情况,相比于传统的使用传感器的方法,不仅精度更高,还能同时利用油面三维情况的实时观测来进行力学分析。黄文峰和于海玉等使用了非接触式光学测量技术结合 CAD(计算机辅助设计)技术来对容器内液位高度进行测量的方法,从而求解燃油余量^[4]。李征鸿和刘麒等则是先通过实验得到油高-体积曲线并在容器内部标记特征点,再在实际情况中采用视觉技术识别特征点与特征曲线进行匹配来得到相应油位,从而获得燃油余量^[5]。

液面三维测量是指使用某种技术方法测量出

自由液体表面的三维形状,其在流体力学等相关研究中已经凸显出重要作用^[6]。在航空航天领域,分析油面三维面型结合油箱的特征信息可以更加精准地测量余油量,也可用于研究油箱中能量和动量的传递过程,以及可视化地观察燃油晃动对油箱可燃性的影响。

本文在介绍液面面型测量的基础上,给出了几种未来可能用于燃油油量测量的三维面型测量技术,并分析了这些技术的优缺点。

1 液面面形测量方法和国内外研究现状

1.1 光学三维测量技术简介

光学三维测量具有非接触、速度快、精度高等特点,在工业、制造业、加工业等方面得到广泛的应用,具有良好的发展前景和研究意义^[7]。常用的光学三维测量方法大致可以分为结构光测量法和非结构光测量法两大类。

非结构光测量是直接利用待测物体的二维图像来还原物体三维特征的技术。其中较为典型的有立体视觉匹配三维测量技术。该技术依据视差原理,然后根据图像中的唯一性约束、连续性约束、极线约束、顺序一致性约束等几何约束找到现实中某点在两幅或多幅图像中的位置并记录其像素坐标系,然后以此来计算该点在现实中的三维坐标,例如双目视觉技术^[8]等。

结构光测量则是利用辅助的结构光照明设备配合相机来获取物体三维信息。该方法一般包括

两部分:一部分是投影系统,即将特定编码光线投射到待测物体表面,常用的有条纹光栅投影、网格投影和散斑投影等;另一部分则是图像采集系统,一般使用相机将接受投影后物体的图像采集起来,利用采集到的图像相关特征来反解求出物体的三维信息。结构光三维测量技术从早期的叠栅轮廓术^[9]慢慢发展到傅里叶轮廓术^[10-14]、相位测量轮廓术^[15-17]、散斑投影轮廓术^[18-19]、数字条纹投影术^[20-21]等。结构光技术在三维重建上已经得到广泛应用。

1.2 液面面形光学测量发展现状

现有的光学三维测量技术相对成熟,已广泛应用于固体物件或地形地貌测量。但由于液体表面相对复杂,对于液体表面量尤其是光学性质复杂的透明液体表面面型测量的研究还相对较少^[22-23]。目前较为常见的有以下一些方法:

- 1) 在测量小体积透明液体时加入染色物质使其不透明,然后采用普通结构光三维重建方法进行液面面型测量^[24-25]。
- 2) 通过不同手段在获取所拍液面的特征进行匹配,然后直接使用多目视觉技术进行测量^[26]。
- 3) 在透明液体底部布置特征信息,在所获得的照片中寻找液面和特征变形之间的数学关系来进行求解^[27-28]。

Kurata 等在小水槽底部布置特征信息,在水槽正上方布置单目相机来求解流经水槽的液体液面形状^[27]。Xin 等在液体底部布置彩色编码特征和透镜,在待测液面正上方使用相机采集液面图像,液面各点斜率不同在成像中会表现出不同颜色,通过此规律求解液面各点的梯度信息从而,可以计算出液面形状^[29]。渡边省吾等使用双目立体视觉原理,使用两台红外相机拍摄液体表面,利用其表面热辐射差异来匹配特征点进行液面重构^[30]。赵玉臣等使用在容器底部布置条纹栅格的方法,通过确定液面高度和条纹变形量的几何关系来求解液面面形^[31]。Suliman 等在液面上投射彩色编码条纹,通过不同斜率反射到成像中的颜色不同来求解液面面型^[32]。Morris 等采用双目立体视觉原理,在液体底部布置特征信息,利用液面各点法向量唯一和双目特征点匹配约束列出方程组,最后可以求解出液面三维面型^[28]。Ding 等则是在 Morris 等的基础上使用照相机阵列,可以在求解过程中有效防止由于折射畸变而有相机丢失特征信息的情况,使求解结果更加准确^[33]。

Qian 等则使用照相机阵列同时重建了放置于液体底部物体的三维形状和液面面型^[34]。

对于不透明液体,处理方法则类似于测量固体物。Grant 等早在 1990 年就使用摩尔条纹投影法对海面面形进行求解^[35]。Zhang 等使用傅里叶变换轮廓术,在不透明液体上投影正弦条纹,然后求解出液面三维模型^[36]。Zhang 等、Wang 等和 Hu 等分别使用栅格投影法和数字条纹投影法求解出小型不透明水滴的三维形状^[37,20,25],目的是将其应用于研究飞机结冰相关问题。

2 典型液面面形测量方法介绍

先简单介绍理想照相机模型,它是线性模型,遵循针孔成像原理,几何关系如图 1 所示。图中 O_c 是相机的光心, f 是相机焦距, O_cZ_c 是相机的光轴。与成像有关的坐标系一般有 4 个:世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$, 即真实空间中的坐标系; $O_c-X_cY_cZ_c$ 是以相机光心为原点的相机坐标系; $O-xy$ 是相机成像平面坐标系,其原点 O 是相机成像平面的中心也是成像平面与相机光轴的交点; O_u-v 为像素坐标系,此坐标系位于成像平面,以像素为单位,原点 O_u 位于图像的左上角。其中相机坐标系的 $O_cX_cY_c$ 面和成像平面平行且 $X_c=x$, $Y_c=y$ 。

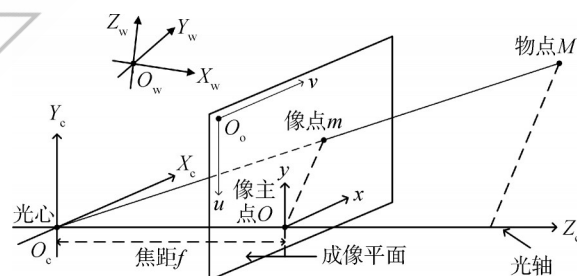


图1 理想针孔模型

Fig.1 Ideal pinhole model

下面介绍 4 种坐标系的转换关系。空间中某点 $M(X_w, Y_w, Z_w)$ 到相机坐标系之间的转换关系可表示如下:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = R_{3 \times 3} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + t_{3 \times 1} \quad (1)$$

式中 $R_{3 \times 3}$ 为正交旋转矩阵, $t_{3 \times 1}$ 为平移矩阵。即相机坐标系与世界坐标系可由旋转和平移进行相互转化。物点 M 通过光心投射到像平面上的坐标为 (x, y) , 则该点在相机坐标系和在平面坐标系上的坐标关系可由相似三角形特点进行求解

$$\begin{cases} x = \frac{f X_c}{Z_c} \\ y = \frac{f Y_c}{Z_c} \end{cases} \quad (2)$$

式中 f 为相机焦距。成像平面坐标系到像素坐标系的关系可表示为

$$\begin{cases} u = \frac{x}{dx} + u_0 \\ v = \frac{y}{dy} + v_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中 dx 和 dy 分别是单个像素在两坐标轴方向上的长度, u_0 和 v_0 是相机成像坐标系原点在像素坐标系中的坐标值。综上所述,空间中某点在理想针孔相机模型下,从世界坐标系到像素坐标系可得到如下关系:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{dx} & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{f}{dy} & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & t_{3 \times 1} \\ 0_{1 \times 3} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

可以简写为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

一般称 M_1 为相机的内参矩阵,反映的是相机本身的性质; M_2 为相机的外参矩阵,体现的是相机与空间中物体的相对位置。利用相机进行三维求解其实质就是找出像素坐标系与世界坐标系的数学关系,从而确定待测物各点的三维坐标。

在实际情况中,相机还会存在畸变等问题,所以在实际求解时还需要考虑畸变对坐标数值和坐标转化关系的影响,这里不再赘述。

2.1 立体视觉匹配法

20世纪70年代Marr提出完整的机器视觉系统计算理论框架,并在后期研究中将其应用于多幅图像匹配技术上,奠定了立体视觉技术发展的理论基础。

立体视觉匹配法求解三维模型的基础是视差原理,这里简单介绍双目立体视觉系统,它直接模拟人类双眼处理景物的方式,其处理过程大致可以划分为:相机标定、特征提取、图像匹配和三维重建。系统的基本几何原理如图2所示。

可看出在空间三维坐标 $O_w-X_wY_wZ_w$ 中 $P(X, Y, Z)$ 是空间中任意一点, $O_{cr}-X_rY_rZ_r$ 和 $O_{cl}-X_lY_lZ_l$ 分别

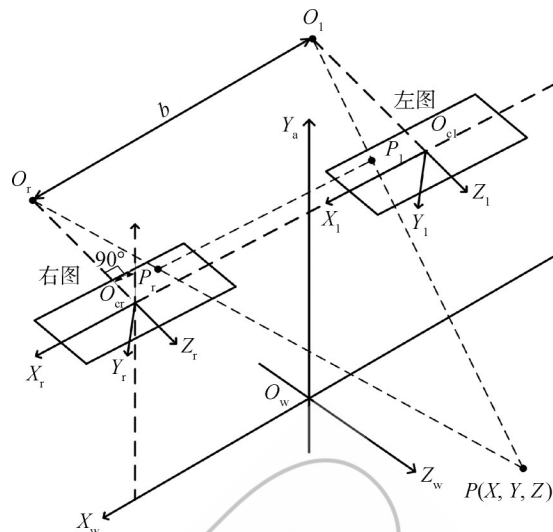


图2 双目视觉原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of binocular vision principle

是右相机和左相机的成像坐标系。 O_r 和 O_l 分别代表右侧相机和左侧相机的光心, O_rZ_r 、 O_lZ_l 分别代表其光轴,且两轴相互平行,两相机光心连线 b 称作基线。在三维空间中的任一点在左右两相机像素平面上的成像位置 P_r 和 P_l 是该点与两相机光心连线与成像平面的交点,所以 P 点的深度信息可以由下式解出:

$$Z = \frac{bf}{d} \quad (6)$$

其中 Z 是物体在实际空间中的深度坐标, b 和 f 在相机标定时可求出^[38]。图3展示了实际的双目视觉系统。



图3 双目视觉系统

Fig.3 Binocular vision system

多视图立体视觉匹配法的关键点就在于对多幅图像上的对应点匹配技术:有基于图像某个区域的灰度、颜色信息作为特征来进行匹配^[39];也有基于全局的立体匹配,通过找出图像中显著的特征点、线,匹配得到初始的视差值,然后使用全局能量函数进行约束,最后再通过匹配算法不断地对分配的视差值迭代优化^[40]。在对透明液体进行

多目视觉测量时,特征匹配是有很难度的,所以不能直接将立体视觉匹配技术直接用于液体液面面型重建中。

有学者将盛有透明液体的容器底部布置一定的特征信息,就可以多目立体视觉匹配技术应用于透明液体液面面型重建^[28]。

2.2 条纹分析法

条纹分析法可分为条纹中心法和条纹相位求解法。在使用条纹分析法时,系统常由标定过照相机和投影仪两部分组成^[41-43],将编码条纹投射到待测物体表面,物体高度的变化会对条纹进行调制,然后采集被调制的条纹进行解调即找出物体深度信息与条纹变化的数学关系,最终就可得到待测物体的三维形状。

条纹中心法是通过提取条纹中心像素在变形前后的位置来求解出该点位移量^[44],其基本原理如图4所示,再根据几何关系求解出该点所对应的物体上点的深度信息^[39]。

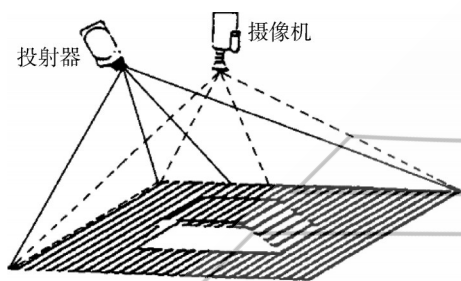


图4 条纹中心法原理示意图

Fig.4 Schematic diagram of the fringe center method

此方法只能离散地求出条纹中心部分点的深度信息,然后利用插值方法近似解出其余点来还原整个物体的三维信息,所以该方法在测量表面形复杂的物体时精度无法保证,所以多用于规则物体的三维测量。

条纹相位求解方法则对待测面上的每个像素点都进行了计算求解,这种方法最重要的是要获取到条纹上的每一个像素点的相位值,然后使用相位展开方法恢复相位的连续分布。常用的有傅里叶变换轮廓术(Fourier transform profilometry, FPT)和条纹相移轮廓术(phase shifting profilometry, PSP)。

Takeda和Mouth^[10]在1983年提出了基于光栅投影的三维面型测量方法:傅里叶变换轮廓法^[11],将傅里叶变换引入到光栅图像处理。投影正弦条纹到待测物体表面,此时照相机所捕捉到

的物体表面光强分布如下:

$$I(x,y)=a(x,y)+b(x,y)\cos\theta(x,y) \quad (7)$$

其中 $I(x,y)$ 是该点光强, a 和 b 分别是背景强度和调制强度, θ 是该点的相位值。对式(7)进行傅里叶变换,然后取变换之后的 -1 或 $+1$ 分量进行傅里叶逆变换得到单个频率分量来检索相位值 θ

$$c=\frac{b}{2}(\cos\theta+i\sin\theta) \quad (8)$$

$$\theta=\arctan\frac{\text{Im}(c)}{\text{Re}(c)} \quad (9)$$

式中 c 是某点的单个频率分量, i 是虚数单位, $\text{Re}(\cdot)$ 和 $\text{Im}(\cdot)$ 分别是复数的实部和虚部。由上述可知,使用FPT方法只需要一幅条纹图像。后续继续进行相位展开,然后根据每点的参考相位和调制相位的差以及与高度的数学关系,即可求解每一点的高度,从而获得物体三维信息。

1984年,Srinivasan和Liu等将相移法应用到光栅投影技术中^[15]。同FPT方法,PSP系统同样也向待测面投影强度正弦变化的条纹栅格,如图5,然后解出每一个像素点的相位值。

$$I(x,y)=a(x,y)+b(x,y)\cos[\theta(x,y)+\varphi] \quad (10)$$

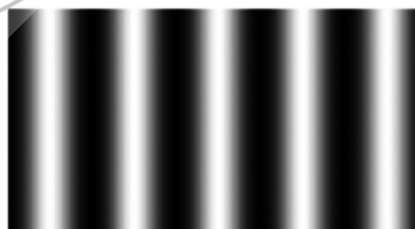
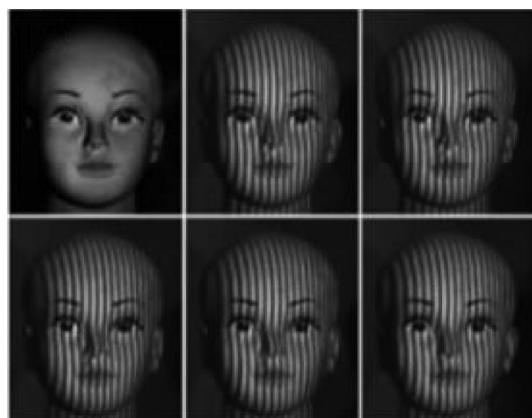


图5 正弦条纹

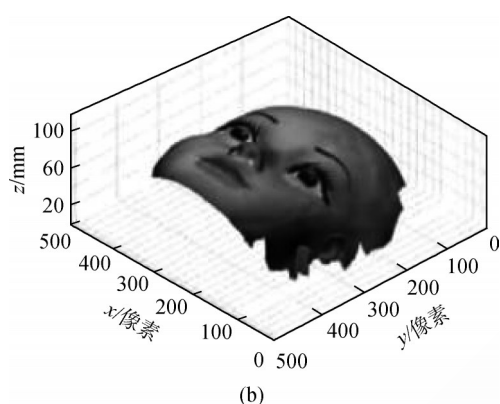
Fig.5 Sinusoidal fringes

相比傅里叶轮廓法,条纹相移法需要在一个周期内改变投影条纹的相位拍摄多幅待测物图像,即在一个周期内改变 φ 的值。由式(10)易知,未知数只有 a 、 b 和 θ ,所以3个以上的方程就可以对式子进行求解得到相位值,得到相位值之后即可进行相位展开和三维重建工作,图6就展示了使用五步相移法对人脸模型进行三维重建的结果。

在条纹分析法中,条纹中心法实现相对简单,只需提取到条纹中心各点的前后位移即可进行求解,求解的精度取决于条纹的疏密程度。若待测面十分复杂,在投影条纹之间不平滑,此方法就不再适用,所以这种方法常被用来做规则物体的三



(a)



(b)

图 6 五步相移法三维重建

Fig.6 Three-dimensional reconstruction by five-step phase-shift method

维重建。条纹相位法则很好地解决了上述问题,利用投影的正弦条纹,可以求解出每一个像素点的相位从而知道每一个点的深度信息,傅里叶轮廓术只需要一幅图片就可得到各点相位,所以多被用于实时动态测量;相移法则是在一个周期内多次移动条纹,拍下多幅图片求解方程来得出各点相位值,多被用于测量静态物体。

2.3 特征布置法

特征布置法被用于测量透明液体的液面面型,是一种较为新颖的测量方法,其测量系统示意图如图 7 所示。通过在盛放透明液体容器的底部布置一定疏密程度的条纹栅格或其他特征信息,当水平液面由于外界扰动发生变形时,从液面上方观测成像时,会看到特征产生了形变,该形变与液面变形相关。使用相机记录下某时刻的特征形变图像,使用计算机对图像进行进一步处理,求出变形后特征点相对于未变形位置的位移量,结合斯涅耳定律,列出位移量与高度之间的数学方程,即可求解出该时刻的液面形态。

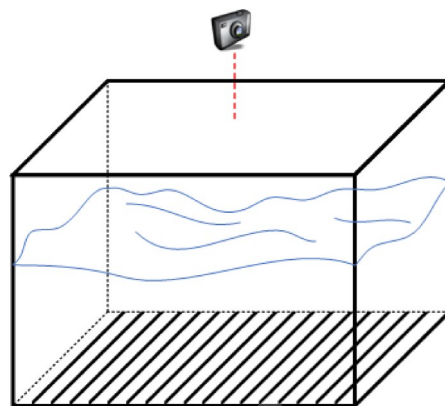


图 7 条纹放置法测量系统示意图

Fig.7 Schematic diagram of measuring system by fringe placement method

特征布置法在用于测量透明液体的液面形状时,若使用单目视觉方法,则需要使用迭代计算方法,需要给出局部高度信息的初始值才能求解出整个液面的面型^[27,31]。但液面在发生波动时,液面边缘各处各个时刻的高度信息即初始条件是不便给出的,这个条件制约了单目方法的使用。在此基础上有学者提出使用多目视觉的方法来解决需要赋初始值的问题,并使求解出的结果更加精确^[28,33,34,45]。

3 结 论

1) 现有的光学三维测量技术大多应用于测量固体物的三维面形,在液体三维面形重建方面的研究还相对较少。

2) 在求解液面面型时,对于不透明液体常常会使用类似于测量固体的三维测量方法,且在使用多目立体视觉匹配法测量时还会在液面投射特征信息以便于后期的图像匹配。

3) 对于透明液体,由于液体液面本身复杂的光学性质,测量会变得困难,所以有学者采用添加染色物质的方法使其变得不透明,这样虽然使测量变得简单但是会对待测液体造成污染。所以有学者提出了特征布置法来重建液面三维面型,这种方法较好地满足了透明液体三维重建的需求。

4) 光学三维测量朝着更加快速、更加精确、更加智能的方向发展。将光学三维测量与燃油余量测量和燃油晃动测量相结合,也能使飞机燃油系统朝着更准确智能的方向发展。

参考文献:

- [1] OTT E E. Effects of fuel slosh and vibration on the flamma-

- bility hazards of hydrocarbon turbine fuels within aircraft fuel tanks:[R].Fort Belvoir, VA:Defense Technical Information Center, 1970.
- [2] ABZUG M J. Fuel slosh in skewed tanks[J]. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 1996, 19(5):1172-1177.
- [3] 谭公礼. 多传感器的飞机油箱燃油测量系统的研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2015.
TAN Gongli. Research on fuel measurement system of aircraft fuel tank based on multi-sensor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)
- [4] 黄文锋, 于海玉, 薛均晓, 等. 基于计算机视觉的飞机燃油非接触式测量系统[J]. *图学学报*, 2019, 40(3):466-472.
HUANG Wenfeng, YU Haiyu, XUE Junxiao, et al. Non-contact measurement system of aircraft fuel based on computer vision[J]. *Journal of Graphics*, 2019, 40(3):466-472. (in Chinese)
- [5] 李征鸿, 刘麒, 刘静. 基于计算机视觉的智能燃油测量技术[J]. *飞机设计*, 2020, 40(3):35-39.
LI Zhenghong, LIU Lin, LIU Jing. Intelligent fuel measurement technology based on computer vision[J]. *Aircraft Design*, 2020, 40(3):35-39. (in Chinese)
- [6] GHARIB M, WEIGAND A. Experimental studies of vortex disconnection and connection at a free surface[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1996, 321:59-86.
- [7] ZUO Chao, ZHANG Xiaolei, HU Yan, et al. Has 3D finally come of age?—an introduction to 3D structured-light sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3):303001.1-303001.45.
- [8] 隋婧, 金伟其. 双目立体视觉技术的实现及其进展[J]. *电子技术应用*, 2004, 30(10):4-6.
SUI Jing, JIN Weiqi, et al. Realization and progress of binocular stereo vision technology [J]. *Application of Electronic Technique*, 2004, 30(10):4-6. (in Chinese)
- [9] MEADOWS D M, JOHNSON W O, ALLEN J B. Generation of surface contours by moiré patterns[J]. *Applied Optics*, 1970, 9(4):942-947.
- [10] TAKEDA M, MUTOH K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3D object shapes[J]. *Applied Optics*, 1983, 22(24):3977-3982.
- [11] SU X, CHEN W. Fourier transform profilometry:[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, 35(5):263-284.
- [12] 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[J]. *光学学报*, 1998(9):1228-1233.
SU Xianyu, TAN Songxin, XIANG Liqun, et al. 3D shape measurement of complex objects based on fourier transform contour method[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998(9):1228-1233. (in Chinese)
- [13] CHEN L C, HO H W, NGUYEN X L. Fourier transform profilometry (FTP) using an innovative band-pass filter for accurate 3D surface reconstruction[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2):182-190.
- [14] PRZADKA A, CABANE B, PAGNEUX V, et al. Fourier transform profilometry for water waves: how to achieve clean water attenuation with diffusive reflection at the water surface[J]. *Experiments in Fluids*, 2012, 52(2):519-527.
- [15] SRINIVASAN V, LIU H C, HALIOUA M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(18):3105-3126.
- [16] CHANG M, WAN D S. On-line automated phase-measuring profilometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1991, 15(2):127-139.
- [17] SU X Y, ZHOU W S, BALLY G V, et al. Automated phase-measuring profilometry using defocused projection of a Ronchi grating[J]. *Optics Communications*, 1992, 94(6):561-573.
- [18] DAI H. Shape measurement by digital speckle temporal sequence correlation with digital light projector[J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(5):793-800.
- [19] XU R, ZHOU F, ZHANG Q. Dynamic 3D shape measurement based on digital speckle projection and temporal sequence correlation[C]// *Optical Metrology and Inspection for Industrial Applications: IV*. Beijing: International Society for Optics and Photonics, 2016:100231Z.1-100231Z.6.
- [20] WANG B, ZHANG S, HU H. Development of digital image projection techniques to quantify surface film/rivulet flows [R]. New Orleans, US: the 28th Aerodynamic Measurement Technology, Ground Testing, and Flight Testing Conference, 2012.
- [21] WUST C, CAPSON D W. Surface profile measurement using color fringe projection[J]. *Machine Vision and Applications*, 1991, 4(3):193-203.
- [22] IHRKE I, KUTULAKOS K N, LENSCH H, et al. Transparent and specular object reconstruction[J]. *Computer Graphics Forum*, 2010, 29(8):2400-2426.
- [23] 吴博剑, 黄惠. 透明物体的三维重建综述[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2020, 32(2):173-180.
WU Bojian, HUANG Hui. A survey of 3D reconstruction of transparent objects[J]. *Journal of Computer Aided Design and Graphics*, 2020, 32(2):173-180. (in Chinese)
- [24] HU H, WANG B, ZHANG K, et al. Quantification of transient behavior of wind-driven surface droplet/rivulet flows using a digital fringe projection technique[J]. *Journal of Visualization*, 2015, 18(4):705-718.
- [25] HU H, ZHANG K, ZHANG S, et al. Development of a digital image projection technique to measure wind-driven water film flows[R]. Grapevine, Texas, US: the 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2013.
- [26] 梁海香. 双目立体视觉的波浪表面重建[J]. *无线电工程*, 2019, 49(8):678-682.
LIANG Haixiang. Wave surface reconstruction based on binocular stereo vision[J]. *Radio Engineering*, 2019, 49(8):678-682. (in Chinese)
- [27] KURATA J, GRATAN K T V, UCHIYAMA H, et al. Water surface measurement in a shallow channel using the

- transmitted image of a grating[J]. Review of Scientific Instruments, 1990, 61(2):736-739.
- [28] MORRIS N, KUTULAKOS K N. Dynamic refraction stereo [R]. Beijing: the 10th IEEE International Conference on Computer Vision, 2011.
- [29] XIN Z, COX C S. Measuring the two-dimensional structure of a wavy water surface optically: a surface gradient detector [J]. Experiments in Fluids, 1994, 17(4):225-237.
- [30] HILSENSTEIN V. Surface reconstruction of water waves using thermographic stereo imaging[R]. Dunedin, New Zealand: Proceedings of the International Conference on Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ), 2005.
- [31] 赵玉臣, 黄先富, 刘战伟, 等. 透射虚栅计量法及其在液面微变形测量中的应用[J]. 中国激光, 2012, 39(9):131-135.
ZHAO Yuchen, HUANG Xianfu, LIU Zhanwei, et al. Transmission-virtual grating method and its applications in measuring deformed liquid surface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(9):131-135. (in Chinese)
- [32] SULIMAN A, ZHANG Y, AL-TAHIR R. A novel technique for mapping the disparity of off-terrain objects' disparity[R]. Halifax, NL, Canada: the 9th Symposium of the International Society for Digital Earth (ISDE), 2015.
- [33] DING Y, LI F, YU JI, et al. Dynamic fluid surface acquisition using a camera array[R]. Barcelona, Spain: International Conference on Computer Vision, 2011.
- [34] QIAN Y, ZHENG Y, GONG M. Simultaneous 3D reconstruction for water surface and underwater scene[R]. Munich, Germany: European Conference on Computer Vision, 2018.
- [35] GRANT I, STEWART N, PADILLA-PEREZ I A. Topographical measurements of water waves using the projection moire method[J]. Applied Optics, 1990, 29(28):3981-3983.
- [36] ZHANG Q C, SU X Y. An optical measurement of vortex shape at a free surface[J]. Optics and Laser Technology, 2002, 34(2):107-113.
- [37] ZHANG K, WEI T, HU H. An experimental investigation on the surface water transport process over an airfoil by using a digital image projection technique[J]. Experiments in Fluids, 2015, 56(9):173-189.
- [38] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11):1330-1334.
- [39] NALPANTIDIS L, GASTERATOS A. Stereo vision for robotic applications in the presence of non-ideal lighting conditions[J]. Image and Vision Computing, 2010, 28(6):940-951.
- [40] CAI J. Integration of optical flow and dynamic programming for stereo matching[J]. Iet Image Processing, 2012, 6(3):205-212.
- [41] 张曦, 张健. 线结构光标定方法综述[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2):1-11.
ZHANG Xi, ZHANG Jian. Summary on calibration method of line-structured light[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2018, 55(2):1-11. (in Chinese)
- [42] 李爱娟, 辛睿, 武栓虎. 高效线结构光视觉测量系统标定方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(22):163-167.
LI Aijuan, XIN Rui, WU Shuanhu. Efficient calibration method for line-structured light vision measurement system[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2019, 56(22):163-167. (in Chinese)
- [43] KE F, XIE J, CHEN Y. A flexible and high precision calibration method for the structured light vision system[J]. Optik International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(1):310-314.
- [44] 戴福隆, 王朝阳. 条纹图像的数字化自动分析处理技术之一: 条纹中心法[J]. 光子学报, 1999, 28(8):700-706.
DAI Fulong, WANG Chaoyang. One of the techniques of digital automatic analysis and processing of fringe image: fringe center method[J]. Acta Photonica Sinica, 1999, 28(8):700-706. (in Chinese)
- [45] 邹玲, 齐越, 赖舜男. 动态水面数据采集与重建方法[J]. 软件学报, 2016, 27(10):2530-2541.
ZOU Lin, QI Yue, LAI Shunnan. Dynamic water surface data acquisition and reconstruction method[J]. Journal of Software, 2016, 27(10):2530-2541. (in Chinese)

(编辑:王碧琚)