

文章编号: 1001-4888(2017)06-0725-08

基于单目位姿估计的拉力扭转形变测量方法研究^{*}

王洁^{1,2}, 郭昱³, 张小虎^{1,2}, 刘进博^{1,2}, 丁少闻^{1,2}

(1. 国防科技大学 航天科学与工程学院, 湖南长沙 410073; 2. 国防科学技术大学 图像测量与视觉导航湖南省重点实验室, 湖南长沙 410073; 3. 北京航天长征飞行器研究所, 北京 100076)

摘要: 拉力作用下的高精度扭转形变测量是材料力学性能测试的难点。针对轴形试验件在拉力作用下的扭转形变测量问题, 提出了一种基于单目位姿估计的非接触式测量方法。在试验件的一端延伸连接一个轻质平面标志板, 利用固定于地面的测量相机对平面标志板实时成像, 并根据单目位姿估计原理解算试验件变形前后平面标志板的相对姿态变化。若试验件只发生扭转变形, 则平面标志板的姿态变化可由绕试验件轴向的旋转角描述, 通过对平面标志板的姿态变化矩阵进行 Rodrigues 分解, 可得到试验件轴向在空间中的向量表示及绕轴向的旋转角大小, 该旋转角即为试验件的扭转变形角。搭建了实验平台, 开展了实际拉力扭转形变测量实验, 结果表明: 基于单目位姿估计的非接触式轴形试验件扭转形变测量方法精度高, 系统结构简单, 是拉力扭转形变测量的一种有效测量方法。

关键词: 扭转形变测量; 单目位姿估计; Rodrigues; 非接触

中图分类号: O436

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-17-026

0 引言

非对称复合材料结构具有优越的力学和结构性能, 在工程中得到越来越广泛的应用。例如, 非对称复合材料层合板固化后存在“snapthrough”现象, 即在一定外力作用下可以从一种稳定构型变为另一种稳定构型, 成为一种双稳定结构。依据这种特性, 非对称复合材料层合板构成的双稳定结构可以应用于自适应结构上, 使得自适应结构不需要任何外力就可维持其稳定的构型^[1-3]。

拉伸—扭转耦合是非对称复合材料的一个重要特性。当长轴形试验件受到拉伸力作用时, 在径向产生拉伸形变的同时, 还会在切向产生微小的扭转形变, 而轴扭矩是反映机械设备动态性能最典型的机械量之一, 为计算试验件轴扭矩必须对扭转形变进行测量。在实际测量过程中, 由于轴上的形变量非常微小, 测量中很小的干扰都可能带来极大的误差。同时由于轴体本身固有的振动和偏心运动、轴系测量空间狭小以及测量的物理量易受外界因素影响, 高精度的扭转形变测量非常困难^[4]。

传统的接触式扭转形变测量分为两类, 一种是借助扭矩敏感材料, 设计相应检测装置, 如金属应变式扭矩传感器、磁弹性扭矩传感器^[5]。这类传感器往往需要将敏感材料贴附于轴表面, 材料易受外界环境影响, 且测量装置较复杂; 另一种是测量轴的两截面相对扭转角, 通过将角位移量转换为两路可测信号的相位差值, 计算出扭矩^[6-9], 但该方法实时性差、信号微弱、易受电磁干扰、装置复杂以及受传感元件本身影响明显等。

也可采用非接触的方法对扭转形变量进行测量。光学测量是一种非接触式的测量方法, 通过各种

^{*} 收稿日期: 2017-02-18; 修回日期: 2017-05-19

基金项目: 国家自然科学基金(Grant No. 11472302)

通讯作者: 张小虎(1973—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: 摄影测量与视觉导航。Email: zhangxiaohu@nudt.edu.cn

光学测量原理来实现对被测结构的测量。因其具有装置简单、高灵敏度和高精度等优点,该方法在计量测试技术领域中的应用越来越广泛。目前,常使用光学自准直法和激光干涉法等光学方法实现扭转变形的测量。光学自准直法^[10]就是在光学上使物体和像分别位于共轭平面,光束投射到被测物体上,当物体发生转动时,物体在像面上所成的像点也随之发生移动,通过测量像点的移动量便可以求出物体转动角度。但该方法测量的分辨力与透镜焦距有关,焦距过长会增加仪器所占空间,并且该方法测量范围通常在几分和几十分之间,测量分辨力也不是很理想。激光干涉法^[10]就是将直接测量物体转动的角度转化成测量物体反射光与参考光的光程差。由于干涉测量法可以精确到光波波长的几分之一甚至几十分之一,因此是目前精确度最高的测量方法。但由于该方法采用干涉条纹进行测量,对环境的要求极为苛刻,如周围空气流动都会对测量结果产生很大影响,而且仪器结构精密、稳定性不好、体积大,因而通常只作为一种测量基准和检测手段,很难用于现场测量。为避免上述测量方法的不足,本文提出了基于单目位姿估计的轴形试验件扭转变形量的光学测量方法。

本文的扭转变形测量思路是:将待测轴形试验件竖直固定在静力学试验架上(上端固定不动),在试验件下端固连平面标志板,使试验件下端与标志板具有相同的旋转关系(试验件下端与标志板构成刚体结构),试验件在拉力作用下产生扭转变形。通过固定在标志板下方的相机,对变形前后的标志板成像,再利用单目位姿估计的方法,求解变形前后标志板的姿态变化矩阵,最后根据罗德里格斯(Rodrigues)变换将姿态变化矩阵转化为旋转向量,其中旋转向量的方向为试验件的扭转变形轴向,旋转向量的模为绕轴向逆时针旋转的角度,该角度即为待求的试验件扭转角。

1 扭转变形测量系统设计方法原理

本文设计的复合材料试验件扭转变形量测量系统如图 1 所示。将待测轴形试验件上端固定在静力学试验架上,试验件材质为无湿热翘曲变形(hygro-thermal curvature-stable) $A_s B_t D_s$ 层合板复合材料,该材料在固化过程中不会发生翘曲变形及剪切变形。本文只研究试验件在拉力作用下的扭转变形量,不考虑试验件轴向的拉伸变形。由于该试验件在端部变形明显,因此将试验件下端的扭转变形量作为测量值。在试验件下端通过直杆连接棋盘格标志板,通过这样的安装关系,使得试验件下端扭转时会带动直杆一起转动,且直杆的旋转角度 ϕ 近似等于试验件的扭转角度,如图 2 所示,这样即可把试验件的扭转变形转化为直杆的刚体运动。

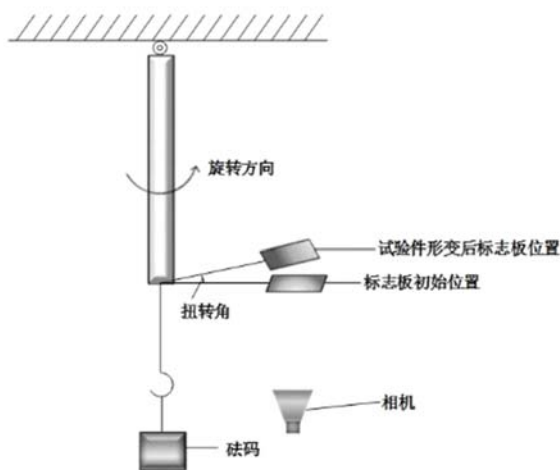


图 1 复合材料试验件扭转变形测量系统

Fig. 1 Torsional deformation measurement system of composite material test

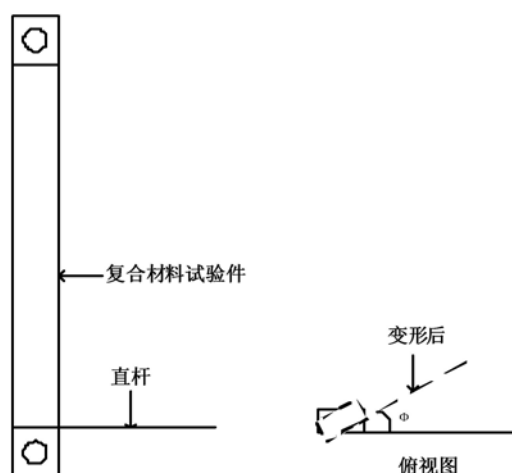


图 2 试验件扭转变形示意图

Fig. 2 Sketch of torsion deformation of test piece

试验件下方是砝码加载平台,通过悬挂不同砝码,改变待测试验件轴向拉伸力的大小。标志板正下

方为测量相机,相机光轴垂直向上。在待测试件加载砝码前后,分别对标志板进行采图。采图完毕后,按以下流程解算试验件扭转形变量。

(1) 提取控制点在图像上的像点坐标。

以棋盘格标志板上的所有对角点为控制点,在图像上提取控制点像点坐标。

(2) 设定标志板坐标系并计算控制点在标志板坐标系下的坐标。

如图3所示,取标志板上某一角点为标志板坐标系原点, XOY 平面在标志板上, X 轴 Y 轴分别与标志板两边沿平行, Z 轴与标志板法向平行。由于棋盘格参数已知,因此可以由各控制点与坐标系位置关系求得对应的标志板坐标系下的坐标值。

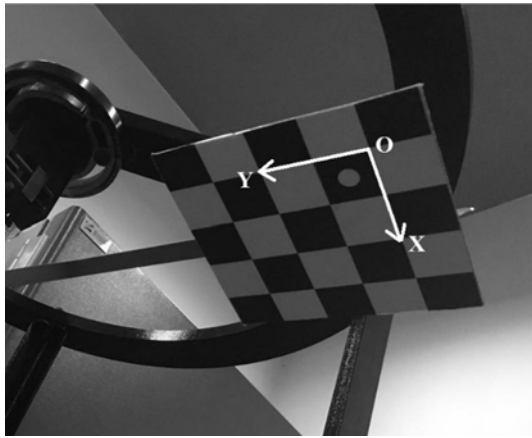


图3 实验标志板

Fig. 3 Experimental target

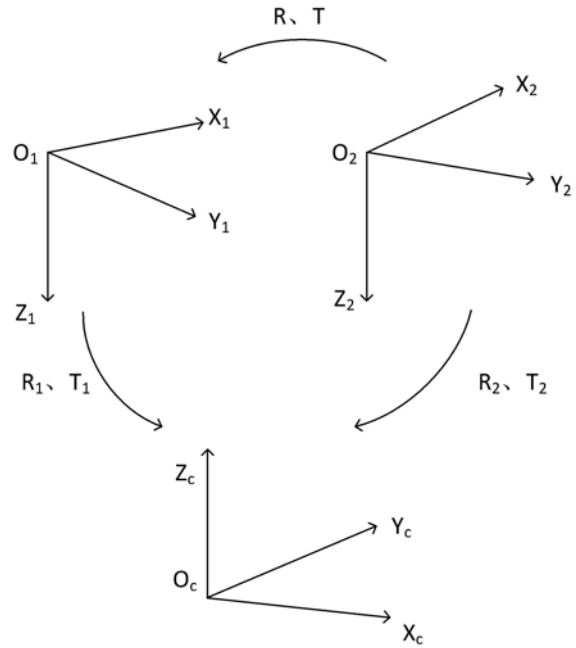


图4 坐标系关系转换图

Fig. 4 Transformation diagram of coordinate system

(3) 由控制点解算相机坐标系与标志板坐标系的旋转关系。

利用EPNP算法进行单目位姿估计,将其解算结果作为初值进行正交迭代优化,计算采图时刻标志板坐标系与相机坐标系的旋转、平移关系。

(4) 解算扭转变形角。

如图4所示,试验件未发生扭转形变时,令形变前标志板坐标系为 $O-X_1Y_1Z_1$,形变后的标志板坐标系为 $O-X_2Y_2Z_2$,相机坐标系为 $O-X_cY_cZ_c$ 。试验件未发生扭转形变时,由上述单目位姿估计方法^[11]可求出相机坐标系与标志板坐标系之间的旋转矩阵 R_1 。试验件由于拉伸力产生扭转形变后,同样方法求出相机坐标系与标志板坐标系之间的旋转矩阵 R_2 。以固定的相机坐标系为传递,可求出标志板坐标系在拉力作用前后的姿态变化矩阵为

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_1^T \mathbf{R}_2 \quad (1)$$

三维旋转问题可以用旋转向量描述,旋转向量的方向表示旋转轴向,大小(模)表示绕轴逆时针旋转的角度,通过Rodrigues变换将(1)式求出的姿态变化矩阵转换为旋转向量,其模值即为试验件的扭转变形角。Rodrigues旋转矩阵与旋转角的关系为

$$\mathbf{R} = \cos(\theta) \mathbf{I} + (1 - \cos(\theta)) \mathbf{r} \mathbf{r}^T + \sin(\theta) \begin{bmatrix} 0 & -r_z & r_y \\ r_z & 0 & -r_x \\ -r_y & r_x & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, θ 为旋转角度; $\mathbf{r}=(r_x, r_y, r_z)$ 为旋转向量; $\mathbf{I}$ 为单位阵。

对(2)式反变换求旋转向量 $\mathbf{r}$, 旋转角 θ 为旋转向量 $\mathbf{r}$ 的模值。

$$\sin(\theta) \begin{bmatrix} 0 & -r_z & r_y \\ r_z & 0 & -r_x \\ -r_y & r_x & 0 \end{bmatrix} = \frac{\mathbf{R} - \mathbf{R}^T}{2} \quad (3)$$

2 单目位姿估计算法原理

单目位姿估计是本方法的核心算法, 精确地求解出相机坐标系与世界坐标系之间的旋转、平移关系是高精度解算试验件扭转形变角度的关键。

单目位姿估计是利用一组世界点坐标已知的点及其在相机图像平面上对应的图像坐标, 确定相机坐标系与世界坐标系之间位姿关系的方法。位姿估计问题本质上可理解为一个多元非线性最优化问题, 求解的基本方法是迭代算法。迭代算法大多需要初始值, 且计算复杂度较高, 但由于其解算精度高因而被广泛用于解决位姿估计问题。迭代算法又分为全局最优法和局部最优算法。全局最优算法不依赖迭代初值, 但该方法目前存在收敛速度慢等不足^[12], 实际应用情况不如传统的局部最优算法。而局部最优方法对迭代初值要求较高, 因此迭代初值计算即位姿估计问题的线性解法仍是当前研究的热点。Ansar 等人于 2003 年提出的方法^[13]和 Lepetit 等人^[21]于 2009 年提出的 EPnP (efficient perspective-n-point, 高效 N 点透视问题) 方法是近年来两种较好的解决位姿估计问题的算法。刘进博等人在对基于点的相机姿态估计算法进行科学的性能评价时提出^[14], EPnP 与正交迭代结合和 RPnP 与正交迭代结合两种位姿估计算法的精度相当, 且与其他传统的基于点的位姿估计算法相比, 精度最高。本文利用 EPnP 方法对位姿问题的初值进行估计, 然后利用非线性迭代的方法对估计值进行优化, 获得相机坐标系与世界坐标系之间精确的旋转、平移关系。

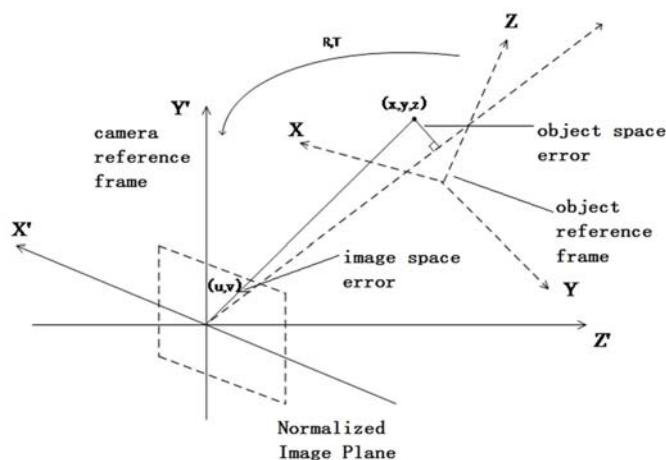


图 5 正交迭代算法坐标系

Fig. 5 Orthogonal iterative algorithm coordinate system

EPnP 是一种高效、高精度线性算法, 可以求解所有 $N \geq 4$ 的问题。其基本思想是把空间点都通过 4 个虚拟控制点所建立的坐标系来表示, 然后根据图像点的信息求解 4 个控制点在相机坐标系下的坐标, 进而得到被测目标中的空间点在相机坐标系和世界坐标系下的坐标, 最终可计算出相机坐标系相对于世界坐标系的旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 和平移向量 $\mathbf{T}$ 。以上过程的具体算法见[15]。

在获得位姿关系的初值后, 本文采用了 Lu、Hager、Mjolsness 等人提出的正交迭代^[16] (Orthogonal Itera-

tion, 简称 OD) 算法 (有文献中称为 LHM 算法) 对初值进行优化。其原理是采用物方残差平方和作为目标函数, 通过绝对定向问题的解法迭代求解旋转矩阵和平移向量, 具有全局快速收敛的特点, 计算速度和精度均较好。但迭代算法全局收敛与全局最优是两个概念^[17], 正交迭代算法仍属于局部最优化方法, 受到目标函数局部极小值的困扰。下面对该算法进行简要介绍。

正交迭代法采用正交投影模型建立坐标系^[18], 如图 5 所示。

正交迭代的目标是最小化物方残差, 物方残差的目标函数^[19]为

$$E(\mathbf{R}, \mathbf{T}) = \sum_{i=1}^n \|\mathbf{e}_i\|^2 = \sum_{i=1}^n \|(\mathbf{I} - \hat{\mathbf{V}}_i)(\mathbf{R}\mathbf{P}_i + \mathbf{T})\|^2 \quad (4)$$

式中, $\mathbf{I}$ 为单位阵; $\hat{\mathbf{V}}_i = \frac{\hat{v}_i \hat{v}_i^T}{\hat{v}_i^T \hat{v}_i}$ 为视线投影矩阵; $\hat{v}_i = [u_i, v_i, 1]$ 为控制点投影到归一化像面上的像点坐标; $\mathbf{P}_i$ 为控制点坐标; $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{T}$ 为相机在控制点坐标系下的位姿。

而目标函数(4)在已知旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 的情况下, 平移向量 $\mathbf{T}$ 存在最优解, 为

$$\mathbf{T}(\mathbf{R}) = \frac{1}{n} \left(\mathbf{I} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{\mathbf{V}}_i \right)^{-1} \sum_{i=1}^n (\hat{\mathbf{V}}_i - \mathbf{D}) \mathbf{R} \mathbf{P}_i \quad (5)$$

其迭代过程开始时需要给一个初始的 $\mathbf{R}$, 然后求出最优 $\mathbf{T}$, 再利用基于奇异值分解方法^[20] (Singular Value Decomposition, SVD) 的绝对定向问题的最优解更新 $\mathbf{R}$, 从而不断迭代更新 $\mathbf{R}$ 和 $\mathbf{T}$ 。在已知第 k 次迭代的 $\mathbf{R}^k$, $\mathbf{T}^k$ 后, 通过求解式(6)的绝对定向问题, 获得 $k+1$ 次迭代的 $\mathbf{R}$ 。

$$\mathbf{R}^{k+1} = \arg \min_{\mathbf{R}} \sum_{i=1}^n \|\mathbf{R} \mathbf{P}_i + \mathbf{T} - \mathbf{O}_i^k\|^2 \quad (6)$$

式中 $\mathbf{O}_i^k = \hat{\mathbf{V}}_i \vec{q}_i^k$ 表示 $\vec{q}_i^k$ 在对应视线上的投影点, 而 $\vec{q}_i^k = \mathbf{R} \mathbf{P}_i + \mathbf{T}$ 表示第 k 次迭代后, 参考点经过当前的 $\mathbf{R}^k$, $\mathbf{T}^k$ 变换后, 在相机坐标系下的坐标。

迭代停止的条件选择为目标函数小到一定程度, 或者目标函数的相对变化量小到一定程度, 或者达到了预设的迭代次数上限。



图6 扭转测量实验平台

Fig. 6 Torsion measurement platform

3 实验与结果分析

为验证本文提出的方法, 搭建高精度的标准扭转实验平台如图6所示, 为防止试验件在实验过程中受到损坏, 将该待测轴形试验件用铝块固定在静力学试验架上, 并在试验件下端通过直杆固定实验所需的平面标志板, 直杆在装配时其方向与试验件宽度方向平行。标志板下端悬挂砝码托盘, 用于加挂砝码以改变试件承受的拉伸作用力。实验过程中, 由于试验件与标志板固连, 试验件的自由端移动时会带动直杆及标志板绕空间中的一个轴做刚体运动, 试件绕该轴旋转的角度近似等于试验件扭转的角度。

实验中用到的复合材料试验件为 $200\text{mm} \times 20\text{mm} \times 1\text{mm}$ 的矩形, 该材料在拉力作用下只发生扭转变形。同时在试验件两端夹持区域的中心开孔, 用于与夹具连接, 两端用 $30\text{mm} \times 20\text{mm} \times 5\text{mm}$ 的铝块(夹具)夹持, 如图7所示。实验中用到的平面标志板的棋盘格尺寸长宽均为 40mm 。将标志板坐标系



图 7 试验件尺寸示意图

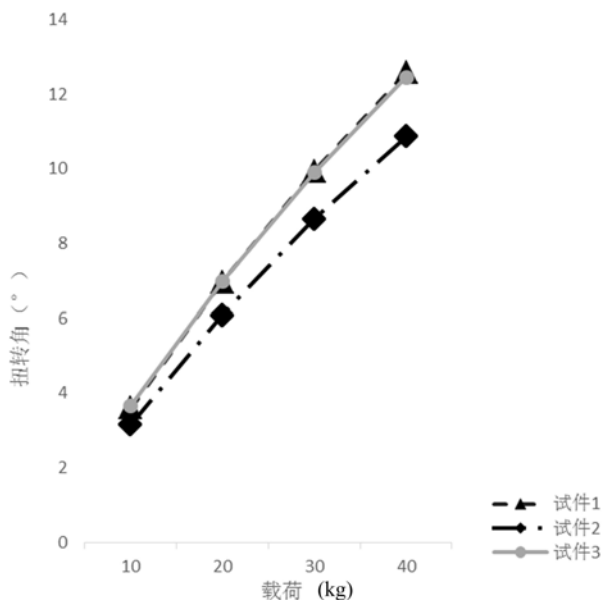
Fig. 7 Dimensions of test specimen

的原点选在图 3 中平面标志板中的位置, X、Y 轴位置如图 3 所示, Z 轴与实验平面标志板的法向量平行, 且指向地面方向, 空间控制点为标志板中 16 个角点所在的位置。在标志板下端放置单目相机, 通过张正友方法标定相机的内参数。试验件下端的砝码, 每个重量为 10kg。实验过程中, 改变砝码重量, 用单目相机拍摄平面标志板, 分别以时间为变化量在线测量出砝码质量为 10kg、20kg、30kg、40kg 时复合材料试验件的扭转变形量, 每次测量所用时间为 60s, 采集 225 个时刻的试验件扭转变形量, 并在变化稳定后取不同质量下角度变化的平均值作为最终的扭转角度。实验结果如表 1 所示。

表 1 不同应力对应复合材料试验件的扭转角测量结果

Tab. 1 Results of torsion angle of test piece under different stress conditions

	10kg	20kg	30kg	40kg
试件 1	3.601°	6.964°	9.933°	12.569°
试件 2	3.162°	6.086°	8.647°	10.857°
试件 3	3.673°	6.978°	9.894°	12.448°

图 8 无湿热翘曲变形 A_BD_S 层合板试验件试验结果对比Fig. 8 Hygro-thermal curvature-stable A_BD_S hybrid laminates comparison of test results

如图 8 所示, 将本文采用的方法得到的试验结果进行对比可以看出: (1) 随着悬挂砝码质量的增加, 实验中三个复合材料试验件的扭转变形实验值变化趋势基本相同。(2) 在拉伸力较小时, 测量结果的差异较小, 随着拉伸力的增加, 实验结果的差异逐渐增大, 但仍在可控范围内。因此验证了本方法的有效性与正确性。

试件 1~3 为同一复合材料试验件, 理论上三个试件扭转角度应完全相同, 但考虑到加工时的误差, 且试验件未完全消除晃动因素引起的测量结果误差, 夹具及砝码托盘也存在重量等因素会导致即使不悬挂砝码也会发生扭转变形, 进而引起本文的三个试验件实验结果并不完全相同。

4 结论

本文提出了基于单目位姿估计的非接触式无湿热翘曲变形复合材料试验件扭转

变形测量方法。通过提取实验标志板上的控制点在图像上的像点坐标, 通过视觉测量的方法, 直接计算试验件拉伸产生的扭转量, 与传统的接触式测量方法相比, 克服了布线困难、装置复杂等缺点。将三个试验件的实验结果对比, 该方法在拉伸力较小时, 精度较高。但该方法也存在一定的缺陷, 例如实验过

程中,无法保证试验件完全静止,这也可能是导致该方法在拉伸力较大时实验结果存在差别的主要原因,如何对这一误差进行修正是接下来的研究中的主要工作。

参考文献:

- [1] Schultz M R. Use of piezoelectric actuators to effect snap-through behavior of unsymmetric composite laminates [D]. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.
- [2] Daynes S, Nall S, Weaver P M, et al. Bistable composite flap for an airfoil[J]. Journal of Aircraft, 2010, 47(1): 334—338.
- [3] Daynes S, Weaver P M, Potter K D. Aeroelastic study of bistable composite airfoils[J]. Journal of Aircraft, 2009, 46(6):2169—2174.
- [4] 资新运, 耿帅, 赵姝帆, 等. 基于数字工业摄像的非接触扭矩传感测量研究[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(4): 19—21, 26 (ZI Xinyun, GENG Shuai, ZHAO Shufan, et al. Research of non-contact torque sensing measurement based on digital industrial photogrammetry[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2015, 34(4):19—21, 26 (in Chinese))
- [5] 王登泉, 杨明. 基于逆磁致伸缩效应的超声电机非接触扭矩测量[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(9):135—138 (WANG Dengquan, YANG Ming. Non-contact torque measurement for ultrasonic motor based on inverse magneto-elastic effect[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2011, 30(9):135—138 (in Chinese))
- [6] 侯培国, 尚呈星, 潘钊, 等. 基于光电多码道技术的嵌入式扭矩测量系统[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(5):87—89 (HOU Peiguo, SHANG Yuxing, PAN Zhao, et al. Embedded torque measurement system based on photoelectricity multiple code-tracks encoder technology[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2009, 28(5): 87—89 (in Chinese))
- [7] 喻洪麟, 陈薇, 何安国. 基于环形阵列扭矩传感器的高精度扭矩测量系统设计[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(7):97—100 (YU Honglin, CHEN Wei, HE Anguo. Design of high-precision torque measurement system based on ring array torque sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013, 32(7):97—100 (in Chinese))
- [8] 谢锐, 马铁华, 武耀艳, 等. 嵌入式容栅传感技术及轴功率测试研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(4):844—847 (XIE Rui, MA Tiehua, WU Yaoyan, et al. Study on embedded capacitive grating sensing technology and shaft power testing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(4):844—847 (in Chinese))
- [9] 刘彬, 时培明, 赵武, 等. 激光双截面转速波动法监测转轴动态扭矩[J]. 中国激光, 2007, 34(1):111—115 (LIU Bin, SHI Peiming, ZHAO Wu, et al. Dynamic torque measurement technique using laser doppler effect and two-section speed fluctuation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(1):111—115 (in Chinese))
- [10] 周红锋, 宫爱玲. 小角度测量的光学方法[J]. 计量技术, 2006, 32(7):17—20 (ZHOU Hongfang, GONG Ailing. Optical methods for measuring small angles[J]. Measurement Technique, 2006, 32(7):17—20 (in Chinese))
- [11] 于起峰, 尚洋. 摄影测量学原理与应用研究[M]. 北京:科学出版社, 2009:26—31 (YU Qifeng, SHANG Yang. Videometrics: principles and researches[M]. Beijing: Science Press, 2009:26—31 (in Chinese))
- [12] Hartley R I, Kahl F. Global optimization through searching space and optimal estimation of the essential matrix [C]. International Conference on Computer Vision, 2007.
- [13] Ansar A, Daniilidis K. Pose estimation linear pose estimation from points or lines[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2003, 25(5):578—589.
- [14] 刘进博, 郭鹏宇. 基于点对应的相机姿态估计算法性能评价[J]. 光学学报, 2016, 36(5):129—138 (LIU Jinbo, GUO Pengyu. Evaluation strategy for camera pose estimation algorithm based on point correspondences[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5):129—138 (in Chinese))
- [15] 杨兵兵. 飞机进近及着陆视觉导航研究[D]. 上海交通大学硕士学位论文, 2013 (YANG Bingbing. Vision-based navigation research for aircraft approaching and landing[D]. Shanghai Jiaotong University, 2013 (in Chinese))
- [16] Lu C P, Hager G D. Fast and globally convergent pose estimation from video images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2000, 22(6):610—622.
- [17] 龙古灿. 无人机视觉着陆引导中的位姿估计问题研究[D]. 国防科学技术大学硕士学位论文, 2011 (LONG Gucan. Researches on pose estimation problem for UAV vision-based landing guidance[D]. National University of

- Defense Technology, 2011 (in Chinese))
- [18] 姜广文. 相机链位姿传递摄像测量方法及船体变形测量研究[D]. 国防科学技术大学博士学位论文, 2010 (JIANG Guangwen. Study on pose relay videometrics method with camera-series and ship deformations measurement[D]. National University of Defense Technology, 2010(in Chinese))
- [19] 李鑫, 龙谷灿. 相机位姿估计的加速正交迭代算法[J]. 光学学报, 2015, 35(1):266—273 (LI Xin, LONG Gucan. Accelerative orthogonal iteration algorithm for camera pose estimation[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1):266—373 (in Chinese))
- [20] Umeyama S. Least-squares estimation of transformation parameters between two point patterns [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(4):376—380.
- [21] Lepetit V, Moreno-Noguer F. EPnP: An accurate $O(n)$ solution to the pnp problem[J]. International Journal of Computer Vision, 2009, 81(2):155—166.

On the Measurement Method of Tensile Torsion Deformation Based on Monocular Pose Estimation

WANG Jie^{1,2}, GUO Yu³, ZHANG Xiao-hu^{1,2}, LIU Jin-bo^{1,2}, DING Shao-wen^{1,2}

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China; 2. Hunan Key Laboratory of Videometrics and Vision Navigation Changsha, Hunan 410073, China; 3. Beijing Institute Space Long of March Vehicle, Beijing 100076, China)

Abstract: High precision torsion deformation measurement under tensile action is a difficult point in materials mechanical properties measurement. In order to solve the problem of torsion deformation measurement of axial specimen under tensile action, a non-contact measurement method based on monocular pose estimation is presented. A lightweighted flat mark plate is connected at one end of tested specimen, real time imaging of the flat mark plate was realized by using a camera fixed to the ground. According to the principle of monocular pose estimation, the relative posture change of flat mark plate before and after specimen deformation is calculated. If the specimen only produces torsion deformation, the pose change of flat mark plate can be described by the rotation angle around the test piece in axial direction. Through Rodrigues decomposition of flat mark plate pose change matrix, the axial representation of specimen in space and the rotation angle around the axis can be obtained, which is the torsion deformation angle of specimen. An experimental platform was built to carry out the actual tensile torsion deformation experiment. Experimental results indicate that this non-contact torsion deformation measurement method based on monocular pose estimation has high accuracy and simple system composition, is an effective measurement method for torsion deformation measurement under tensile action.

Keywords: Torsional deformation measurement; monocular pose determination; Rodrigues; non-contact