

基于数字图像相关法的空间目标位姿测量

王永红^{1,2*}, 朱奕磊^{1,2}, 高启学^{1,2}, 王欢庆^{1,2}¹合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;²合肥工业大学测量理论与精密仪器安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009

摘要 针对传统立体视觉位姿测量方法中必须先确定计算点的数量和位置的局限性, 提出了一种基于三维数字图像相关法(3D-DIC)的空间目标位姿测量方法。该方法通过 3D-DIC 获得被测物不同时刻的全场坐标信息, 根据提取的相应计算点坐标, 结合空间向量求解空间目标的位姿参数。该方法可灵活选取计算点的数量和位置, 并相应提出了计算点数量最优比条件。通过位移旋转台和六自由度平台分别对复杂形貌特征的面具试样进行了多位姿参数测量的实验验证。实验结果表明, 计算点数量满足最优比条件时位姿测量精度最高, 计算点的位置对测量结果影响较小, 六自由度平台的测量误差在允许范围之内。所提出的 3D-DIC 位姿测量方法可在较小的误差范围内实现对空间目标多个位姿参数的测量。

关键词 测量; 数字图像相关法; 空间向量; 计算点选取; 位姿参数计算

中图分类号 TN247

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0812001

Position and Pose Measurement of Spatial Object Based on Digital Image Correlation

Wang Yonghong^{1,2*}, Zhu Yilei^{1,2}, Gao Qixue^{1,2}, Wang Huanqing^{1,2}¹ School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China;² Anhui Province Key Laboratory of Measuring Theory and Precision Instrument, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

Abstract To overcome the limitation of traditional stereo-vision position and pose measurement methods that the number and locations of calculation points must be determined in advance, this paper proposes a method to measure the positions and poses of spatial objects based on three-dimensional digital image correlation (3D-DIC). In this method, full-field coordinates of the measured object at different moments are obtained by 3D-DIC. According to the coordinates of corresponding calculation points extracted, position and pose parameters of the spatial object are solved via space vectors. The number and locations of calculation points can be selected flexibly in this method, and a criterion of the optimal ratio of the number of calculation points (ORNCP) is also proposed accordingly. Multiple position and pose parameters of mask samples with complex morphological characteristics are measured on a displacement and rotation platform as well as a 6 degree-of-freedom (DOF) platform, respectively, for experimental verification. The experimental results demonstrate that position and pose measurement precision is the highest when the number of calculation points meets the ORNCP criterion. Meanwhile, the positions of calculation points have little influence on experimental results, and the measurement errors in the case of the 6 DOF platform are within the tolerance range. The proposed 3D-DIC position and pose measurement method can be used to measure multiple position and pose parameters of a spatial object within a small error range.

Key words measurement; digital image correlation method; space vector; selection of calculation points;

收稿日期: 2021-08-23; 修回日期: 2021-09-26; 录用日期: 2021-10-25

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFF0101803)、合肥市自然科学基金(2021017)

通信作者: *yhwang@hfut.edu.cn

1 引言

空间目标的位置姿态参数是反映目标运动状态的重要指标,包括俯仰角、偏航角、滚转角,以及横移、纵移、升降,被广泛应用在目标识别、定位跟踪、机械制造、自动化、航空航天等领域。许多研究者已经进行了测量空间目标的姿态变化的研究,延皓等^[1]提出一种利用三坐标测量机获取六自由度平台位姿信息并进行误差补偿的方法;张淑平等^[2]针对大载荷实验平台惯性大、负载大的特点,对相邻状态下的位姿数据变化量进行补偿;张宇深等^[3]提出一种基于激光跟踪仪的六自由度平台位姿检测方案;马瑾等^[4]使用基于相对视觉位姿和 ID Marker 标记块的位姿测量方案,其中相对位姿的使用避免了基坐标系和测量坐标系间的转换;Cheon 等^[5]提出一种包含 4 个运动捕捉相机和 1 个红外反射标记立方体的视觉追踪系统,实现了对运动沙发的姿态测量;Li 等^[6]基于分割视点特征直方图提出了一个鲁棒的目标识别算法,并将位姿估计应用于箱子拣选;李永强等^[7]应用倾角仪对六自由度平台的俯仰角和滚转角进行测量,应用多齿分度盘结合光电自准直仪对偏航角进行测量;Zhou 等^[8]提出了一种新的三维描述符 BOLD3D,用于检测和估计三维点云中的平台姿态。Yang 等^[9]用高速 CCD 摄像机配合多波长相移干涉技术对被测物的瞬时空间位姿进行测量。

本文通过三维数字图像相关法(3D-DIC)来实现目标位姿测量。数字图像相关法(DIC)通过对被测物表面不同状态下图像序列的灰度信息进行相关计算,获得相应的位移和应变信息,被广泛应用于热变形^[10]、非均匀变形^[11]、裂纹尖端变形^[12],以及诸如水下等复杂场景中的三维变形场测量^[13],近年来 DIC 也被应用于旋转物体的测量^[14-17]。本文通过

3D-DIC 获得被测物不同时刻的全场坐标信息,根据提取的相应计算点坐标,建立坐标变换的数学模型,并结合空间向量求解被测物的位姿。分别通过位移旋转台位姿测量实验以及六自由度平台位姿测量实验验证了位姿求解的可行性和准确性。

2 基本原理

2.1 数字图像相关法原理

数字图像相关法是一种非接触式的光学测量方法^[18],在被测物表面赋予散斑图案并利用相机采集变形前后不同状态下被测物表面的图像。DIC 的原理图如图 1 所示,在变形图像中寻找与参考图像中 $P_0(x_0, y_0)$ 以及 $Q_0(x_0, y_0)$ 相关系数最大的对应点 $P_1(x_1, y_1)$ 以及 $Q_1(x_1, y_1)$ 。将变形图像序列中每一幅图片分别与参考图像进行相关计算,通过全场计算点的坐标变化即可计算出被测物在不同时刻的位移情况。

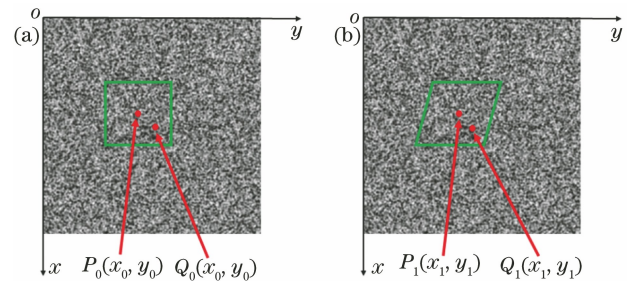


图 1 DIC 原理。(a)参考图像;(b)变形图像

Fig. 1 Principle of DIC. (a) Reference image; (b) deformed image

DIC 计算需要根据测量需求选择合适的相关函数公式,常用的函数有零均值归一化平方和函数(ZNSSD)和零均值归一化互相关函数(ZNCC)。从 Pan 等^[19]的研究中可知 ZNSSD 与 ZNCC 相比具有更高的优化效率。本文选择 ZNSSD 作为 DIC 的相关系数进行匹配计算,其表达式为

$$C_{\text{ZNSSD}} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_j) - \bar{f}}{\sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - \bar{f}]^2}} - \frac{g(x'_i, y'_j) - \bar{g}}{\sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x'_i, y'_j) - \bar{g}]^2}} \right]^2, \quad (1)$$

式中: $f(x_i, y_j)$ 为参考子区中像素点的灰度值; $g(x'_i, y'_j)$ 为变形子区中像素点的灰度值; $2M+1$ 为子区边长; \bar{f} 和 \bar{g} 分别为参考子区和变形子区的灰度平均值,其计算公式分别为

$$\bar{f} = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M f(x_i, y_j), \quad (2)$$

$$\bar{g} = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M g(x'_i, y'_j). \quad (3)$$

以上相关系数计算方式有较好的稳健性及准确性,满足实际测量需求^[20]。

2.2 刚体运动位姿测量原理

2.2.1 位姿求解原理

如图 2 所示,设 p_i 为运动刚体表面的一个计算点,运动坐标系 $O_m^{(0)} X_m Y_m Z_m$ 为随被测物运动的运动坐标系,坐标系原点 O_m 建立在被测物表面的几何中心点处,则 t 时刻运动坐标系可表示为 $O_m^{(t)} X_m Y_m Z_m$, p_i 在任意时刻下于当前的运动坐标系中位置不变。建立世界坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 。假设运动坐标系从初始位置 L_0 开始随目标运动至 t 时刻的位置 L_t 处,则相应的点 p_i 从初始位置 $p_i^{(0)}$ 处运动至 $p_i^{(t)}$ 处。 $R_{mw}^{(0)}$ 和 $T_{mw}^{(0)}$ 分别为世界坐标系到运动坐标系 $O_m^{(0)} X_m Y_m Z_m$ 的旋转矩阵和平移向量, $R_{mw}^{(t)}$ 和 $T_{mw}^{(t)}$ 分别为世界坐标系到运动坐标系 $O_m^{(t)} X_m Y_m Z_m$ 的旋转矩阵和平移向量, $R_m^{(r_0)}$ 和 $T_m^{(r_0)}$ 分别为运动坐标系从 L_0 运动到 L_t 的旋转矩阵和平移向量, $R_w^{(r_0)}$ 和 $T_w^{(r_0)}$ 分别为运动坐标系从 L_0 运动到 L_t 的旋转矩阵和平移向量在世界坐标系下的表示。

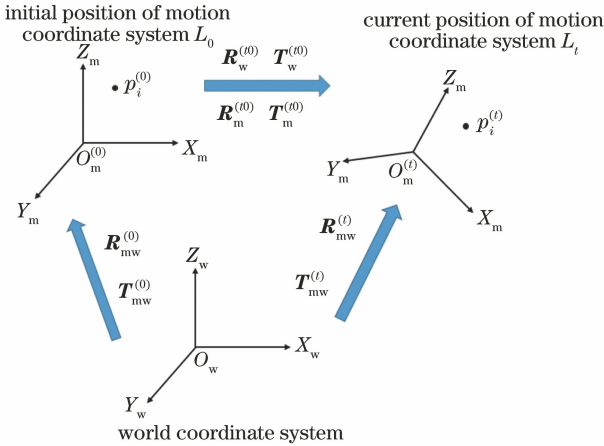


图 2 立体视觉测量系统中的坐标系转换

Fig. 2 Coordinate system conversion in stereo vision measurement system

以 p_i 为计算点进行位姿计算,当被测物位于初始位置 L_0 时, p_i 在 $O_m^{(0)} X_m Y_m Z_m$ 坐标系的坐标为 $(x_{mi}^{(0)}, y_{mi}^{(0)}, z_{mi}^{(0)})$, 在世界坐标系的坐标为 $(x_{wi}^{(0)}, y_{wi}^{(0)}, z_{wi}^{(0)})$; 当被测物位于位置 L_t 时, p_i 此时在世界坐标系的坐标为 $(x_{wi}^{(t)}, y_{wi}^{(t)}, z_{wi}^{(t)})$, 在 $O_m^{(t)} X_m Y_m Z_m$ 坐标系的坐标为 $(x_{mi}^{(t)}, y_{mi}^{(t)}, z_{mi}^{(t)})$ 。则根据空间坐标变换规律,可以推导得到 p_i 运动过程中在不同坐标系中的坐标转换关系如下:

$$\begin{pmatrix} x_{wi}^{(t)} \\ y_{wi}^{(t)} \\ z_{wi}^{(t)} \end{pmatrix} = (\mathbf{R}_{mw}^{(0)})^{-1} \mathbf{R}_m^{(r_0)} \mathbf{R}_{mw}^{(0)} \begin{pmatrix} x_{wi}^{(0)} \\ y_{wi}^{(0)} \\ z_{wi}^{(0)} \end{pmatrix} + (\mathbf{R}_{mw}^{(0)})^{-1} (\mathbf{R}_m^{(r_0)} \mathbf{T}_{mw}^{(0)} + \mathbf{T}_m^{(r_0)} - \mathbf{T}_{mw}^{(0)}). \quad (4)$$

令 $(\mathbf{R}_{mw}^{(0)})^{-1} \mathbf{R}_m^{(r_0)} \mathbf{R}_{mw}^{(0)} = \mathbf{R}$, $(\mathbf{R}_{mw}^{(0)})^{-1} (\mathbf{R}_m^{(r_0)} \mathbf{T}_{mw}^{(0)} + \mathbf{T}_m^{(r_0)} - \mathbf{T}_{mw}^{(0)}) = \mathbf{T}$, 则可将(4)式化简为

$$\begin{pmatrix} x_{wi}^{(t)} \\ y_{wi}^{(t)} \\ z_{wi}^{(t)} \end{pmatrix} = \mathbf{R} \begin{pmatrix} x_{wi}^{(0)} \\ y_{wi}^{(0)} \\ z_{wi}^{(0)} \end{pmatrix} + \mathbf{T}. \quad (5)$$

由(5)式即可得到旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矩阵 \mathbf{T} 的表达式,而位姿求解的本质就是计算 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 。

若已知平台上两点 p_i 和 p_j 的初始世界坐标向量 $\mathbf{p}_i^{(0)} = (x_{wi}^{(0)}, y_{wi}^{(0)}, z_{wi}^{(0)})$ 和 $\mathbf{p}_j^{(0)} = (x_{wj}^{(0)}, y_{wj}^{(0)}, z_{wj}^{(0)})$, 以及 t 时刻下的世界坐标向量 $\mathbf{p}_i^{(t)} = (x_{wi}^{(t)}, y_{wi}^{(t)}, z_{wi}^{(t)})$ 和 $\mathbf{p}_j^{(t)} = (x_{wj}^{(t)}, y_{wj}^{(t)}, z_{wj}^{(t)})$, 则由(5)式可得

$$\mathbf{p}_i^{(t)} - \mathbf{p}_j^{(t)} = \mathbf{R} [\mathbf{p}_i^{(0)} - \mathbf{p}_j^{(0)}]. \quad (6)$$

定义^[21]:

$$\begin{cases} \mathbf{A}_k^{(t)} = \frac{\mathbf{p}_i^{(t)} - \mathbf{p}_j^{(t)}}{|\mathbf{p}_i^{(t)} - \mathbf{p}_j^{(t)}|} \\ |\mathbf{p}_i^{(t)} - \mathbf{p}_j^{(t)}| \neq 0 \\ \mathbf{A}_k^{(t)} = 0 \\ |\mathbf{p}_i^{(t)} - \mathbf{p}_j^{(t)}| = 0 \\ \mathbf{A}_k^{(0)} = \frac{\mathbf{p}_i^{(0)} - \mathbf{p}_j^{(0)}}{|\mathbf{p}_i^{(0)} - \mathbf{p}_j^{(0)}|} \\ |\mathbf{p}_i^{(0)} - \mathbf{p}_j^{(0)}| \neq 0 \\ \mathbf{A}_k^{(0)} = 0, \\ |\mathbf{p}_i^{(0)} - \mathbf{p}_j^{(0)}| = 0 \end{cases}, \quad (7)$$

式中: $i=1, 2, \dots, N-1; j=2, 3, \dots, N; j>i$ 。这样的向量有 $s=C_N^2=N(N-1)/2$ 个,其中序号 k 定义为

$$k = (2N - i)(i - 1)/2 + j - i. \quad (8)$$

定义:

$$\begin{cases} \mathbf{B}_l^{(t)} = \frac{\mathbf{A}_p^{(t)} \times \mathbf{A}_q^{(t)}}{|\mathbf{A}_p^{(t)} \times \mathbf{A}_q^{(t)}|} \\ |\mathbf{A}_p^{(t)} \times \mathbf{A}_q^{(t)}| \neq 0 \\ \mathbf{B}_l^{(t)} = 0 \\ |\mathbf{A}_p^{(t)} \times \mathbf{A}_q^{(t)}| = 0 \\ \mathbf{B}_l^{(0)} = \frac{\mathbf{A}_p^{(0)} \times \mathbf{A}_q^{(0)}}{|\mathbf{A}_p^{(0)} \times \mathbf{A}_q^{(0)}|} \\ |\mathbf{A}_p^{(0)} \times \mathbf{A}_q^{(0)}| \neq 0 \\ \mathbf{B}_l^{(0)} = 0 \\ |\mathbf{A}_p^{(0)} \times \mathbf{A}_q^{(0)}| = 0 \end{cases}, \quad (9)$$

式中: $p=1, 2, \dots, s-1; q=2, 3, \dots, s; q > p$ 。而在
 这种情况下, 这样的向量一共有 $n = C_s^2 =$
 $\frac{N^2(N-1)^2}{8} - \frac{N(N-1)}{4}$ 个。其中序号 l 定义为

$$l = \frac{(2s-p)(p-1)}{2} + q - p. \quad (10)$$

将 $A_k^{(l)}$ 和 $B_l^{(l)}$ 构成一个新的矩阵 D_l , 将 $A_k^{(0)}$
 和 $B_l^{(0)}$ 构成一个新的矩阵 D_0 , 则有

$$\begin{cases} D_l = [A_1^{(l)}, A_2^{(l)}, \dots, A_s^{(l)}, B_1^{(l)}, B_2^{(l)}, \dots, B_n^{(l)}] \\ D_0 = [A_1^{(0)}, A_2^{(0)}, \dots, A_s^{(0)}, B_1^{(0)}, B_2^{(0)}, \dots, B_n^{(0)}]^\circ \end{cases} \quad (11)$$

于是可得

$$D_l = R D_0, \quad (12)$$

可利用 Penrose-Moore 广义逆求解旋转矩阵 R :

$$R = D_l D_0^+ = D_l D_0^T (D_0 D_0^T)^{-1}, \quad (13)$$

式中: D_0^+ 为 D_0 的 Penrose-Moore 广义逆矩阵; D_0^T
 为 D_0 的转置。

求得旋转矩阵 R 后, 可求得位移向量 T :

$$T = p_i^{(l)} - R p_i^{(0)}, \quad (14)$$

$$T = \frac{\sum_{i=1}^N (p_i^{(l)} - R p_i^{(0)})}{N}. \quad (15)$$

利用(13)式和(15)式分别求得 R 和 T , 这便是
 本文的位姿计算方法。

2.2.2 基于 3D-DIC 的计算点选取

传统的检测算法根据计算点的信息创建模型并
 利用相应的算法进行计算点匹配。图像匹配算法可
 分为两大类: 一类是基于特征的图像匹配算法, 如尺
 度不变特征变换^[22] 和 SURF (speeded up robust
 features)^[23]; 另一类是基于灰度的图像匹配算法,
 如误差平方和算法及归一化积相关算法^[24]。其中
 基于特征的位姿求解方法有一定的局限性, 如对计
 算点的相互位置关系和制作要求较高, 测量系统的
 布局受计算点的影响较大等。

针对上述问题, 本文采用基于灰度模板匹配的
 DIC 来进行计算点提取。3D-DIC 可以得到被测物
 的全场位移信息, 在感兴趣区域 (ROI) 内选择若干
 个计算点, 基于第 2.1 节的相关系数计算得到最佳
 匹配结果。将计算点在不同时刻下的坐标代入(13)
 和(15)式进行计算, 即可得到旋转矩阵 R 和平移向
 量 T , 从而求解得到位姿。本文所用方法对计算点
 的选取更加灵活, 计算点的数量和位置都无需在实
 验之前就预先确定, 也无需对计算点的形状或是灰
 度特征有很高的要求。由第 2.2.1 节推导可知, 理

论上若已知被测表面两个计算点 p_i 和 p_j 的坐标,
 则可计算出被测物的位姿, 但实际可能会出现方程
 组奇异的不利情况, 为了简化计算和保证精确性, 通
 常会选择至少 3 个不共线的计算点。

3 实验与分析

3.1 位移旋转台位姿测量实验

不同的空间目标在结构和形状上并不相同, 为
 了验证上述位姿求解方法的有效性和准确性, 首先
 利用 3D-DIC 测量系统和能够实现 4 个自由度运动
 的位移旋转台对复杂形貌特征的面具试样进行位姿
 测量。针对本文实验的视觉测量系统进行标定, 本
 文采用的标定法是经典的张正友标定法^[25]。位移
 旋转台的横移、纵移和升降三个参数的分辨率均为
 $10 \mu\text{m}$, 偏航角度分辨率为 0.0005° 。被测物和测
 量系统的实物图如图 3 所示。

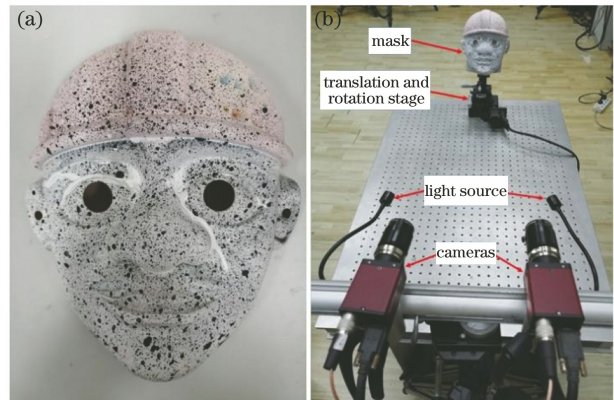


图 3 被测物和测量系统的实物图。(a) 面具试样;
 (b) 面具试样位移旋转台位姿测量系统

Fig. 3 Physical graphs of measured object and
 measurement system. (a) Mask sample; (b) position and
 pose measurement system of mask sample on translation
 and rotation stage

首先进行不同数量计算点的对比实验, 分别在
 被测面具试样上选取 3, 10, 50, 100, 500 个计算点对
 4 个位姿参数进行计算, 得到 10 个不同时刻位姿的
 5 组计算结果, 利用所得结果计算得到相对误差, 如
 图 4 所示。

从相对误差曲线图中可以得知, 随着计算点数
 量的增加, 计算精度得到了提升, 当计算点数量为
 100 时, 相对误差曲线整体最为平稳, 上下波动最
 小, 相对误差曲线最为理想。然而, 并不是从全场区
 域内选择的计算点越多, 得到的测量效果越好。3D-
 DIC 可以通过子区大小 (subset size)、匹配点间隔
 (grid spacing), 以及 ROI 的变化来改变全场计算点

的数量和分布情况,本实验中选择的子区大小为 41 pixel×41 pixel,计算点间隔为 17 pixel,全场共计 608 个有效计算点。若 ROI 内用于 3D-DIC 计算的有效计算点总数为 M ,位姿求解的最优计算点数为 m ,则可以得到计算点数量的最优比(ORNCP)为

$$R_{ORNCP} = \frac{m}{M} \quad (16)$$

在本文的实验情况下, $R_{ORNCP} = \frac{100}{608} \approx \frac{1}{6}$ 。为了

进一步确认该方法是否可作为一般情况下位姿计算点的最优数量选择,通过改变 ROI 内 3D-DIC 匹配计算时的子区大小、匹配点间隔,以及改变 ROI 本身的大小和形状来改变全场有效计算点总数 M ,得到了 4 种不同的情况 ($M = 489, 751, 1005, 1658$),选择位姿求解的最优计算点数 m 时,令 $R_{ORNCP} = \frac{1}{6}$,得到位姿测量结果的相对误差曲线图如图 5 所示。

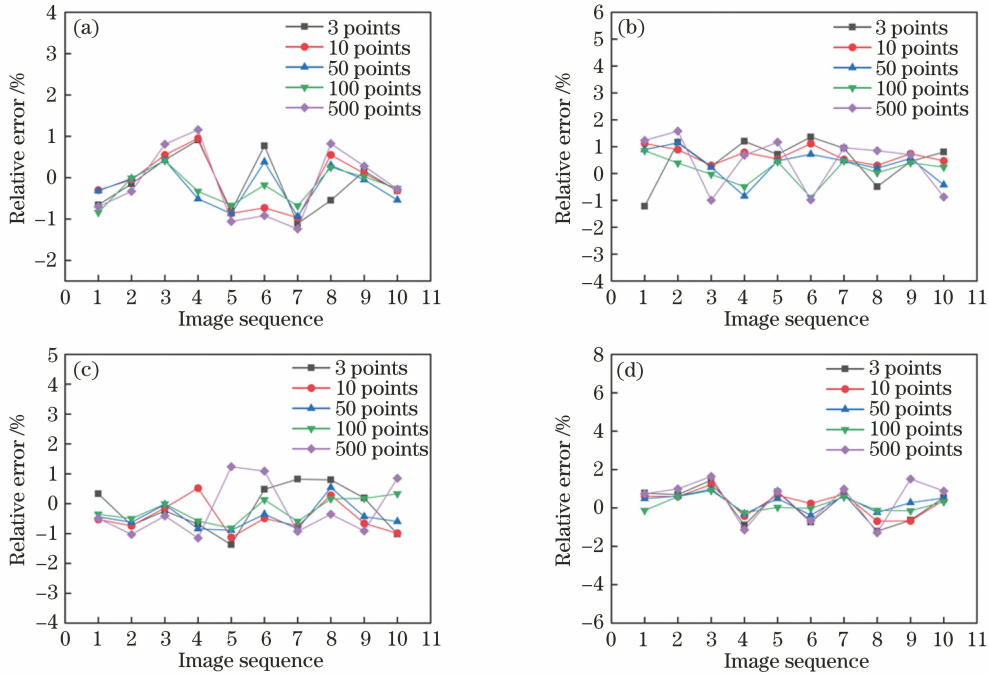


图 4 面具试样在位移旋转台实验中不同数量计算点的相对误差。(a)横移;(b)纵移;(c)升降;(d)偏航

Fig. 4 Relative error of calculation points of different numbers for mask sample on translation and rotation stage.
(a) Transverse shift; (b) longitudinal shift; (c) elevation and subsidence; (d) yaw

由实验结果可知,在全场有效计算点总数 M 不同、实际位姿求解的计算点数量 m 也不同、满足 ORNCP 条件下,4 个位姿参数的测量相对误差曲线较为稳定,且相对误差值较小,满足测量精度的要求。

本文还进行了不同位置的计算点对比实验,在 ROI 内固定选取 100 个计算点,选择 5 组不同位置的计算点集合分别求解位姿,并利用测量结果计算相对误差。

从图 6 可知,5 组计算得到的相对误差曲线差别较小,因此可得计算点位置的选择对测量结果的影响较小。

3.2 六自由度平台位姿测量实验

为了验证本文方法在空间目标六自由度运动状态下多位姿参数测量的适用性,本文进行了六自由度平台的位姿测量实验,分别求解 6 个位姿参数。

本实验所使用的六自由度平台参数如表 1 所示。实验通过双目视觉测量系统采集六自由度平台不同时刻的图像序列,将图像序列输入计算机,进行六自由度的位姿参数求解。

表 1 六自由度平台参数

Table 1 Parameters of six degree-of-freedom platform

Parameter	Value
Transverse shift range /mm	-25-25
Longitudinal shift range /mm	-25-25
Elevation and subsidence range /mm	-21-21
Pitching range /($^{\circ}$)	-20-20
Rolling range /($^{\circ}$)	-20-20
Yawing range /($^{\circ}$)	-20-20
Displacement positioning accuracy /mm	0.5
Angle positioning accuracy /($^{\circ}$)	0.5

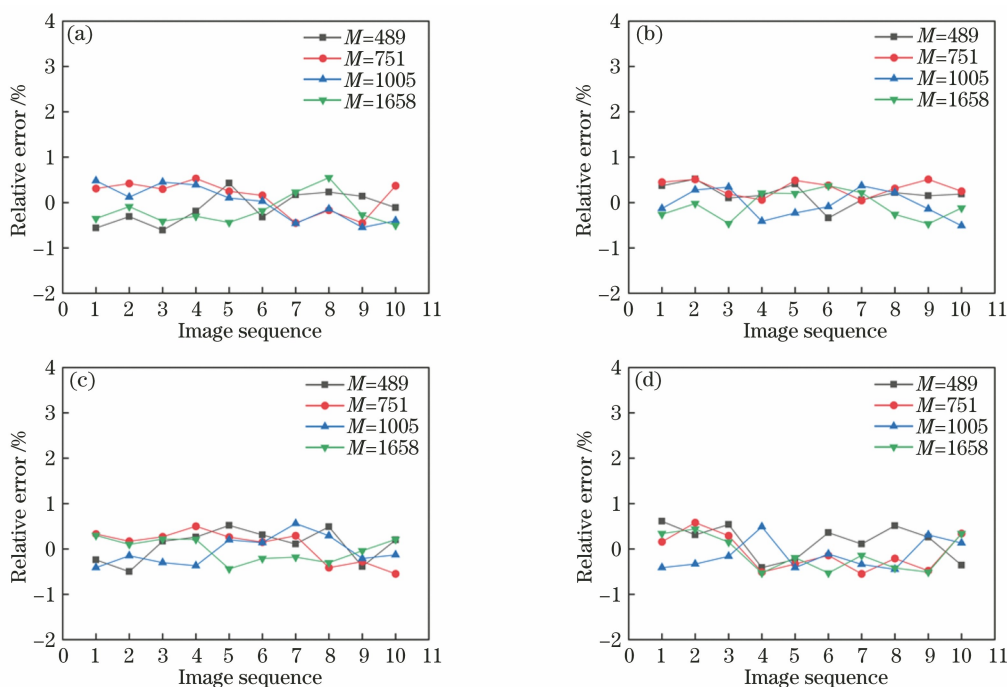


图 5 不同 M 下最优计算点数量测量结果相对误差。(a)横移;(b)纵移;(c)升降;(d)偏航

Fig. 5 Relative error of calculation points of optimal number for different M . (a) Transverse shift; (b) longitudinal shift; (c) elevation and subsidence; (d) yaw

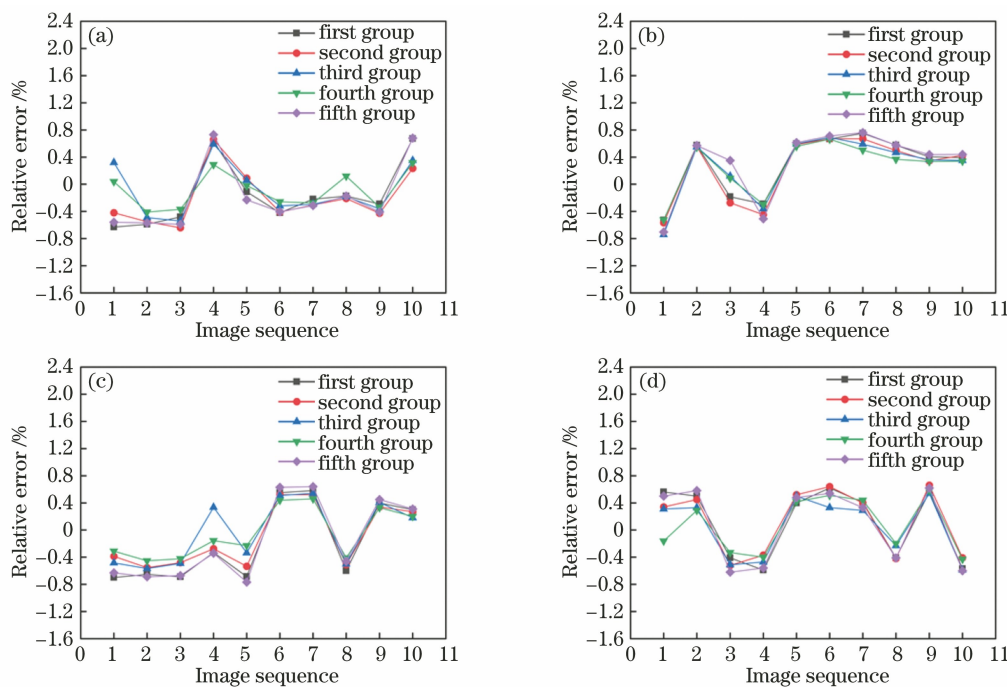


图 6 面具试样在位移旋转台实验中不同位置计算点的相对误差。(a)横移;(b)纵移;(c)升降;(d)偏航

Fig. 6 Relative error of calculation points at different positions for mask sample on translation and rotation stage.

(a) Transverse shift; (b) longitudinal shift; (c) elevation and subsidence; (d) yaw

六自由度平台位姿测量系统示意图如图 7 所示。

将复杂形貌特征的面具试样水平固定在六自由度平台上,从竖直方向进行图像采集并进行位姿测

量,如图 8 所示。

给定 10 组相同的位姿设定值并进行测量,结果如表 2 和表 3 所示。

从表 2 和表 3 可得,三个位移参数的测量值和

设定值之间的误差 ≤ 0.4 mm,三个角度参数的测量值和设定值之间的误差 $\leq 0.4^\circ$,符合定位精度的范围。

受所使用的六自由度平台本身的精度制约,测量得到的 6 个位姿参数值与设定数值之间存在一定的误差。但从利用六自由度平台对复杂形貌面具试样进行 6 个位姿参数测量的实验结果可知,横移、纵移、升降这 3 个位移参数以及俯仰、滚转、偏航这三

个旋转参数的误差均在六自由度平台的定位误差范围之内,因此所提方法同样适用于对六自由度平台的 6 个位姿参数的测量。

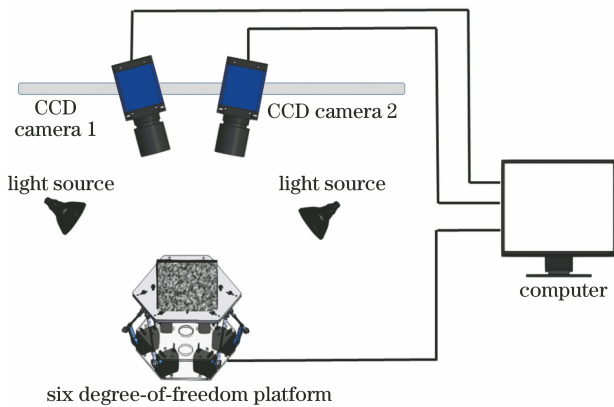


图 7 六自由度平台位姿测量系统示意图

Fig. 7 Schematic diagram of measurement system of position and pose of six degree-of-freedom platform

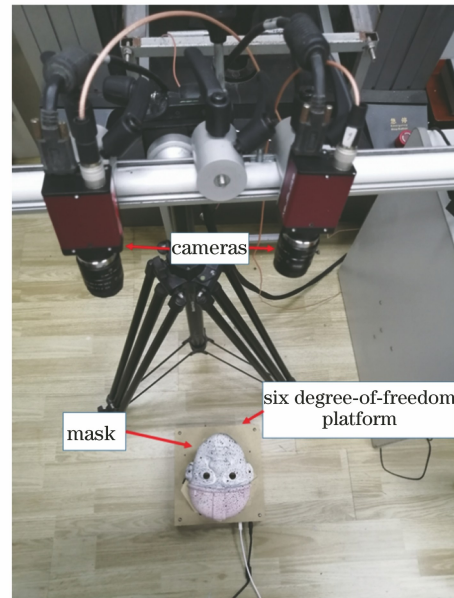


图 8 面具试样六自由度平台位姿测量系统

Fig. 8 Position and pose measurement system for mask sample on six degree-of-freedom platform

表 2 面具试样位移参数测量结果

Table 2 Measurement results of displacement parameters of mask sample

mm

Image sequence	Measurement value			Set value		
	Transverse shift	Longitudinal shift	Elevation and subsidence	Transverse shift	Longitudinal shift	Elevation and subsidence
1	-1.52	-2.65	-4.65	-1.7	-2.6	-4.6
2	-2.87	1.44	-0.61	-2.9	1.5	-0.5
3	-5.58	4.28	-2.27	-5.5	4.4	-2.1
4	-6.22	0.83	-5.20	-6.0	0.7	-5.0
5	-6.66	-2.96	-1.28	-6.8	-2.8	-1.4
6	-4.47	0.39	-3.92	-4.8	0.6	-3.8
7	-9.30	0.51	-3.16	-9.2	0.4	-3.1
8	9.88	-2.71	-9.34	10.0	-2.7	-9.3
9	13.61	-5.09	13.40	13.8	-5.2	13.2
10	6.61	-5.22	11.17	6.5	-5.3	11.2

表 3 面具试样旋转参数测量结果

Table 3 Measurement results of rotation parameters of mask sample

($^\circ$)

Image sequence	Measurement value			Set value		
	Roll	Pitch	Yaw	Roll	Pitch	Yaw
1	1.99	0.21	-0.36	1.9	0.3	-0.3
2	-1.16	3.11	-5.15	-1.0	3.2	-5.3
3	1.37	3.58	-4.04	1.7	3.8	-3.8
4	-2.55	3.41	-5.66	-2.3	3.3	-5.4
5	0.18	2.84	0.70	0.2	2.7	0.6
6	3.78	2.20	2.70	3.9	2.3	2.4
7	9.30	3.43	-4.90	9.1	3.2	-5.0
8	5.69	2.00	-0.53	5.7	2.1	-0.3
9	0.66	5.90	0.29	0.7	5.7	0.3
10	-8.73	9.29	7.20	-8.6	9.4	7.0

4 结 论

为了实现空间目标位姿的非接触式测量,采用 3D-DIC 实现了空间目标的位姿测量,并基于空间向量求解位姿参数。通过位移旋转台和六自由度平台位姿测量实验对所提方法进行验证,分别对具有复杂形貌特征的试样进行了三维重建并结合空间向量求解位姿,从而获得了 ORNCP 情况下的相对误差曲线;分析发现计算点位置的改变对实验结果的影响不明显。实验结果表明六自由度平台位姿测量结果在定位误差范围之内,这验证了所提出的空间目标位姿测量方法的有效性和准确性。

参 考 文 献

- [1] Yan H, He J F, Huang Q T, et al. Calibration of Stewart platforms using a coordinate measuring machine[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2007, 35(7): 11-14, 18.
延皓, 何景风, 黄其涛, 等. 基于三坐标测量仪的 Stewart 平台标定技术[J]. *机床与液压*, 2007, 35(7): 11-14, 18.
- [2] Zhang S P, Ding Y S, Hao K R, et al. Measurement of position and orientation of 6-DOF large load test platform based on stereo vision [J]. *Application Research of Computers*, 2008, 25(6): 1744-1746.
张淑平, 丁永生, 郝矿荣, 等. 基于立体视觉六自由度大载荷实验平台的位姿检测[J]. *计算机应用研究*, 2008, 25(6): 1744-1746.
- [3] Zhang Y S, Zhang L Z, Meng L X, et al. The static test scheme design about six degrees of freedom swaying platform [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 38(3): 55-59.
张宇深, 张立中, 孟立新, 等. 六自由度摇摆台检测方案设计[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2015, 38(3): 55-59.
- [4] Ma J, Zhang G F, Dai S L, et al. Kinematic calibration of Stewart platform based on relative visual pose[J]. *Journal of System Simulation*, 2016, 28(9): 2267-2274.
马瑾, 张国峰, 戴树岭, 等. 基于相对视觉位姿的 Stewart 平台运动学标定[J]. *系统仿真学报*, 2016, 28(9): 2267-2274.
- [5] Cheon W, Cho J, Ahn S H, et al. High-precision quality assurance of robotic couches with six degrees of freedom[J]. *Physica Medica*, 2018, 49: 28-33.
- [6] Li D P, Liu N, Guo Y L, et al. 3D object recognition and pose estimation for random bin-picking using partition viewpoint feature histograms [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2019, 128: 148-154.
- [7] Li Y Q, Lu M T, Ma J M, et al. Research on angular position measurement accuracy of 6-DOF platform[J]. *Navigation and Control*, 2020, 19(3): 78-85.
李永强, 卢明涛, 马建明, 等. 六自由度平台角位置测量精度方法[J]. *导航与控制*, 2020, 19(3): 78-85.
- [8] Zhou J, Liu Y P, Liu J S, et al. BOLD3D: a 3D BOLD descriptor for 6DOF pose estimation [J]. *Computers & Graphics*, 2020, 89: 94-104.
- [9] Yang W J, Liu X J, Guo X T, et al. A method for simultaneously measuring 6DOF geometric motion errors of a precision rotary stage based on absolute position-distance measurement [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 138: 106420.
- [10] Li G H, Ma W L, Zhu T T, et al. Thermal deformation measurement of hollow disk based on digital image correlation method [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(14): 1412003.
李桂华, 马万龙, 朱天天, 等. 基于数字图像相关方法的空心圆盘热变形测量[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(14): 1412003.
- [11] Wang X B, Dong W, Yang M, et al. Inhomogeneous strain measurement based on least absolute deviation fitting for digital image correlation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(3): 0312001.
王学滨, 董伟, 杨梅, 等. 基于最小一乘拟合的非均匀应变的数字图像相关测量[J]. *光学学报*, 2020, 40(3): 0312001.
- [12] Du J X, Zhao J Q, Wang H T, et al. Regularized global digital image correlation method for crack tip deformation field measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(11): 1112001.
杜鉴昕, 赵加清, 王海涛, 等. 一种针对裂尖变形场测量的正则化全局 DIC 方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(11): 1112001.
- [13] Pan J Y, Zhang S Q, Su Z L, et al. Measuring three-dimensional deformation of underwater propellers based on digital image correlation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(12): 1212001.
潘济宇, 张水强, 苏志龙, 等. 基于数字图像相关的水下螺旋桨三维变形测量[J]. *光学学报*, 2021, 41(12): 1212001.
- [14] Wang L P, Bi S L, Li H, et al. Fast initial value estimation in digital image correlation for large rotation measurement [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 127: 105838.
- [15] Zhang X C, Chen J L, Wang Z T, et al. Digital image correlation using ring template and quadrilateral element for large rotation measurement

- [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(7): 922-928.
- [16] Zhong F, Quan C. Digital image correlation in polar coordinate robust to a large rotation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 98: 153-158.
- [17] Zhou Y H, Pan B, Chen Y Q. Large deformation measurement using digital image correlation: a fully automated approach[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(31): 7674-7683.
- [18] Chen Z N, Shao X X, Xu X Y, et al. Optimized digital speckle patterns for digital image correlation by consideration of both accuracy and efficiency[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(4): 884-893.
- [19] Pan B, Xie H M, Wang Z Y. Equivalence of digital image correlation criteria for pattern matching [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(28): 5501-5509.
- [20] Tong W. An evaluation of digital image correlation criteria for strain mapping applications [J]. *Strain*, 2005, 41(4): 167-175.
- [21] Lin L X, Li C. Method of measurement in the stage of final approaching for rendezvous and docking in space[J]. *Journal of Astronautics*, 1994, 9(2): 24-34.
- 林来兴, 李灿. 交会对接最后逼近阶段 CCD 相机的测量方法[J]. *宇航学报*, 1994, 9(2): 24-34.
- [22] Lowe D G. Object recognition from local scale-invariant features [C]//*Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, September 20-27, 1999, Kerkyra, Greece. New York: IEEE Press, 1999: 1150-1157.
- [23] Tiwari R K, Verma G K. Notice of removal: a computer vision based framework for visual Gun detection using SURF [C]//*2015 International Conference on Electrical, Electronics, Signals, Communication and Optimization (EESCO)*, January 24-25, 2015, Visakhapatnam, India. New York: IEEE Press, 2015: 15452172.
- [24] Debella-Gilo M, Käab A. Sub-pixel precision image matching for measuring surface displacements on mass movements using normalized cross-correlation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(1): 130-142.
- [25] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.