

基于三维数字图像相关法的刚体位姿估计

王永红^{1,2}, 陈婉琳^{1,2}, 侯冰菲^{1,2}, 王标^{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 针对传统位姿测量的不足,提出了一种基于三维数字图像相关(3D-DIC)法的空间刚体位姿估计方法,该方法利用双目相机拍摄待测物运动前后的图像序列,通过3D-DIC方法进行匹配计算,获得待测物运动前后的全场坐标信息,选择计算点坐标后对其进行奇异值分解,求得位姿参数。针对3D-DIC在测量大旋转时误差较大的情况,提出了一种增加中间图像的匹配计算方法。通过平移自由度和旋转自由度的实验验证,本文方法可实现空间刚体多个位姿参数的测量,三个平移自由度的测量误差均小于0.07 mm,测量角度小于10°时,偏航角和滚转角的测量误差均小于0.2°。

关键词 测量; 数字图像相关法; 位姿估计; 六自由度

中图分类号 TN247

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231608

1 引言

在三维空间中,位姿是描述物体位置和姿态的重要指标。其中位置是指物体相对于三维参考坐标系所处的坐标点位,一般用三维坐标 (x, y, z) 表示。姿态是指物体所在坐标系相对于三维参考坐标系三轴的旋转角度,一般称之为偏航角、俯仰角、滚转角。因此,位姿是描述物体在空间中的位置和运动状态的两项基本参数,在无人机着陆、机器人抓取、自动驾驶、工业监测、卫星对接等方面具有重要的研究价值。目前常用的位姿测量系统有基于机械、激光跟踪仪、惯性单元、视觉等的位姿估计系统。

基于机械的位姿估计系统常采用机械结构定位及与传感器协同的方式进行位姿测量。Varela等^[1]利用拉线位移传感器设计了Cassin跟踪系统,进行人体行走时的腿部姿态测量。但机械法通常需要与被测物接触,具有很大的局限性。基于激光的位姿测量系统通常利用激光的波长、相位以及自准直特性来进行多维自由度的测量。张国雄等^[2]基于多边法原理,采用四路激光追踪干涉仪,设计了柔性坐标测量系统,完成了对目标点三维坐标的测量。由风玲^[3]提出了一种共路光束漂移补偿的方法,该方法可应用于基于激光自准直的五自由度同时测量系统,补偿了激光光束漂移对测量的影响,提高了五自由度同时测量的精度。Liu等^[4]研制了一种多自由度激光直线编码器,利用衍射光的相位和空间信息,可同时测量直线台的位置、直线

度以及三个旋转自由度误差。基于激光的位姿估计系统通常光路复杂,需要靶标协同,且易受环境光的干扰。王忠宾等^[5]将惯性单元固定在钻孔机器人上,获得不同运动轴的加速度和角速度信息,以此来解算机器人位姿。基于惯性单元的位姿测量系统易受温度和零漂等因素的影响,通常需要和其他传感器相结合。Zhao等^[6]将惯性测量单元与激光相结合,融合二者测量数据,实现高速公路环境的鲁棒姿态估计。但是多模块测量系统的标定更为复杂,且随着时间的推移会产生累积误差。基于视觉的位姿估计也是目前常用的测量技术途径,Zhao等^[7]利用光流法结合关键帧策略对特征点进行跟踪,采用卡尔曼滤波进行姿态优化,提出了一种三相机系统姿态估计方法,解决了有重叠视图的三相机系统的姿态估计问题。Yin等^[8]引入了一种图卷积神经网络的方法,通过单张RGB-D图像来估计物体的六自由度参数,该方法融合了物体的形貌特征和点云数据的几何特征来预测像素级位姿。李江杰等^[9]提出了一种基于单目视觉和彩色纹理编码球体的空间位姿测量方案,利用单相机测量目标颗粒的空间位姿参数。基于视觉的位姿测量系统易受光照变化的影响,且物体表面特征点的数量和位置极大地影响测量精度。

数字图像相关(DIC)法作为一种光学测量方法^[10],具有光路简单、非接触测量、精度高且对测量环境要求低等优点,已成为位移^[11]、应变^[12]、材料力学性能^[13]等的热门测量技术,广泛运用于生物^[14]、航空航

收稿日期: 2023-09-28; 修回日期: 2024-01-06; 录用日期: 2024-02-05; 网络首发日期: 2024-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(52375536, 52205562)、江西省重点研发计划(20223BBE51010)

通信作者: *wangbiao@hfut.edu.cn

天^[15]等领域,但在位姿方面的应用研究还较少。王永红等^[16]提出的基于数字图像相关法的位姿测量方法,以常用的空间向量法进行位姿解算,需要通过反正切函数求得旋转角,这会带来一定的误差,且需要的计算点数目较多。

针对传统位姿测量方法的不足,本文提出一种基于三维数字图像相关法的位姿估计,通过三维数字图像相关法进行特征点匹配,并获得一组特征点的三维空间坐标,再通过奇异值分解(SVD)解算出运动前后的旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移向量 \mathbf{t} ,从而求得待测物的位姿参数。同时针对 3D-DIC 在测量大旋转变形时误差较大的问题,提出了一种增加中间图像的累积匹配计算方法。通过平移自由度和旋转自由度测量实验验证了本文方法的可行性和精度。

2 基本原理

2.1 数字图像相关法测量原理

数字图像相关法是一种非接触式的光学测量方法,通过追踪被测物变形前后的表面散斑图案,实现测量被测物表面的全场位移和应变。数字图像相关的原理如图 1 所示,在参考图像上任意选择一个起始计算点 P_0 ,并以此为中心建立边长为 $(2M+1) \times (2M+1)$ 的参考子集。作为参考子集,使用相关函数在变形图像中寻找相关性最大的区域,将其作为与参考子集相匹配的目标子集。目标子集的中心点 P_1 即为变形图

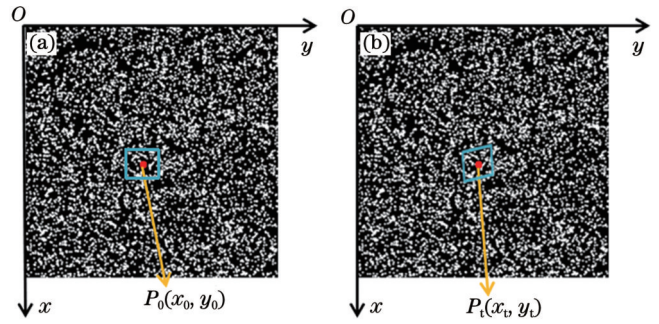


图 1 数字图像相关法的基本原理。(a)参考图像;(b)变形图像
Fig. 1 Principle of DIC. (a) Reference image; (b) deformed image

像上与种子点 P_0 相对应的点。通过种子点变形前后的坐标变化,即可获得种子点的位移。

3D-DIC 是将二维数字图像相关与立体视觉系统相结合的三维测量方法,用于获取被测物的三维信息。原理图如图 2 所示,其中 k 为不同时刻拍摄的物体运动图像序列的序号, $k=2, 3, \dots$ 。匹配过程分为两步:第一步是立体匹配,即对同一时刻下左右相机拍摄的图片上的待测点进行匹配;第二步是时序匹配,是利用左右单个相机在物体变形过程中对不同时刻拍摄的图像序列进行待测点匹配。立体匹配确定待测点在左右图像上的对应点,用于获得待测点的三维信息。时序匹配用于确定待测点在同一视角下的位置变化,结合立体匹配,即可获得不同时刻下待测点的三维运动信息。

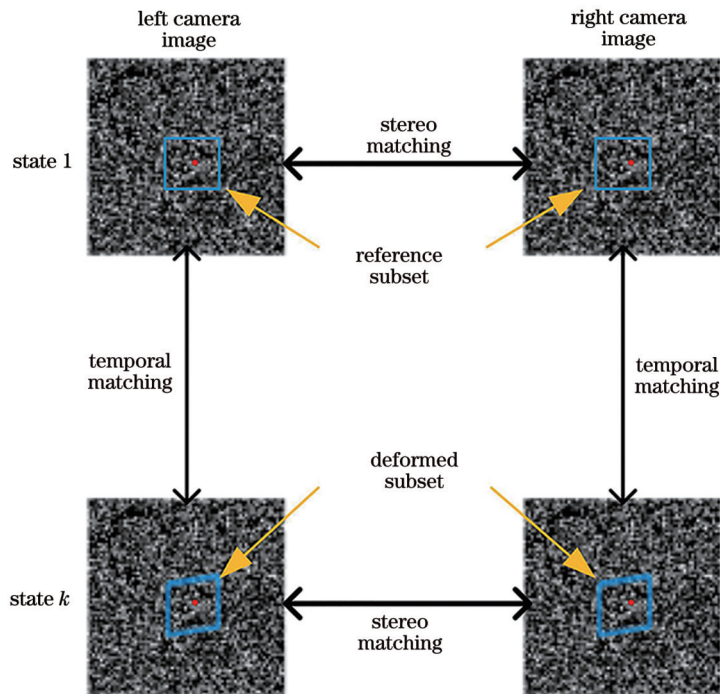


图 2 三维数字图像相关法工作原理图

Fig. 2 Principle of 3D-DIC

目前常用的相关函数有互相关函数、归一化互相关函数、零均值归一化互相关函数 (C_{ZNCC})、零均值归

一化差值平方和函数 (C_{ZNSSD}),其中, C_{ZNCC} 与 C_{ZNSSD} 受图像亮度的影响较小,且二者具有线性等价关系^[17],因

此本文选用 C_{ZNSSD} 作为相关函数,其表达式为

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

式中: i 和 j 分别为像素点的横纵坐标值; (x_i, y_i) 为参考子区像素点坐标; (x'_i, y'_j) 为目标子区像素点坐标; $f(x_i, y_i)$ 和 $g(x'_i, y'_j)$ 分别为参考子区和目标子区中的像素点的灰度值; \bar{f} 和 \bar{g} 分别为参考子区和目标子区的灰度平均值; C_{ZNSSD} 的取值范围为 $(0, 1)$, C_{ZNSSD} 的值越接近 0, 说明参考子区与变形子区的相关性越强。

2.2 基于 SVD 的位姿解算原理

通过 2.1 节对三维数字图像相关法的描述, 可以获得运动前后特征点在世界坐标系下的两组空间三维坐标集合, 那么基于数字图像相关的刚体位姿估计问题可以转化成已知两组匹配好的 3D 点坐标求解相邻时刻的运动变换参数问题, 设物体运动前后两组特征点坐标分别为 $\mathbf{P} = \{\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_n\}$ 和 $\mathbf{Q} = \{\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \dots, \mathbf{q}_n\}$, 其中 n 为特征点数量, 求解位姿即求解变换矩阵 \mathbf{R} :

$$\mathbf{q}_m = \mathbf{R}\mathbf{p}_m + \mathbf{t}, \quad (2)$$

式中: m 为特征点序号, $m=1, 2, \dots, n$; \mathbf{p}_m 为物体运动前的第 m 个特征点的坐标; \mathbf{q}_m 为物体运动后的第 m 个特征点的坐标; \mathbf{R} 为描述运动前后姿态的旋转矩阵, 包含三个旋转位移量; \mathbf{t} 为描述运动前后的平移向量, 包含三个平移位移量。

通过构建最小二乘法方程来寻找最优的变换矩阵, 使误差平方和达到最小时对应的 \mathbf{R} 、 \mathbf{t} 满足

$$(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \arg \min_{\mathbf{R} \in \text{SO}(3), \mathbf{t} \in \mathbf{R}^3} \sum_{m=1}^n W_m \|\mathbf{R}\mathbf{p}_m + \mathbf{t} - \mathbf{q}_m\|^2, \quad (3)$$

式中: $\text{SO}(3)$ 代表三维矩阵; \mathbf{R}^3 代表三维向量。

根据式(3)定义 $F(\mathbf{t})$ 为需要优化的误差函数:

$$F(\mathbf{t}) = \|\mathbf{R}\mathbf{p}_m + \mathbf{t} - \mathbf{q}_m\|^2. \quad (4)$$

将式(4)两边对 $F(\mathbf{t})$ 求导, 可以得到

$$0 = \frac{\partial F}{\partial \mathbf{t}} = \left| \sum_{m=1}^n 2(\mathbf{R}\mathbf{p}_m + \mathbf{t} - \mathbf{q}_m) \right| = \left| 2\mathbf{t} + 2\mathbf{R} \sum_{m=1}^n \mathbf{p}_m - 2 \sum_{m=1}^n \mathbf{q}_m \right|. \quad (5)$$

定义两组点的质心: $\mathbf{q} = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \mathbf{q}_m$, $\mathbf{p} = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \mathbf{p}_m$

将质心代入式(5)得到

$$\mathbf{t} = \mathbf{q} - \mathbf{R}\mathbf{p}. \quad (6)$$

同时可以定义两组点的去质心坐标: $\mathbf{a}_m = \mathbf{p}_m - \mathbf{p}$, $\mathbf{b}_m = \mathbf{q}_m - \mathbf{q}$ 。因此式(3)可以进一步化简为

$$\mathbf{R} = \arg \min_{\mathbf{R}} \sum_{m=1}^n \|\mathbf{R}\mathbf{a}_m - \mathbf{b}_m\|^2. \quad (7)$$

因为

$$\begin{aligned} \|\mathbf{R}\mathbf{a}_m - \mathbf{b}_m\|^2 &= (\mathbf{R}\mathbf{a}_m - \mathbf{b}_m)(\mathbf{R}\mathbf{a}_m - \mathbf{b}_m) = \\ &= (\mathbf{a}_m^T \mathbf{R}^T - \mathbf{b}_m^T)(\mathbf{R}\mathbf{a}_m - \mathbf{b}_m) = \\ &= \mathbf{a}_m^T \mathbf{a}_m - 2\mathbf{b}_m^T \mathbf{R}\mathbf{a}_m + \mathbf{b}_m^T \mathbf{b}_m, \end{aligned} \quad (8)$$

代入整理式(7)可得

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \arg \min_{\mathbf{R}} \sum_{m=1}^n \|\mathbf{R}\mathbf{a}_m - \mathbf{b}_m\|^2 = \\ &= \arg \max_{\mathbf{R}} \sum_{m=1}^n \mathbf{b}_m^T \mathbf{R}\mathbf{a}_m. \end{aligned} \quad (9)$$

SVD 是一种重要的矩阵分解技术, 该技术将一个矩阵分为三个矩阵的乘积。相机的外参标定也需用到 SVD, 基于极线约束的外参标定是对本质矩阵进行 SVD 并求得相机的外参矩阵, 通常前提是需要两张图片的 8 个以上的对应点, 通过 8 点法求解线性方程组, 进而求得基础矩阵。本文应用 SVD 来进行旋转矩阵 \mathbf{R} 的求解, 只需要两组点的去质心坐标, 每组包含 3 个点即可。

定义矩阵 $\mathbf{S} = \sum_{m=1}^n \mathbf{b}_m^T \mathbf{a}_m$, 对 \mathbf{S} 进行 SVD 分解:

$$\mathbf{S} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T, \quad (10)$$

式中: $\mathbf{\Sigma}$ 为奇异值组成的对角矩阵; \mathbf{U} 、 \mathbf{V} 为对角矩阵, 当 \mathbf{S} 满秩时, 有

$$\mathbf{R} = \mathbf{U}\mathbf{V}^T, \quad (11)$$

求得旋转矩阵 \mathbf{R} , 按式(6)可求得平移向量 \mathbf{t} 。

通常定义绕 X 轴的转角为滚转角 α , 绕 Y 轴的转角为俯仰角 β , 绕 Z 轴的转角为偏航角 γ 。则旋转矩阵 \mathbf{R} 可以视为绕三个旋转轴旋转的基础旋转矩阵 \mathbf{R}_x 、 \mathbf{R}_y 、 \mathbf{R}_z 的复合矩阵。

$$\left\{ \begin{aligned} \mathbf{R}_x &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}_y &= \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}_z &= \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \right. \quad (12)$$

规定旋转方向依次为绕 x 轴、 y 轴、 z 轴, 则旋转矩阵 \mathbf{R} 可以表示为

$$\begin{aligned}
 \mathbf{R} = \mathbf{R}_z \mathbf{R}_y \mathbf{R}_x &= \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} = \\
 & \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \beta & -\sin \gamma \cos \alpha + \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha & \sin \gamma \sin \alpha + \cos \gamma \sin \beta \cos \alpha \\ \sin \gamma \cos \beta & \cos \gamma \cos \alpha + \sin \gamma \sin \beta \sin \alpha & -\cos \gamma \sin \alpha + \sin \gamma \sin \beta \cos \alpha \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix}. \quad (13)
 \end{aligned}$$

由式(13)可得旋转矩阵的每个元素都由三个旋转角的三角函数组成,则三个旋转角可表示为

$$\begin{cases} \alpha = \arctan \frac{R(3,2)}{R(3,3)} \\ \beta = \arctan \frac{-R(3,1)}{\sqrt{[R(3,2)]^2 + [R(3,3)]^2}} \\ \gamma = \arctan \frac{R(2,1)}{R(1,1)} \end{cases} \quad (14)$$

按式(14)即可求得滚转角、俯仰角和偏航角。

3 基于数字图像相关的位姿测量方案

基于 DIC 的位姿估计系统图如图 3 所示,将设置人工喷涂散斑图案的待测物固定于运动平台上,在由平台控制待测物进行空间运动的同时,通过左右相机拍摄待测物运动前后的图像序列并将其传输到计算机,进行图像匹配,计算后获得特征点运动前后的三维坐标,接着进行位姿解算,从而得到运动目标的位姿参数。

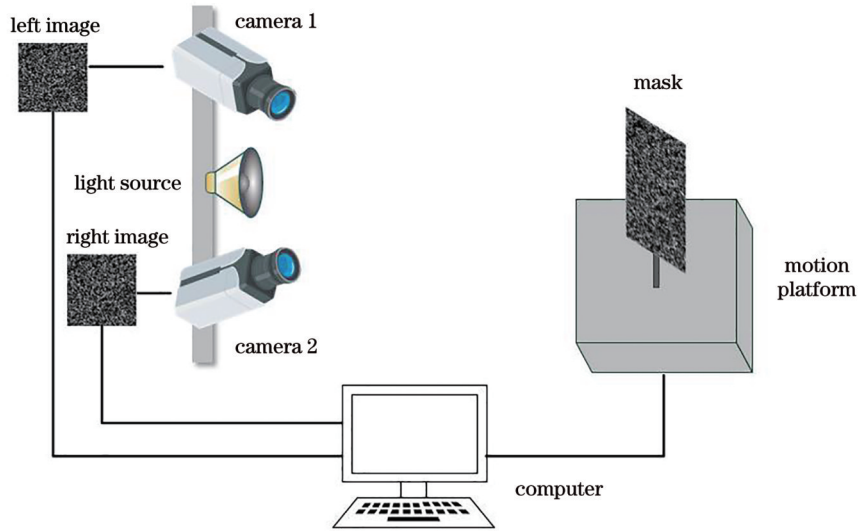


图 3 基于数字图像相关法的位姿估计系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of pose estimation system based on DIC

基于数字图像相关法的位姿估计方案如图 4 所示。为了获取两相机的内外参数,通过棋盘格标定板

进行相机标定,标定完成后,利用双目相机进行拍摄,获得物体运动的图像序列,接着进行左右相机的立体

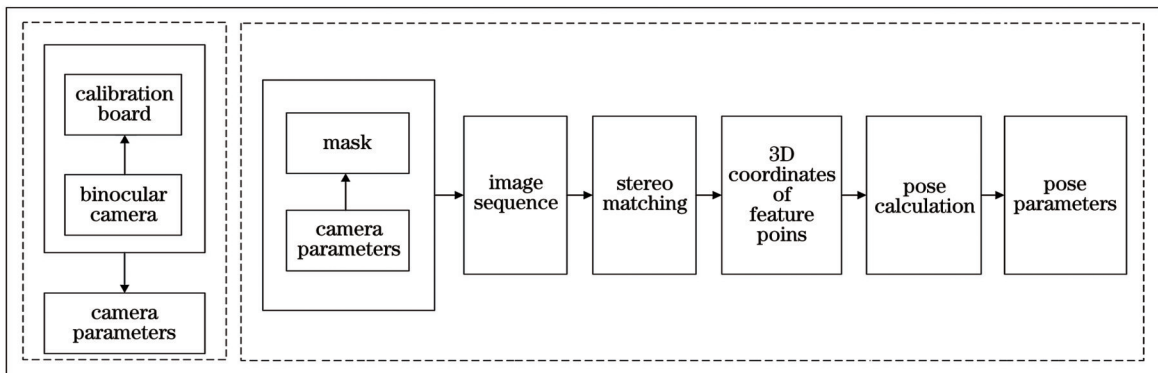


图 4 基于数字图像相关法的位姿估计系统流程图

Fig. 4 Flow chart of pose estimation system based on DIC

匹配,获得特征点在两个相机下的图像坐标,利用标定参数及极线约束获得特征点的空间三维坐标,基于 DIC 的位姿测量技术,根据需要选择特征点数量,至少需要选择三个点,获得待测物运动前后两组特征点坐标后,即可通过奇异值分解的方法求得待测物的位姿参数。

4 实验

本文实验选择经典的张正友标定法^[18]来获取相机

参数,选用的棋盘格方格阵列大小为 11×11 ,方格边长为 10 mm。选用的左右相机镜头焦距均为 $f_0 = 50$ mm,分辨率均为 $2452 \text{ pixel} \times 2056 \text{ pixel}$ 。先固定左右相机的位置,通过左右相机拍摄多张不同位姿的棋盘格标定图像,计算获得标定板角点的图像坐标以及对应的三维空间坐标,从而获得相机的内外参数,标定结果如表 1 所示,其中 f_1 为相机 1 的焦距, f_2 为相机 2 的焦距, k_1 、 k_2 分别为相机 1 和相机 2 的径向畸变系数矩阵。

表 1 相机标定结果

Table 1 Results of camera calibration

Camera parameter	Result	
	Camera 1	Camera 2
Focal length /mm	$f_1 = 49.745$	$f_2 = 50.121$
Radial distortion parameters	$k_1 = [-0.285, 0.931]^T$	$k_2 = [-0.386, -0.826]^T$
Extrinsic parameter matrix	$R = \begin{bmatrix} 0.991 & 0.003 & -0.127 \\ -0.001 & 0.999 & 0.017 \\ 0.127 & -0.016 & 0.991 \end{bmatrix}$ $t = [181.677, 0.544, 27.981]$ $T = [181.677, 0.544, 27.981]$	

4.1 平移自由度测量实验

平移自由度测量实验系统的硬件组成包括两个 CCD 相机、照明光源、相机支架、计算机、被测试件和位移平台,实验装置如图 5 所示。实验采用的位移平台为 CDHCGGM-4111,分辨率为 0.0005 mm。横移平移自由度实验过程中,在初始位置拍摄一张图像后,

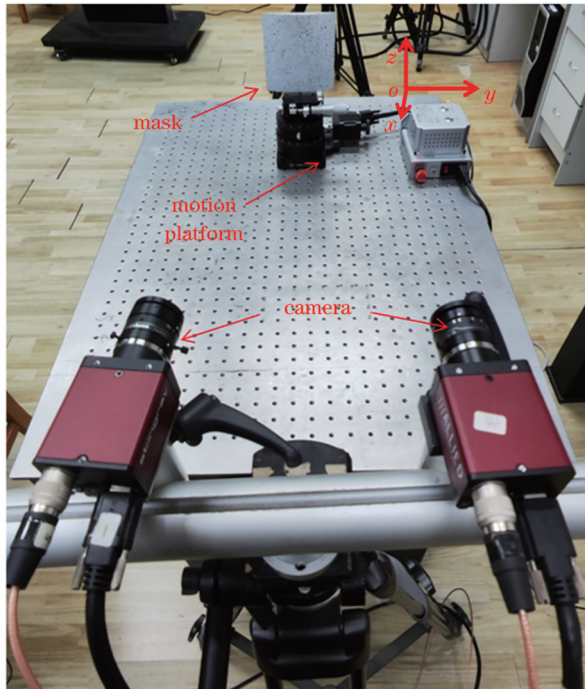


图 5 测量系统实物图

Fig. 5 Physical diagram of measurement system

位移平台每次沿图 5 中坐标系所示 x 轴方向移动 0.5 mm,两个 CCD 相机同时采集被测试件图像,以被测物未移动位置和姿态作为初始位姿,得到每次移动后的位姿测量结果。按照同样的测量方式和步骤,再次测量 y 轴和 z 轴的平移自由度。三个方向的平移自由度测量结果如图 6 所示。

由图 6 可知,三个平移自由度横移、纵移、升降的绝对误差均小于 0.07 mm,相对误差均小于 0.3%,本文所提方法可以实现三个平移自由度的测量,精度满足测量需求。

4.2 旋转自由度测量实验

将待测试件固定在旋转实验平台上进行旋转自由度的测量。实验采用的位移旋转台的分辨率为 0.0005° ,首先进行偏航角的测量,控制位移旋转台绕图 5 所示的 z 轴以 $1^\circ/\text{s}$ 的速度旋转,每次的旋转角度为 1° ,以初始静止状态为初始位姿,每次旋转 1° 后,两个 CCD 相机同时采集图像序列,进行偏航角计算,共采集了 8 组数据,获得偏航角的计算结果如图 7 所示。

由图 7 可知,测量范围在 $0^\circ \sim 8^\circ$ 时,偏航角的绝对误差小于 0.2° ,相对误差小于 3%。

采用同样的实验设备进行滚转角测量实验,调整相机与待测物的位置,如图 8 所示,控制运动平台绕图 8 所示的坐标系 x 轴顺时针旋转,以初始静止状态为初始位姿,每次旋转 2° 后,两个 CCD 相机同时采集图像序列并进行滚转角计算,同样采集了 8 组数据,获得滚转角的计算结果如图 9 所示。

由图 9 可知,滚转角在测量范围小于 10° 时测量的

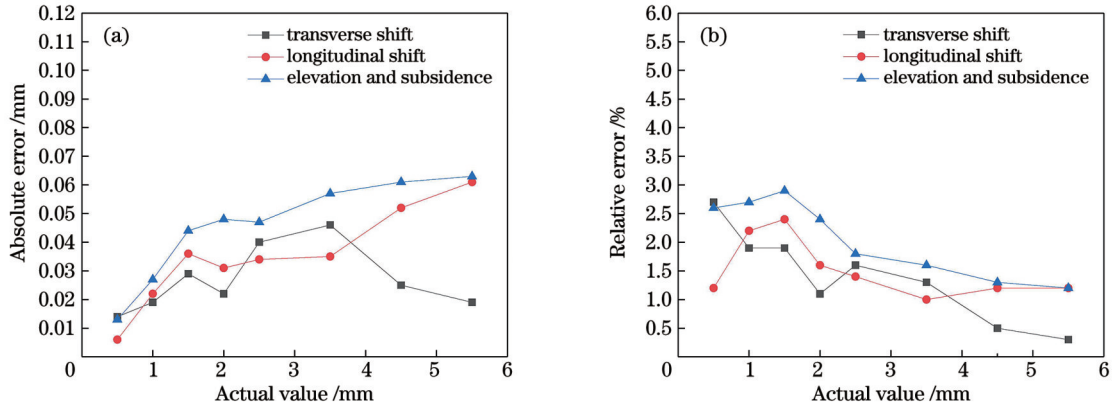


图 6 三个平移自由度测量结果。(a)绝对误差;(b)相对误差

Fig. 6 Measurement results of three translational degrees of freedom. (a) Absolute error; (b) relative error

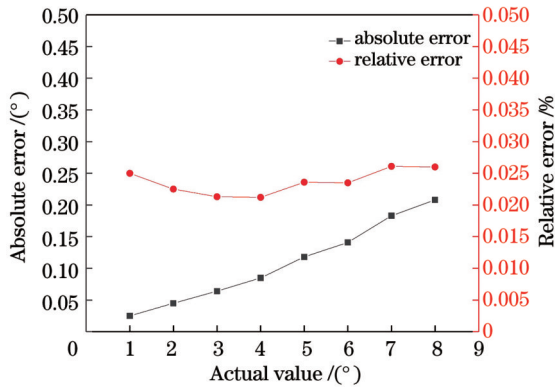


图 7 偏航角测量结果

Fig. 7 Measurement results of yaw angle

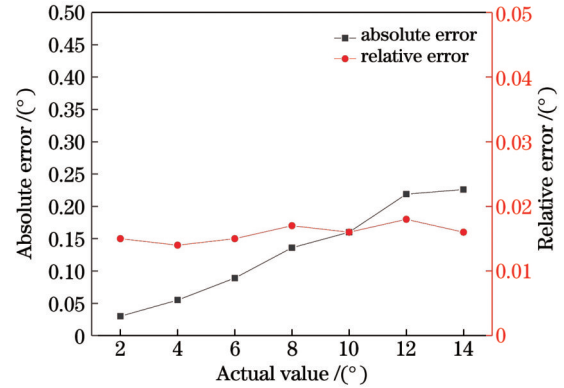


图 9 滚转角测量结果

Fig. 9 Measurement results of roll angle

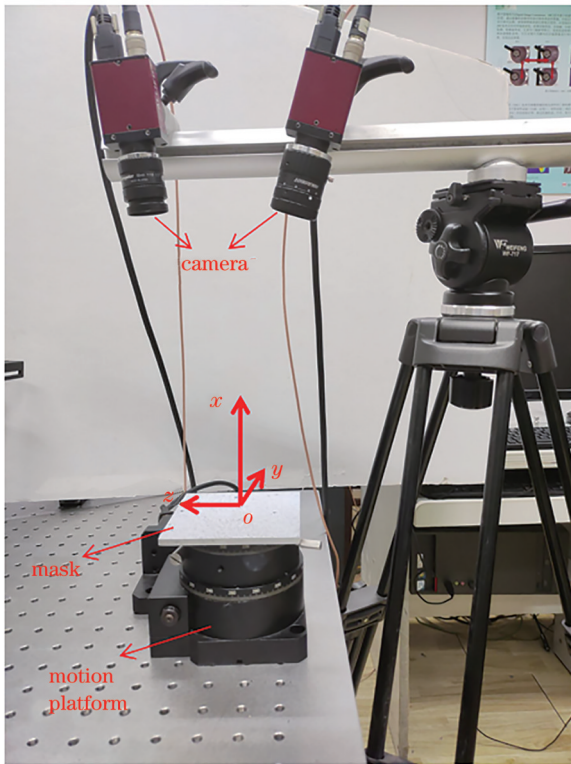


图 8 滚转角测量实验图

Fig. 8 Experimental diagram of roll angle measurement

绝对误差小于 0.20° , 相对误差小于 2%, 由于滚转角是面内旋转角, 所以滚转角的测量精度略高于偏航角。

4.3 大角度测量实验

传统 DIC 在测量大旋转或者大变形的物体运动时, 会出现退相关现象, 使得测量误差较大或者无法匹配。实验中也发现: 当旋转角度大于 10° 时, 测量误差明显增大, 针对这种情况, 提出了一种增加中间图像的方式, 即在物体运动过程中拍摄多张图像。原来的匹配计算方式是对运动前后的两组图像进行匹配计算, 改进后对多组图像中的相邻时刻图像两两进行匹配计算, 将针对相邻图像计算出的位姿参数进行累计, 以一组图像序列的累加结果作为最终的角度测量结果。以偏航角测量为例, 大角度实验测量结果如图 10 所示。

由图 9 可知, 改进后的大角度测量方法明显改善了 10° 以上的角度测量结果, 测量误差明显减小。改善后的测量方法在 20° 测量范围以内时, 绝对误差小于 0.33° , 相对误差小于 2%, 基本在 1.6% 左右, 测量系统比较稳定。

4.4 精度对比实验

采用上述实验中的相同设备和实验步骤, 将本文方法与已有的空间向量法^[13]进行了一组位姿估计的精度对比测量实验, 对比实验的计算流程如图 11 所示。

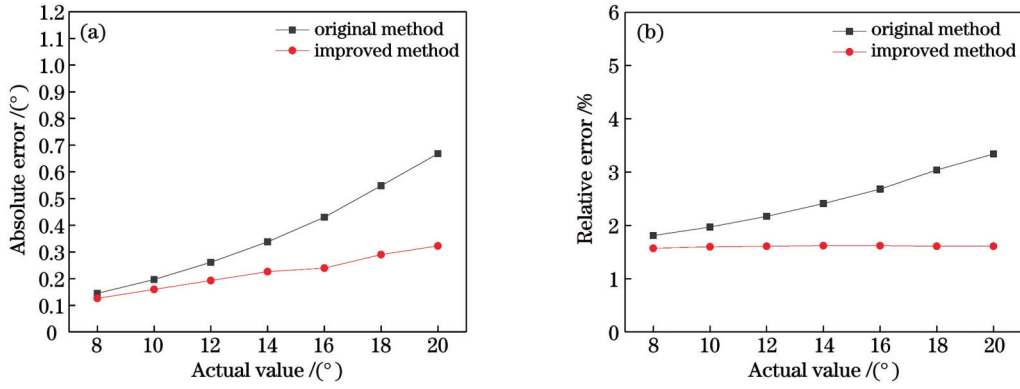


图 10 原始方法与改进方法的大角度测量结果。(a)绝对误差;(b)相对误差

Fig. 10 Measurement results of large angle of original and improved methods. (a) Absolute error; (b) relative error

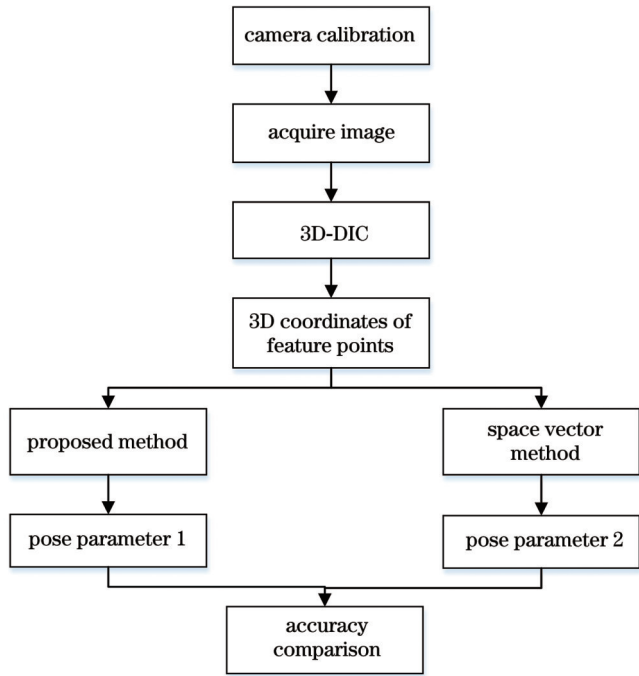


图 11 对比实验流程图

Fig. 11 Flow chart of comparison experiment

其中本文计算点选择为 3 个点,空间向量法的计算点选择为其最佳计算点数,即 100 个点。5 个自由度在两种方法下的测量结果如表 2 所示。

表 2 本文方法与空间向量法的对比

Table 2 Comparison between proposed method and space vector method

Pose parameter	Absolute error	
	Proposed method	Space vector method
Transverse shift /mm	0.04	0.04
Longitudinal shift /mm	0.03	0.02
Elevation and subsidence /mm	0.05	0.06
Yaw angle / (°)	0.21	0.32
Roll angle / (°)	0.20	0.26

由表 2 中的测量结果可见,本文方法在横移、纵移、升降三个平移自由度测量方面,与空间向量法的测量精度基本一致。在偏航角和滚转角两个旋转自由度方面,本文方法相较于空间向量法,测量精度得到明显提高。本文方法采用的奇异值分解法相较于空间向量法,减小了测量误差。且本文所用计算点仅为 3 个,计算速率更高。

5 结 论

相对于传统位姿测量方法,所提方法具有非接触、高精度、光路简单等优点。三个平移自由度的测量实验结果验证了本文提出的基于 3D-DIC 的位姿测量系统适用于刚体空间平移自由度的测量;大角度测量实验验证了提出的增加中间图像的改进匹配计算方法对大角度测量误差有明显的改善,偏航角和滚转角的测量结果说明本测量系统同样适用于大小角度的旋转自由度位姿测量;采用本文方法与空间向量法进行了精度对比实验,结果表明本文方法得到的旋转自由度的测量误差更小,且需要的计算点更少。综上所述,本文提出的基于 3D-DIC 的位姿测量系统适用于空间刚体位姿测量,且测量精度较高,满足测量需求。

参 考 文 献

- [1] Varela M J, Ceccarelli M, Flores P. A kinematic characterization of human walking by using CaTraSys[J]. Mechanism and Machine Theory, 2015, 86: 125-139.
- [2] 张国雄, 林永兵, 李杏华, 等. 四路激光跟踪干涉三维坐标测量系统[J]. 光学学报, 2003, 23(9): 1030-1036. Zhang G X, Lin Y B, Li X H, et al. Four-beam laser tracking interferometer system for three-dimensional coordinate measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(9): 1030-1036.
- [3] 由凤玲. 基于共路光束漂移补偿的五自由度误差同时测量方法的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010. You F L. Study of five-degree-of-freedom errors simultaneous measurement method based on common-path compensation for beam drift[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [4] Liu C H, Cheng C H. Development of a grating based multi-degree-of-freedom laser linear encoder using diffracted light[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2012, 181: 87-93.
- [5] 王忠宾, 司垒, 王浩, 等. 基于空间阵列式惯性单元的防冲钻

- 孔机器人位姿解算方法[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 598-610.
- Wang Z B, Si L, Wang H, et al. Position and attitude calculation method of anti-impact drilling robot based on spatial array inertial units[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 598-610.
- [6] Zhao S B, Fang Z, Li H L, et al. A robust laser-inertial odometry and mapping method for large-scale highway environments[C]//2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), November 3-8, 2019, Macau, China. New York: IEEE Press, 2019: 1285-1292.
- [7] Zhao C H, Fan B, Hu J W, et al. Pose estimation for multi-camera systems[C]//2017 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS), October 27-29, 2017, Beijing, China. New York: IEEE Press, 2017: 533-538.
- [8] Yin P S, Ye J Y, Lin G S, et al. Graph neural network for 6D object pose estimation[J]. Knowledge-Based Systems, 2021, 218: 106839.
- [9] 李江杰, 孔明, 刘璐, 等. 单目视觉测量球体颗粒位姿[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(4): 0415005.
- Li J J, Kong M, Liu L, et al. Measurement of spherical particle pose by monocular vision[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(4): 0415005.
- [10] 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.
- [11] Fadji T, Coetzee C J, Opara U L. Evaluating the displacement field of paperboard packages subjected to compression loading using digital image correlation (DIC)[J]. Food and Bioprocess Processing, 2020, 123: 60-71.
- [12] Qiao X F, Chen D, Huo H Q, et al. Full-field strain mapping for characterization of structure-related variation in corneal biomechanical properties using digital image correlation (DIC) technology[J]. Medicine in Novel Technology and Devices, 2021, 11: 100086.
- [13] 朱飞鹏, 王京荣, 雷冬, 等. 三维 DIC 在 GFRP 锚杆拉伸力学性能测试中的应用[J]. 实验力学, 2014, 29(3): 302-309.
- Zhu F P, Wang J R, Lei D, et al. Application of 3D-DIC in tensile mechanical properties test for glass fiber reinforced plastic bolt[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(3): 302-309.
- [14] 陈振宁, 袁锐嘉, 邵新星, 等. 基于荧光偏振分像的多翅翼结构三维全场测量[J]. 光学学报, 2022, 42(8): 0812003.
- Chen Z N, Yuan R J, Shao X X, et al. Three-dimensional and full-field measurement of multi-wing structure based on fluorescence polarization imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(8): 0812003.
- [15] 胡烁陶, 孙晖, 王敏诚, 等. 空间结构形变的多视点高精度测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(19): 1912004.
- Hu S T, Sun H, Wang M C, et al. Multi-viewpoint and high-precision measurement method for spatial structure deformation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(19): 1912004.
- [16] 王永红, 朱奕磊, 高启学, 等. 基于数字图像相关法的空间目标位姿测量[J]. 光学学报, 2022, 42(8): 0812001.
- Wang Y H, Zhu Y L, Gao Q X, et al. Position and pose measurement of spatial object based on digital image correlation [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(8): 0812001.
- [17] Tong W. An evaluation of digital image correlation criteria for strain mapping applications[J]. Strain, 2005, 41(4): 167-175.
- [18] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.

Position and Pose Estimation of Rigid Body Based on Three-Dimensional Digital Image Correlation

Wang Yonghong^{1,2}, Chen Wanlin^{1,2}, Hou Bingfei^{1,2}, Wang Biao^{1,2*}

¹School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;

²Anhui Province Key Laboratory of Measuring Theory and Precision Instrument, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China

Abstract

Objective Position and pose are two basic parameters describing the position and attitude of an object in space, and they are extensively researched in robot grasping, automatic driving, and industrial inspection. Traditional attitude estimation methods such as using mechanical, laser tracker, inertial unit, and other attitude measurement systems have their drawbacks, including the need for contact measurement or susceptibility to interference by ambient light, and optical path complexity. As an optical measurement method, the digital image correlation (DIC) method features strong anti-interference ability and a simple optical path without contact. Meanwhile, it has been widely employed in the measurement of displacement, strain, and mechanical properties, but less research on attitude measurement is conducted. At present, there is a position measurement system based on the DIC method, which adopts the space vector method. This method requires the calculation of the inverse tangent function in rotation angle calculation, which has a large error and requires more calculation points. To deal with the shortcomings of the traditional position measurement system, we propose a position estimation system based on the three-dimensional digital correlation (3D-DIC) method to complete the measurement of multiple position parameters of a rigid body in space. Meanwhile, a new position solution method is put

forward for the weaknesses of the existing space vector method, and a new matching calculation method is also proposed to solve the problem of DIC in measuring large rotation angles.

Methods The mathematical model of position solution based on singular value decomposition (SVD) is first derived, and then the position measurement system is built for experiments. The specimen which has been sprayed with scattering spots is fixed on a moving platform, and the specimen moves along with the movement of the platform. After calibrating the binocular camera, the image sequences before and after the specimen movement are captured by the binocular camera, and the 3D-DIC is employed to match the image sequences before and after the movement and thus obtain the spatial three-dimensional coordinates of the calculation points. After obtaining a set of 3D coordinates before and after the movement of the calculation points, the SVD method is adopted to solve the rotation matrix and translation matrix, with the movement position parameters of the specimen solved. For the large errors of 3D-DIC in measuring large rotational deformation, we propose the matching calculation method of adding intermediate images. The feasibility and accuracy of the proposed method are verified by the translational degree of freedom and rotational degree of freedom experiments. Finally, a set of accuracy comparison experiments with the space vector method are conducted to verify whether this proposed method is better.

Results and Discussions After experimental validation, the position estimation system based on the proposed 3D digital correlation method can realize the measurement of multiple position parameters of a rigid body in space. The absolute errors of the three translational degrees of freedom in the transverse, longitudinal, and elevation are less than 0.07 mm (Fig. 6), and the absolute errors of the yaw and roll angles are less than 0.02° when the rotation angle is less than 10° (Figs. 7 and 9). Meanwhile, the proposed matching calculation method of adding intermediate images also reduces the error of large angle measurement (Fig. 10). The accuracy comparison experiments with the existing space vector method show that the proposed method has smaller measurement errors in rotation angle measurement and requires fewer calculation points (Table 2).

Conclusions We establish a position estimation system based on the 3D digital image correlation method, and propose a position solution method based on singular value decomposition. The 3D coordinates of the computation point are obtained by taking the image sequence before and after the motion of the object to be measured for the position solution, and multiple position parameter measurement of the spatial rigid body is realized. The results of the three translational degrees of freedom measurement experiments validate that the proposed 3D-DIC-based position measurement system is suitable for measuring the spatial translational degrees of freedom of the rigid body. Additionally, the large-angle measurement experiments verify that the proposed improved matching calculation method which adds intermediate images has obvious improvement in large-angle measurements, and the results of yaw angle and roll angle measurements show that the present measurement system is also applicable to the rotational degree of freedom position measurements of small and large angles. Compared with the traditional position estimation system, our method features high accuracy and a simple optical path without contact. Compared with the existing space vector method, our study has small measurement errors in both yaw and roll angles, and the required number of calculation points is also greatly reduced. In summary, the position and pose measurement system based on our 3D digital image correlation method is suitable for spatial rigid body position measurement, and the measurement accuracy is high, which meets the measurement requirements.

Key words measurement; digital image correlation method; position and pose estimation; six degrees of freedom