

文章编号: 1004-7220(2021)03-0423-08

抓取过程中的手部运动变形特征

朱琦玉, 童子祥, 员方, 魏康, 邵新星, 何小元

(东南大学 土木工程学院, 工程力学系, 南京 210018)

摘要:目的 基于多相机数字图像相关(digital image correlation, DIC)方法研究人手在抓取运动中的动态变形特征。方法 搭建连续型四相机 DIC 系统,测量抓取过程中手背皮肤的表面应变,再通过皮肤、关节、骨骼和肌肉之间的联系,间接掌握手部肌肉的变形规律。结果 测量中等圆柱抓取、横向捏取、食指伸展抓取以及强力球体抓握 4 种抓取姿态,发现不同抓取姿态下手背表面不同位置的应变增幅不同,其中最大主应变范围为 0.1~0.3。通过分析可以得到手部各肌肉群在不同抓取姿态下的运动特点。结论 该方法具有非接触、全场化、结果直观等特点,为抓取过程中动态变形的在体测量提供了一种新途径。

关键词:多相机数字图像相关; 三维变形测量; 抓取过程; 手部运动

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.03.020

Deformation Characteristics of Hand Movement During Grasping

ZHU Qiyu, TONG Zixiang, YUAN Fang, WEI Kang, SHAO Xinxing, HE Xiaoyuan

(Department of Engineering Mechanics, School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210018, China)

Abstract: Objective Based on the multi-camera digital image correlation (DIC) method, the dynamic deformation characteristics of human hand during grasping were studied. **Methods** A continuous four-camera DIC system was established to measure surface strain of the skin on the back of the hand during grasping process, and then through the connection between skin, joints, bones and muscles, the regular pattern of muscle deformation could be known indirectly. **Results** Four grasping postures (medium cylinder, lateral pinch, index finger extension, power sphere) were measured. It was found that the increases of strain magnitude were different at different positions on back surface of the hand under different grasping postures, and the maximum principal strains were between 0.1 and 0.3. The movement characteristics for each muscle group of the hand under different grasping postures were obtained through analysis. **Conclusions** This method has the characteristics of non-contact, full field, intuitive results, which provides a new way for *in vivo* measurement of dynamic deformation during grasping.

Key words: multi-camera digital image correlation (DIC); three-dimensional (3D) deformation measurement; grasping process; hand movement

收稿日期:2020-06-15; 修回日期:2020-08-21

基金项目:国家自然科学基金项目(11902074)

通信作者:邵新星,讲师, E-mail: xinxing.shao@seu.edu.cn

作为人体的重要组成部分,手用以执行日常生活中的多项任务。人手具有8块腕骨、5根掌骨、14根指骨、多条肌肉和发达的神经,含有超过20个自由度的复杂生理学结构。随着科技的进步和多学科的融合与发展,人手运动研究被应用于愈来愈多的领域。单就抓取运动而言,在机器研究与学习领域,可实现机器手拟人化和良好的人机交互功能;在虚拟动画领域,可还原手部运动的真实感;在医学领域,可有助于手术导航和相关复健产品的开发;在产品设计领域,可设计出更符合抓取习惯的各类产品。目前,关于抓取动作的研究大多为基于数据库的抓取姿势分类^[1-4],或者基于关节自由度的建模仿真研究^[5-7]。而人手的运动机理为:人的大脑神经中枢控制手部的功能性肌肉,而功能性肌肉作用于骨肌系统,从而带动手的运动。因此,本文从手部运动变形角度对此进行深入研究。

人体软组织主要包括皮肤、肌腱、韧带、肌肉、中枢和周围神经、动脉等。作为黏弹性材料,人体软组织普遍具有非线性、各向异性等力学特点,其力学性质可以运用于术式选择、健康监测、运动员训练等众多领域。软组织的测量方法主要为离体力学加载实验^[8-11]。近年来,随着科技的进步,软组织研究正逐渐朝着在体化、实时化、精准化发展。目前,在体软组织测量技术有接触式和非接触式两种,其中接触式可以使用皮肤压弹计,得到皮肤在加载过程中压头作用力与位移的曲线^[12];而非接触式可以使用超声^[13]、核磁共振^[14]、数字图像相关(digital image correlation, DIC)等技术。

对比其他人体软组织测量技术,DIC技术具有非接触、全场化的测量特点和实验设备搭建简单、精度高、抗干扰能力强等优点。DIC方法自20世纪80年代被提出以来,不仅在理论和算法上得到改进和完善,同时也成功应用于力学研究的诸多领域。在生物力学领域,Sutton等^[15]实现了微米级小鼠动脉的3D位移和表面应变场测量。张东升^[16]将DIC技术应用于动脉血管力学性能测试、牙本质断裂韧性测试和牙本质失水收缩变形的测定。刘鹏等^[17]进行人脸皮肤力学性能的原位测量。Chen等^[18]提出一种改进的水转印技术用以制作与粘贴散斑,并测量人体颈动脉的脉搏波速度。毛霜霜等^[19]基于DIC方法设计能避免水下摄影畸变的镜头套筒,并

应用于鱼鳞的力学性能测试。

本文利用多相机三维DIC方法对抓取过程中的手背皮肤变形进行测量,在准确获得应变场的基础上,通过找到皮肤变形与肌肉变形之间的联系,分析不同抓取姿态时手部变形规律,研究其力学行为。









1 抓取姿态

1.1 抓取姿态选择

目前公认的对人手抓取姿态总结最全面的是Feix抓取姿态分类表^[4]。此外,文献[1-3]中都曾研究抓取姿态的分类方法。本实验所选取的抓取姿态参考美国耶鲁大学自2010年以来开展的非结构化环境中人手抓握运动实验的实验结果^[20]。表1所示为日常使用频率最高的4种抓取姿态。

表1 4种抓取姿态

Tab.1 Four grasping postures

名称	图示	实拍
中等圆柱抓取		
横向捏取		
食指伸展抓取		
强力球体抓握		

1.2 皮肤变形与肌肉运动间联系

手部肌肉可以分为外侧群肌、内侧群肌和中间群肌三大类。其中,外侧群肌包括拇短展肌、拇短屈肌、拇对掌肌和拇收肌;内侧群肌包括小指展肌、小指短屈肌、小指对掌肌;而中间肌群包括蚓状肌和骨间肌。手部肌腱可以分为掌侧的9条指屈肌腱和背侧的9条指伸肌腱。如图1所示,从手背部可以观测到的肌肉和肌腱有小指展肌、拇收肌、4块

骨间背侧肌和全部 9 条指伸肌腱。

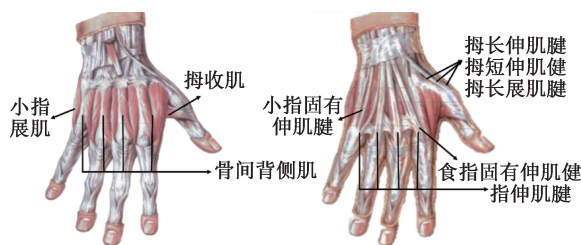


图1 手背肌肉和肌腱解剖图

Fig.1 Anatomic drawing of muscles and tendons on the back of the hand

肌肉收缩和骨骼运动都会导致皮肤的变形。解剖学家把肌肉的收缩运动分成了两类:等张收缩和等长收缩。其中,肌肉在等张收缩时长度缩短,使骨骼绕关节产生运动;而等长收缩时,由于阻力的作用,肌肉长度在收缩时保持不变。两种收缩方式均存在肌质变粗的情况,会导致肌腹的向外突出,此时肌腹处与其连接的皮肤被拉伸。

手部掌侧由于被抓取物体的遮挡,肌肉收缩引起的皮肤变形无法被直接观测到,但由于肌肉在等张收缩时会引起骨骼运动,同样可以导致手背侧的皮肤变形,从而被间接测量。例如:当小指掌骨在屈肌和对掌肌的作用下向掌侧内收时,其背侧皮肤被拉伸,出现较大应变。

在抓取运动中,前期肌肉的等张收缩带动指骨、掌骨的运动,当完成指定抓取姿态开始发力抓握或捏取时,肌肉变为等长收缩。实验方案设计减少前期手部的运动幅度,使手背肌肉在图像采集过程中尽可能发生等长收缩,减少骨骼运动对皮肤变形的影响。

2 实验设计

2.1 基于 DIC 的皮肤变形测量方法

2.1.1 三维 DIC 三维 DIC 方法使用两台相机从不同角度同步观测。基于双目视觉原理,首先对两台相机进行标定以获取相机内参和相机间的相对外参,同时得到基于已知标定板的世界坐标系。此时,匹配两相机拍摄的图像,即可通过图像中像素点的二维平面坐标重建三维空间坐标,从而实现三维变形场的测量。

2.1.2 多相机三维 DIC 在测量大曲率或者不规

则立体形状样本时,双相机三维 DIC 系统通常很难达到全局测量的测量需求。此时可通过增加相机数量,让各相机分别从不同角度测量样本的局部形貌,再通过图像拼接得到全场三维形貌。多相机 DIC 系统有两种系统布置类型,分别为离散型和连续型。其中,离散型系统每两个相机形成一个双目视觉子系统,等价于三维 DIC 的多次应用。而在连续型系统中,每个相机均与其左右相邻的相机组成子系统。为保证实验的精度,相邻相机的拍摄区域需重叠各自视场的 50% 以上。此系统需同时对所有相机进行标定,如此可以找到各局部坐标系之间的坐标变换关系,将所有图像转换至同一坐标系下,从而完成图像拼接,得到全场信息^[21]。

2.1.3 手背散斑生成 目前在活体状态下形成散斑的方法有两大类:一种是主动投射散斑,另一种是在表面粘贴或用自然纹理作为散斑。其中,主动投射散斑的方法只能测量表面形貌信息,如 iPhone X 搭载的 3D 摄像头。本文重点考察手部皮肤的动态变形,故采用粘贴水转印数字散斑纸的方法,其散斑直径为 1.5 mm。粘贴效果如图 2 所示。



图2 手背散斑图

Fig.2 Speckle pattern on the back of the hand

2.2 实验方案

由于抓取过程中各掌骨运动方向不同,导致手背面曲率增大,部分细节容易被遮挡。为达到全手背测量需求,实验采用连续型四相机 DIC 系统对手背皮肤变形进行测量。通过进行四相机精度实验^[22],其测量精度满足此次实验要求。测量原理和现场布置如图 3 所示。测量系统由以下几个部件组成:4 台 CMOS 相机、2 台三脚架、标定板、水转印散斑和计算机。其中,相机选择分辨率为 2 048 pixel×2 048 pixel 的工业相机,并配置焦距为 25 mm 镜头,标定板选用 9×9 的 20 mm 黑白棋盘

格标定板。由于 DIC 方法对于光源的要求较小,本实验不增加额外光源。实验选择 1 位男生(身高 181 cm,体质量 72 kg,年龄 22 岁,手部无疾患)作为研究对象,因为男生手背肌肉、骨骼较为突出,结果更明显。

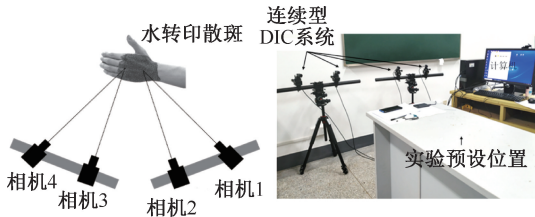


图3 测量原理和现场布置

Fig.3 Measurement principle and site layout

具体实验步骤如图 4 所示。其中,四相机标定采用平面标定法,使用黑白棋盘格标定板对 4 台相机进行同步标定,以便后续的数据拼接工作。每次实验开始前,被测者提前 3 min 练习该抓取动作,之后将手和被抓取物体放置在实验预设位置上,初步摆出该抓取姿态,同时固定前臂和手肘关节。此方案便于在抓取过程中找到拍摄的最佳角度,最大程度地展示手背的散斑图。实验开始后,在按下采集按钮的同时手部发力抓住物体,完成抓取过程中手背散斑图片的采集。

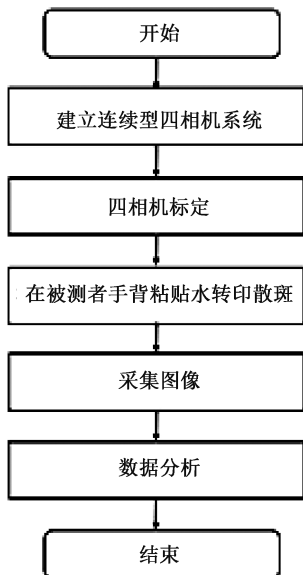


图4 实验步骤

Fig.4 Experimental steps

3 实验结果

对人在 4 种不同抓取姿态下的手背皮肤变形进行全场分析,宏观地观察手背各个肌肉群的运动趋势,掌握其运动规律。图像分析软件使用商业化软件 Dantec Dynamics, 计算区域的框选基本覆盖手背的全区域。

3.1 抓取过程

图 5 所示为 4 次实验过程中某一时刻 4 台相机同步拍摄的照片:

(1) 中等圆柱抓取过程共耗时 3 s, 每台相机各拍摄 60 张图片。其中, 0~1 s 为四指弯曲阶段, 1~3 s 手背开始发力, 抓握柱形物体。

(2) 横向捏取过程共耗时 3.6 s, 每台相机各拍摄 72 张图片。捏取过程拇指逐步下压捏住卡片。

(3) 食指伸展抓取过程共耗时 2.8 s, 每台相机各拍摄 56 张图片。其中, 0~0.6 s 为手指弯曲阶段, 0.6~2.8 s 手部开始发力, 抓握棍状物体。

(4) 强力球体抓握过程共耗时 2.4 s, 每台相机各拍摄 47 张图片。其中, 0~0.8 s 为四指弯曲阶段, 0.8~2.4 s 手部开始发力, 抓握球状物体。

3.2 第 1 主应变云图

图 6 为 4 种不同抓取姿态下的第 1 主应变云图。

(1) 中等圆柱抓取动作刚开始时, 小指与无名指掌指关节周围皮肤被明显拉伸; 同时手背下侧出现的较大应变。而握紧发力阶段, 可以明显看到四指的掌指关节骨节应变增大, 最大应变达到 0.3; 手背各掌骨位置皮肤被横向拉伸, 其中无名指中部的应变增量最大, 最大应变达到 0.2; 拇指掌骨处应变最大达到 0.17; 而手腕处的皮肤被压缩, 应变为负。

(2) 横向捏取时, 主要是拇指和食指周围皮肤被拉伸而产生较大应变。食指和中指间皮肤拉伸达到 0.07, 而拇指和食指间皮肤拉伸达到 0.13; 可以明显看到, 应变最大处从食指骨间肌前端逐渐移动至骨间肌后端, 且往拇指方向移动, 后逐渐移出视场范围。

(3) 食指伸展抓取动作开始后, 食指和拇指间

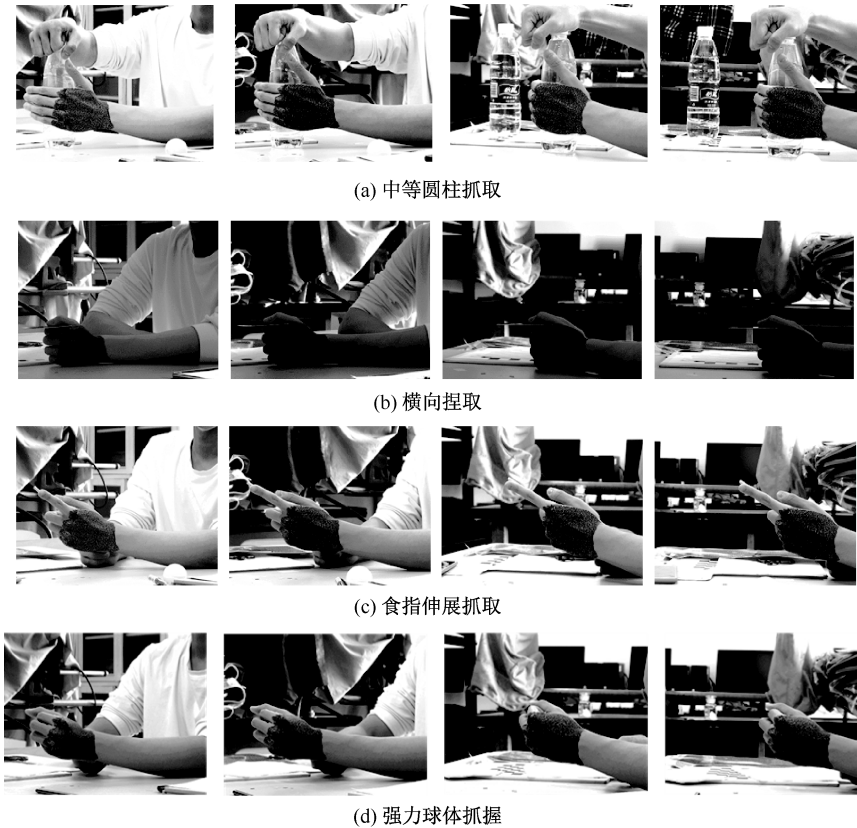


图5 不同抓取姿态下四相机分别拍摄图片

Fig.5 Pictures of different grasping postures taken by the four cameras (a) Grasp of medium cylinder, (b) Lateral pinch, (c) Grasp of index finger extension, (d) Grasp of power sphere

骨间肌处的皮肤被拉伸,最终该区域的最大应变达到 0.3;发力阶段食指掌骨中段应变迅速增大,最大应变达到 0.34;同时各指掌骨周围也存在小区域应变增大现象。

(4) 球体抓握动作刚开始时,首先小指和无名指掌指关节周围皮肤被拉伸,其应变迅速增大,在 0.5 s 内最大值达到 0.13,而最终无名指掌指关节的最大应变达到 0.45;同时,握紧发力阶段中间三指掌骨周围应变均增大,最大应变达到 0.2。

3.3 区域第 1 主应变

图 7 显示了 4 种不同抓取姿态下框选区域内第 1 主应变的平均曲线。

(1) 中等圆柱抓取图中蓝线为整体区域,绿线为下侧小指肌腱及展肌区域。从曲线趋势可以清楚看到,抓取过程手背皮肤整体处于缓慢拉伸状

态。小指相较其他区域率先开始运动,且持续发力。

(2) 横向捏取图中蓝线为整体区域,绿线为上侧骨间肌区域。从曲线趋势可以看出,捏取过程手背皮肤整体处于缓慢拉伸状态,而骨间肌在发力后的 1 s 内到达顶峰,并一直维持,最后 1 s 由于肌肉移动超出框选区域导致数值有所下降。

(3) 食指伸展抓取图显示了上侧骨间肌区域第 1 主应变的平均曲线。从曲线趋势可以看出,在完成手指弯曲阶段、开始发力抓取后,拇指和食指间的骨间肌几乎是在一瞬间完成发力,且一直保持。

(4) 强力球体抓握图中蓝线为整体区域,绿线为上侧骨间肌区域。从曲线趋势可以看出,抓取过程手背皮肤整体处于缓慢拉伸状态,不同区域的第一主应变变化量不大。

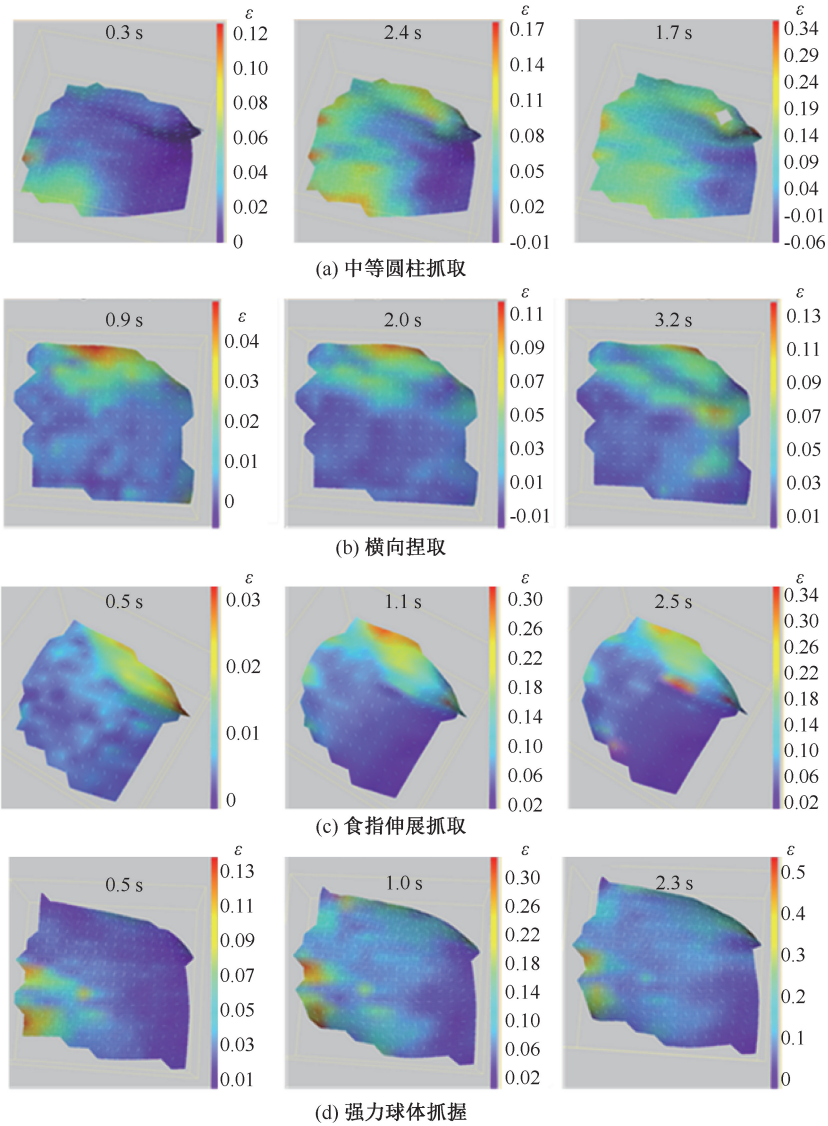


图6 不同抓取姿态下表面应变云图(第1主应变)

Fig.6 Surface strain under different grasping postures (first principal strain) (a) Grasp of medium cylinder, (b) Lateral pinch, (c) Grasp of index finger extension, (d) Grasp of power sphere

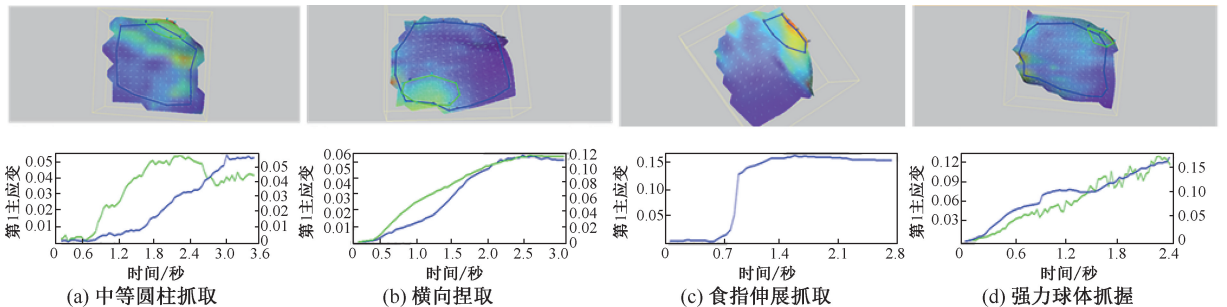


图7 不同抓取姿态下第1主应变平均曲线

Fig.7 Average curve of the first principal strain under different grasping postures (a) Grasp of medium cylinder, (b) Lateral pinch, (c) Grasp of index finger extension, (d) Grasp of power sphere

4 讨论

4.1 实验结果分析

中等圆柱抓取动作刚开始时,小指率先开始弯曲运动,手背下侧出现较大应变是由于掌侧的小指屈肌收缩带动小指展肌舒展用以协助小指内收。而小指弯曲会直接牵动无名指弯曲,导致小指与无名指掌指关节明显凸出;而握紧发力阶段,掌心内侧的肌腱收缩协助四指弯曲用力。四指的掌指关节骨节突出、皮肤被拉伸。手背处的伸肌腱受到手指方向的拉力,肌腱形状和与其连接的皮肤随着肌腱变形而变得细长,其变形一直延伸至手腕处。

横向捏取时,主要是拇指和食指周围的肌肉收缩发力。抓取动作刚开始时,拇内收肌和拇短屈肌收缩,拇指下压,拇指指尖产生向下的力,拇内收肌和拇短屈肌发力中心至掌指关节的内部力臂约 15 mm,掌指关节至拇指指尖作用点的外部力臂约 60 mm。同时,食指两侧的背侧骨间肌逐渐收缩,肌肉向外突出,食指近端指节处产生向上的力,与拇指产生的力相平衡,两侧骨间肌发力中心至掌指关节的内部力臂约 10 mm,掌指关节至食指指节作用点的外部力臂约 50 mm;随着动作的进行,拇指持续下压,拇指与食指间的骨间肌跟随着拇指的运动逐渐向拇指方向移动,超出视场范围,而移动后原位置的皮肤恢复松弛状态。

食指伸展抓取动作开始后,由于拇收肌和拇短屈肌的作用,拇指内收,拇指指尖从侧向抵住细棍,拇内收肌和拇短屈肌发力中心至掌指关节的内部力臂约 15 mm,掌指关节至拇指指尖作用点的外部力臂约 60 mm,此时食指和拇指间皮肤的应变主要为拇指运动导致的皮肤拉伸;同时食指伸展,指尖抵住细棍。发力阶段两指之间的背侧骨间肌瞬间收缩发力,肌肉向外突出,用于抵抗指尖处由于按压产生的外部力的侧向分量,骨间肌发力中心至掌指关节的内部力臂约 10 mm,掌指关节至食指指尖作用点的外部力臂约 90 mm;食指的屈肌腱收缩发力,用于抵抗指尖处由于按压产生的外部力的垂直分量;背侧伸肌腱向外突出,其周围皮肤被横向拉伸;同时,小指掌侧的对掌肌收缩使得小指掌骨内收,其背侧皮肤也被拉伸。

球体抓握动作刚开始时,小指和无名指率先开

始弯曲,掌指关节处的皮肤因此被拉伸;同时,因为小指对掌肌收缩导致小指掌骨内收,小指与无名指掌骨之间的皮肤被横向拉伸。握紧发力阶段,掌侧的屈肌腱收缩协助中间三指同步弯曲用力,包握住物体;拇指掌侧的对掌肌收缩,拇指下压;小指继续弯曲,其近端指节与球状物体下端接触,小指与无名指间的骨间肌收缩,肌腹向外突出;中间三指的背侧骨间肌均收缩,掌骨外展,与其连接的皮肤均被横向拉伸。

4.2 研究局限性

使用 DIC 技术研究抓取过程中的手部运动变形特征,可以实现非接触、全场化的测量需求,同时能够生成直观的三维位移、应变云图,便于进一步分析。但此方法的局限性在于只能对贴有散斑图案的皮肤表面变形情况进行测量。然而肌肉变形和肌肉收缩所引起的骨骼运动均会导致手部的皮肤变形,虽然实验方案设计中骨骼运动进行控制,但两者难以被准确分离。同时,本实验的样本较少,在下一步研究中,期望扩展测量抓取姿态种类,以及不同人群手部运动变形的差异,从而得到更为普适性的实验结果。

5 结论

本文基于 DIC 方法,搭建连续型多相机三维 DIC 系统,选取使用频率最高的 4 种抓取姿态,研究不同抓取姿态下手部皮肤变形情况。通过皮肤变形与肌肉变形之间的联系,对不同抓取姿态下手部变形规律进行分析。实验结果表明,此方法能够较好地得到手部各肌肉群在 4 种不同抓取姿态下的运动特点,研究结果与实际情况相符,符合常规认知,为抓取过程中动态变形的在体测量提供了一种新途径。未来将增加实验样本,分年龄、分人群进行分析,实现人手抓取变形特征的共性研究。

参考文献:

- [1] SCHLESINGER IG. The mechanical structure of the artificial limbs [M]. Berlin: Springer, 1919: 321-661.
- [2] KAMAKURA N, MATSUO M, ISHII H, et al. Patterns of static prehension in normal hands [J]. Am J Occup Ther, 1980, 34(7): 437-445.
- [3] CUTKOSKY MR. On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks [J]. IEEE Trans

- Robot, 1989, 5(3): 269-279.
- [4] FEIX T, ROMERO J, SCHMIEDMAYER HB, *et al.* The grasp taxonomy of human grasp types [J]. IEEE Trans Human-Mach Syst, 2016, 46(1): 66-77.
- [5] 赵睿英, 焦生杰, 王欣. 多手指机器人动力学建模方法 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2015, 35(3): 151-158.
- [6] 宋瑞岭, 朱向阳. 欠驱动假肢手的运动学与静力学仿真 [J]. 机械与电子, 2008(3): 47-50.
- [7] 李群明, 李耀文, 吕亚平, 等. 绳驱动假肢手指参数优化及抓取力分析 [J]. 现代制造工程, 2015(8): 145-149.
- [8] STARK HL. Directional variations in the extensibility of human skin [J]. Br J Plast Surg, 1977, 30(2): 105-114.
- [9] 冯元楨. 生物力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1983: 160-164.
- [10] 张雨豪, 牛培, 张志敏, 等. 家兔静脉动脉化后充压拉伸实验研究 [J]. 医用生物力学, 2020, 35(2): 156-162.
- ZHANG YH, NIU P, ZHANG ZM, *et al.* Pressurizing and stretching experiment in arterialized veins of rabbits [J]. J Med Biomech, 2020, 35(2): 156-162.
- [11] 李建峰, 肖焕波, 李海雷, 等. 拇指腕掌关节韧带的解剖力学分析及临床意义 [J]. 医用生物力学, 2017, 32(3): 284-287.
- LI JF, XIAO HB, LI HL, *et al.* Analysis on anatomy and biomechanics of ligaments in carpometacarpal joints of the thumb and clinical significance [J]. J Med Biomech, 2017, 32(3): 284-287.
- [12] LANIR Y, DIKSTEIN S, HARTZSHTARK A, *et al.* *In-vivo* indentation of human skin [J]. J Biomech Eng, 1990, 112(1): 63-69.
- [13] HISAO O, TAKASHI I, YONG HS, *et al.* Portable system for measuring biomechanical properties [C] // Proceedings of Instrumentation and Measurement Technology Conference. Atlanta: IEEE, 1991.
- [14] SCHENK P, SIEBERT T, HIEPE P, *et al.* Determination of three-dimensional muscle architectures: Validation of the DTI-based fiber tractography method by manual digitization [J]. J Anat, 2013, 223(1): 61-68.
- [15] SUTTON MA, KE X, LESSNER SM, *et al.* Strain field measurements on mouse carotid arteries using microscopic three-dimensional digital image correlation [J]. J Biomed Mater Res A, 2008, 84(1): 178-190.
- [16] 张东升. 数字图像相关测量技术及其应用 [J]. 医用生物力学, 2009, 24(2): 85-88.
- ZHANG DS. Digital image correlation: Theory and applications [J]. J Med Biomech, 2009, 24(2): 85-88.
- [17] 刘鹏, 王世斌, 李林安, 等. 活体状态下人脸皮肤力学性能原位测量研究 [J]. 实验力学, 2017, 32(3): 295-304.
- [18] CHEN ZN, SHAO XX, HE XY, *et al.* Noninvasive, three-dimensional full-field body sensor for surface deformation monitoring of human body *in vivo* [J]. J Biomed Opt, 2017, 22(9): 095001.
- [19] 毛霜霜, 陈立, 张东升. 采用镜头套筒进行水下数字图像测量 [J]. 医用生物力学, 2013, 28(5): 538-541.
- MAO SS, CHEN L, ZHANG DS. Underwater digital image measurement using lens sleeves [J]. J Med Biomech, 2013, 28(5): 538-541.
- [20] ZHENG JZ, DE LA ROSA S, DOLLAR AM. An investigation of grasp type and frequency in daily household and machine shop tasks [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Shanghai: IEEE, 2011: 4169-4175.
- [21] 朱飞鹏, 雷冬. 基于三维数字图像相关的三维形貌拼接研究 [J]. 力学季刊, 2013, 34(3): 470-474.
- [22] 葛天媛. 多相机数字图像相关技术在土木工程实验中的应用研究 [D]. 南京: 东南大学, 2016.