

文章编号:1004-7220(2010)04-0308-05

## 冷刺激下食指运动学及动力学特性研究

邵宏伟, 贺 纓, 雷 霆, 张恒第

(中国科学技术大学 工程科学学院, 合肥 230027)

**摘要:** **目的** 考察冷刺激对食指运动学及动力学特性的影响。**方法** 为减少对食指屈伸的影响,采用高速摄影仪记录食指屈伸运动过程的方法,记录食指在自然状态和冷水刺激两种情况下的屈伸运动,通过自行编写的程序对视频文件进行处理,得到食指各关节角度随时间的变化,最后通过一个包含两块肌肉(FDS: flexor digitorum superficialis, FDP: flexor digitorum profundus)的肌骨骼模型计算得到肌肉力随时间的变化关系。**结果** 冷水刺激后,食指第二关节在屈伸过程中的平均角速度变小。冷水刺激前后, FDP 肌肉力没有太大的变化,而 FDS 肌肉力在弯曲结束时增加了1倍左右。**结论** 本文通过影像结合图像处理的方式得到了食指在屈伸过程中的轨迹信息,并通过简化建立了连接食指表观信息与内部肌肉力的计算模型,进一步讨论了冷水刺激前后食指的运动学和动力学特性。

**关键词:** 食指; 运动学; 动力学; 冷刺激; 肌肉力

**中图分类号:** R318.01 **文献标志码:** A

## Kinematics and dynamics characteristics of index finger after cold stimulation

SHAO Hong-wei, HE Ying, LEI Ting, ZHANG Heng-di (School of Engineering Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract: Objective** To investigate effects of cold water stimulation on kinematic and dynamic characteristics of index finger. **Method** In order to reduce the influence on its flexion and extension, the index finger movement was recorded by a high-speed camera. Then a self-developed MATLAB program was developed to obtain the trajectory with the help of the black speckles on index finger joints. Finally, a dynamic calculating model with FDS and FDP was set up to describe the relationship between the trajectory and muscle forces changed along with the time. **Results** After the cold water stimulation, the average angular velocity of the second joint in the index finger decreased in the process of fisting and stretching. Before and after the cold water stimulation, the force of FDP muscle changed little while the force of FDS muscle approximately doubled at the end of the fisting. **Conclusions** An optical method for obtaining the trajectory of index finger was applied, and a dynamic calculating model was developed to calculate the muscle forces during the finger movement. Therefore, the characteristics of the index finger before and after the cold stimulation could be further discussed.

**Key words:** Index finger; Kinematics; Dynamics; Cold stimulation; Muscle force

手是人体与环境交互的重要组成部分,被认为是大脑的延续。经过了长期的演化,手已经拥有了高度的灵活性,它不仅在人与外界的交流中扮演着重要的角色,而且也是提供自身身体状况的重要信

息来源。然而,手的灵活性与精密性也决定了它比较容易遭受神经上或者外科上的伤害。对手的生物力学功能的研究,可以在临床治疗方面为保护和恢复手的功能提供一种依据和评价标准,同时,在人工

收稿日期:2010-06-11; 修回日期:2010-07-19

作者简介:邵宏伟(1986-),博士研究生,研究方向:生物力学。

通讯作者:贺纓,教授,博士研究生导师, Tel: (0551)3602476; E-mail: yhe@ustu.edu.cn。

智能领域,也有利于改善机械手的设计与控制,使其与人手有更好的生物相似性,设计出更完美的类人机器人。但是,由于手的几何结构和运动的复杂性,研究手的运动特性还是有比较大的困难。因此,首先研究比较有代表性的食指的运动特性是相对简单有效的方法。

基于手指运动特性研究的重要意义,已有很多学者对此开展了不同的研究工作。刘博等<sup>[1]</sup>通过对食指指尖运动空间的研究,确定了食指指骨与掌骨连接处的铰链先后次序;黄力平等<sup>[2]</sup>通过磁源性影像技术研究了在食指反复屈伸运动时的脑增龄性变化神经机制,提出了运动功能减退的特征,指出长期反复运动有利于延缓脑运动控制机能的减退速度。Wu等<sup>[3]</sup>根据食指解剖学特点,提出了包含三个关节,7条肌肉的手指动力学模型,并运用商业软件 Anybody 分析了各个部分肌肉在敲击键盘时力的变化,同时与实验结果进行了比较。Kampar等<sup>[4]</sup>提出了一种考虑肌肉参与食指运动的建模,此模型包含了3个关节,并得出了关节处的被动扭矩的实验拟合公式。Blum等<sup>[5]</sup>研究了大鼠踝关节运动,建立了肌肉骨骼模型,分析比较了TA和SO肌肉中肌肉力的实验数据和模拟结果,得到比较符合的模拟结果。王华等<sup>[6]</sup>研究了基于切片理论对水下灵巧手指的动力学问题,考虑水阻力、附加质量力的影响,建立了较为精确的动力学模型,采用 Sim-Mechanics 进行了动力学仿真。王宏等<sup>[7]</sup>设计并实现了一种基于 Lab VIEW 的求解手指指尖和手指各关节的运动轨迹的方法。利用摄像机采集人类手指运动图像,应用 Lab VIEW 软件中的曲线拟合技术获得手指及各关节的运动轨迹,并得出了人类食指指尖运动轨迹适用3阶次多项式拟合,拇指指尖运动轨迹适用4阶次的多项式拟合。李艳等<sup>[8]</sup>研究了简单动作(反复连续的手指对指动作)、随意动作(抓物体)和假想动作3种运动模式时,脑功能区域的活动机制。利用功能磁共振(fMRI)影像技术来摄取在不同运动模式下的双侧脑激活区域,并进行了机制分析。

前期的工作较少考虑环境刺激对手运动机能的影响,而本研究通过高速摄影仪记录下食指在2种不同状态下的屈伸过程,分析在自然状态下食指屈伸过程中的运动学特性,并考察冷水刺激对食指的

运动特性的影响程度。通过建立一个包含2块肌肉的食指肌骨骼模型,对食指刺激前后的动力学特性进行分析。希望通过更深入的研究可以建立关于手指灵活度的评价指标,最终为保护或恢复手指的运动功能提供一种可参考的理论依据。

## 1 方法

实验仪器为高速摄影仪(250 fps),恒温水槽,支撑架。被测对象为5名年龄在20~25岁的健康青年。

**1.1 实验方法** (1)高速摄像仪固定在三脚架上。在被测者右手食指侧面关节处做上标记点。(2)被测者保持站立姿势,尽量放松,伸出左手在镜头完成一次握拳动作。(3)被测者将左手浸入10℃的恒温水浴中,保持1min。(4)重复一次(2)的过程。

本文所采用的实验方法采用了光学影像的测量方法,一定程度上减少了对手屈伸运动的影响。

**1.2 数据处理** 从高速摄影仪中取出的数据是分辨率为512×512的视频文件(见图1)。



图1 运动过程中的第1帧图像

Fig.1 First frame of graph in the movement

为了能比较准确地从视频中找到对应位置的标记点,这里采用动态跟踪识别对应标记点的方法,具体步骤如下:

- (1) 在第1帧图像中手动标记关节点初始位置;
- (2) 根据上一个时刻标记点的位置,确定下一个时刻对应标记点可能出现的范围(30×30的像素范围内),用冷暖色调标示出这些区域的灰度值;
- (3) 在该范围内采用水域分割方法得到新的标记点的位置,将区域的水位图转成二值图后,水位最低点即为标记点的位置;

(4) 重复上述(2)、(3)步,链式跟踪直至视频结束。

根据数字图像处理的算法自行编写的 MATLAB 程序可以全自动的实现上述过程,进一步就可以得到食指骨架在屈伸过程中的运动轨迹。

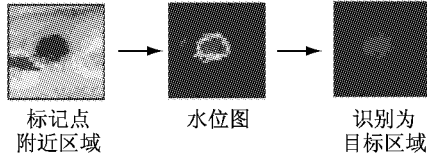


图2 标记点识别示意图  
Fig.2 Recognition of the speckle

由于得到的是食指骨架在屈伸过程中的运动轨迹,故在研究该问题时,可将食指简化为如图3所示的连杆机构,它由4根杆和3个铰链组成,主要采用的信息就是图中所示的  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ ,它们可以通过对标记点位置的简单计算得到。

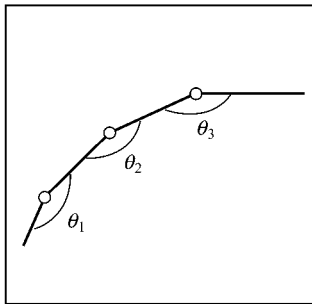


图3 食指骨架的示意图  
Fig.3 Schematic diagram of simplified index finger

**1.3 模型建立** 控制食指运动的肌肉有5块,其中控制食指做弯曲运动的主要由 FDP 和 FDS 2块肌肉来完成。本研究参考前人工作并建立了如图4所示的由圆柱和球组成的肌骨骼模型,该模型中考虑了 FDP 和 FDS 2块肌肉,可以完成手指的弯曲过程。对于该模型,有如下几点需要说明:

- (1) 关节是2个相切且半径相同的球构成,指节认为是一个圆柱;
- (2) 关节和指节是固结,关节和关节是铰接;
- (3) 关节的2个球之间存在一个被动扭矩;
- (4) 在关节的2个球以及第2和第3指节的中间位置有滑轮,2条肌肉 FDP 和 FDS 穿过这些滑轮。而 FDP 和 FDS 的两端分别固定在第1指节和掌骨中间位置。

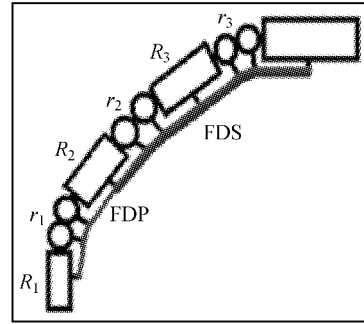


图4 食指的动力学模型  
Fig.4 Dynamic model of index finger

几何模型中的各个尺寸参数如表1所示。

表1 食指模型中的尺寸参数<sup>[3]</sup>

Tab.1 Size parameters in the model of index finger<sup>[3]</sup>

|                                  | 1(DIP)               | 2(PIP)               | 3(MIP)               |
|----------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $r/\text{mm}$                    | 3.2                  | 4.7                  | 6.4                  |
| $R/\text{mm}$                    | 1.6                  | 2.3                  | 2.8                  |
| $L/\text{mm}$                    | 13.2                 | 8.7                  | 20.5                 |
| $I/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ | $1.7 \times 10^{-7}$ | $4.5 \times 10^{-7}$ | $2.8 \times 10^{-6}$ |
| $m/\text{kg}$                    | $3.9 \times 10^{-3}$ | $6.8 \times 10^{-3}$ | $1.6 \times 10^{-2}$ |

其中, $r$ 是关节处球体半径; $R$ 是指节圆柱半径; $L$ 为指节长度; $I$ 为各部分转动惯量; $m$ 为各部分质量。

对各个指节分别做受力分析,由力矩平衡原理可得如下的控制方程:

$$F_1 l_1 - \pi_1 = I_1 \frac{d^2 \theta_1}{dt^2} \quad (1)$$

$$F_2 l_2 - F'_2 l'_2 + \tau_1 - T_1 + F_3 l_3 - \tau_2 = I'_2 \frac{d^2 \theta_2}{dt^2} \quad (2)$$

$$F_3 l_3 - F'_3 l'_3 + \tau_2 - T_2 - \tau_3 = I'_3 \frac{d^2 \theta_3}{dt^2} \quad (3)$$

其中, $F_1$ 和 $F_2$ 分别是 FDP 和 FDS 的肌肉力; $F_3$ 和 $F'_3$ 分别为 2、3 指节前端球滑轮处肌肉力的合力; $F'_2$ 和 $F'_3$ 分别为 2、3 指节中部滑轮处肌肉力的合力; $T_1$ 和 $T_2$ 分别为 1 指节对 2 指节和 1、2 指节对 3 指节的反作用力; $\tau_1, \tau_2, \tau_3$ 分别是 3 个关节处的被动扭矩,其表达式由如下经验公式表示:

$$\tau = \tau^s - B \cdot \dot{\theta} - K \Delta \theta \quad (4)$$

式中,  $\tau$  为被动扭矩,  $\tau^s$  为静态被动扭矩,  $B$  和  $K$  为阻尼和动态刚度系数。模拟中参数选取如表 2 所示。

表 2 被动扭矩经验公式中的参数<sup>[4]</sup>

Tab.2 Parameters in the empirical formula of passive torque<sup>[4]</sup>

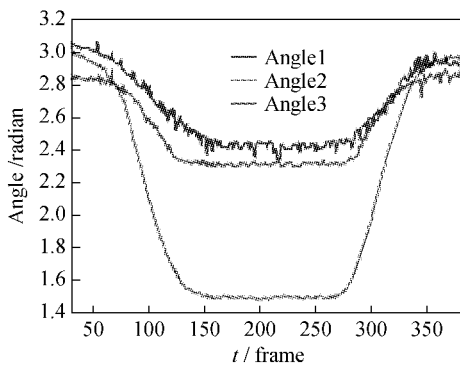
|  | 1(DIP)           | 2(PIP)           | 3(MIP)           |
|--|------------------|------------------|------------------|
| $\tau^s / (\text{N} \cdot \text{m})$   | $-0.103\theta^3$ | $0.056\theta^3$  | $-0.071\theta^3$ |
|  | $+0.102\theta^2$ | $+0.016\theta^2$ | $+0.145\theta^2$ |
|  | $-0.052\theta$   | $-0.132\theta$   | $-0.154\theta$   |
| $K / [(\text{N} \cdot \text{m}) \cdot \text{rad}^{-1}]$                            | $-0.019$         | $+0.015$         | $+0.029$         |
|  | $0.38\theta^2$   | $1.06\theta^2$   | $1.02\theta^2$   |
|  | $-0.09\theta$    | $-0.76\theta$    | $-0.54\theta$    |
| $B \times 10^2 / [(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}) \cdot \text{rad}^{-1}]$ | $+0.13$          | $+0.40$          | $+0.45$          |
|  | $0.81$           | $1.05$           | $1.42$           |

将实验中得到的角度数据作为模型的输入, 可以得到在弯曲过程中 2 根肌肉力随时间的变化关系。

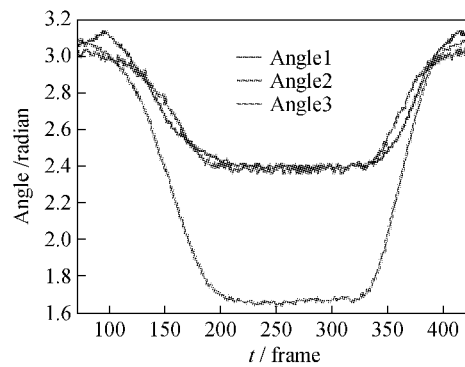
## 2 结果

图 5 所示的是被测对象 A 在冷水刺激前后食指屈伸过程关节角度随时间的变化关系。通过对各个被测对象冷水刺激前后的运动曲线的分析, 可以得出, 在 3 个关节中, 食指第 2 个关节具有最大的活动范围。在冷水刺激后, 屈伸过程的时间变长且第 2 个关节在屈伸过程中的平均角速度有所降低。

图 6 所示的是将弯曲过程角度数据输入计算模型所得到的两根肌肉上的肌肉力随时间的变化关系。通过对各个被测对象冷水刺激前后的肌肉力曲线的比较发现, 肌肉力 FDS 在握紧时有一个较快的



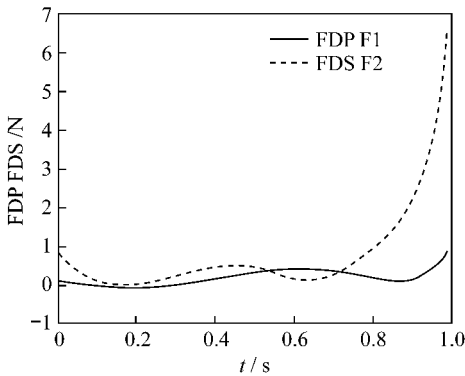
(a) 冷水刺激前



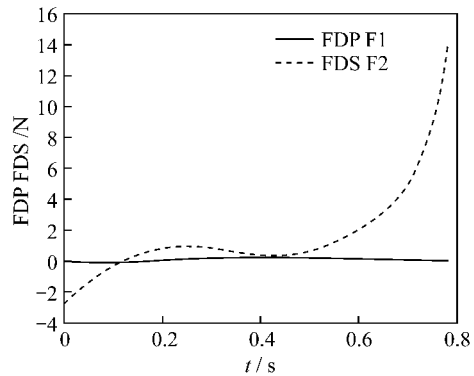
(b) 冷水刺激后

图 5 被测对象 A 屈伸过程关节角随时间的变化关系

Fig.5 Variation of joint angles during the fisting and stretching about object A



(a) 冷水刺激前



(b) 冷水刺激后

图 6 被测对象 A 屈伸过程肌肉力随时间的变化关系

Fig.6 Variation of muscle forces during the fisting and stretching about object A

上升,且在冷水刺激后,其上升的幅度达到了冷水刺激前的2倍左右。而FDP肌肉力变化不大且始终处在较低值水平。

### 3 讨论

本文通过影像结合图像处理的方式得到了食指在屈伸过程中的轨迹信息,并通过简化建立了连接食指表观信息与内部肌肉力的计算模型。通过实验可以发现,在冷水刺激前后,第2个关节的角度变化最明显,因此可以认为在3个关节中第2个关节对冷水的刺激最为敏感。通过模型计算的结果可以看出,驱动食指弯曲的力主要集中在肌肉FDS上。FDS肌肉力在冷水刺激后幅度变大可能是由于冷水刺激对FDS的影响比较大,使其产生更大的收缩,这与直观上的认识较为相符。

在今后的工作中,希望进一步通过改善实验环境和增加被测对象来减小个体差异对实验结果的影响;在模型方面,食指的剩余3根肌肉将被加入计算模型以更好地描述肌肉控制食指屈伸的过程。

#### 参考文献:

- [1] 刘博,张玉茹,任大伟,等. 人手食指运动学建模[J]. 机器人, 2007,29(3): 204-218.
- [2] 黄力平,赵振彪,王佩云,等. 年龄相关的运动功能减退神经机制研究:磁源性影像证据[J]. 中国康复医学杂志,2005,20(7): 504-506.
- [3] Wu JZ, Kai-Nan An, Robert G Cutilip, *et al.* Analysis of musculoskeletal loading in an index finger during tapping [J], Journal of Biomechanics, 2008, 41: 668-676.
- [4] Kamper D G, T. George Hornby, William Z. Rymer. Extrinsic flexor muscles generate concurrent flexion of all three finger joints [J]. Journal of Biomechanics, 2002, 35: 1581-1589.
- [5] Bulm E K, C. Haun, J. E. Ryan. A musculo-skeletal model of rat ankle motion and its experimental test on rat [J]. Journal of Biomechanics, 2007, 40: 891-899.
- [6] 王华,孟庆鑫,王立权. 基于切片理论的水下灵巧手指动力学分析[J]. 机器人,2007,29(2): 160-166.
- [7] 王宏,赵长宽,姬彦巧. 人类手指运动轨迹的计算机仿真[J]. 东北大学学报(自然科学版),2006,27(8): 892-894.
- [8] 李艳,刘世文,曹丽华,等. 正常人三种模式手指运动的脑激活区域的功能磁共振研究[J]. 中华物理医学与康复,2003,25(6): 335-339.
- [9] 丁立,杨锋,陈守平,等. 手动作业疲劳的力学评价方法研究[J]. 航天医学与医学工程,2006,19(5): 363-367.
- [10] 陈守平,丁立,杨锋,等. 基于舱外航天服手套基础性功效评价的人体力学指标优选研究[J]. 航天医学与医学工程,2006,19(2): 106-110.
- [11] 丁立,杨锋,雷岩鹏,等. 冷环境下手的热生理问题[J]. 工程热物理学报,2007,28(6): 1007-1009.
- [12] Akos Jobbagy, Peter Harcos, Robert Karoly, *et al.* Analysis of finger-tapping movement [J]. Journal of Neuroscience Methods, 2005, 141: 29-39.
- [13] Jae Hun Ryu, Natsuki Miyata, Makiko Kouchi, *et al.* Analysis of skin movement with respect to flexional bone motion using MR images of a hand [J]. Journal of Biomechanics, 2006, 39: 844-852.
- [14] Francisco J, Valero-Cuevas. An integrative approach to the biomechanical function and neuromuscular control of the fingers [J]. Journal of Biomechanics, 2005, 38: 673-684.