

人手操作目标物体过程运动轨迹的规律研究^①

张亚琪^② 周邦达 马小龙 蔡世波 鲍官军^③

(浙江工业大学机械工程学院 杭州 310023)

摘 要 根据手指生理学特性及手指间的运动特性,对三指操作单位球体运动过程进行了分析,设计了手指的运动步态模式并讨论了操作过程指尖的运动特点及指尖运动轨迹规律。采用 NOKOV 软件视觉捕捉系统,对手指操作过程的物体转动速度和手指运动轨迹进行了测定,并对三指转动操作运动进行解析模拟和对比。结果表明,人手操作目标物体的手指转动运动符合规划步态的运动规律。研究结果对手指重定位物体的运动仿真和手内操作的步态规划具有指导意义。

关键词 三指运动步态;手指运动轨迹;运动规律

0 引 言

传统的工业机器人灵活性差、通用性不强、末端夹持器结构简单等弊端限制了机器人的精细作业水平,已不能满足机器人在极限环境和非结构环境下的作业要求。用于危险环境作业、海洋资源探测、抗震救灾^[1]以及空间探测中的特种机器人对目标操作任务提出更高的要求。特别是用于家政服务^[2]、医疗康复^[3]、农业自动化^[4]、娱乐生活^[5]等领域的机器人更需要灵活精细的操作能力和交互能力。而仿人手的多指灵巧手可以抓取多种形状、不同材质的物体,还可以对所抓持的物体进行一定幅度的多种精细操作。

从 20 世纪 70 年代开始,工业发展对灵巧手的需求日趋显现。最早美国麻省理工学院和犹他大学联合研制成功的 Utah/MIT 手^[6]和美国斯坦福大学研制成功的 Stanford/JPL^[7]灵巧手,对后续灵巧手的发展产生了重要的影响,奠定了多指灵巧手的基本设计思想。德国宇航中心在 DLR-I 工灵巧手的基础上进一步研制成功了 DLR-II^[8]灵巧手,该灵巧

手设计的最终目标是使灵巧手具有自主决策能力。日本 Gifu 大学研制的 Gifu III 型灵巧手装有分布式触觉传感器。英国 SHADOW 公司的 Shadow^[9]灵巧手具有 5 个手指共 20 个自由度,由 40 根安装在前臂的气动肌肉驱动。韩国三星电子中心研制了 RoboRay Hand^[10]灵巧手,其具有反向驱动特性。

机器人技术的发展和工业生产中复杂操作的需求促进了对人手运动的研究。手作为人体最灵活的部分,具有 3 个最重要的功能,即探索、约束物体以及操纵任意形状的物体。为了使机器人多指灵巧手指操作协调统一和功能的最大开发,对手抓取操作物体的研究已经成为人手运动研究的重要内容。杨庆华等人^[11]通过对单手指的抓取运动进行分析发现,人手的关节转角运动符合一定的运动规律,可以用运动规律来控制柔性多指手的抓取运动过程。王华等人^[12]通过建立单指运动学模型,将运动轨迹规划运用到机械手的水下作业中。Zhu 等人^[13]根据自动抓取思想,提出了以物体与指尖运动轨迹的碰撞检测来代替整体的碰撞检测,以此提高抓取效率。朱玉乐等人^[14]基于灵巧手的运动学分析,对手指的可达操作区间进行了研究。张乔飞^[15]

① 国家自然科学基金(51775499),国家重点研发计划(2019YFB1302001)和省属高校基本科研业务费(RF-C2019004)资助项目。

② 女,1994 年生,硕士生;研究方向:软体机器人;E-mail:zyq5561@163.com

③ 通信作者,E-mail: gjbao@zjut.edu.cn

(收稿日期:2020-02-24)

将手指间的运动学关系和抓取的协同特性运用到假肢手的设计中,提出了新的复现人手运动谱的方法。

现有的研究大都基于自动抓取的思想对手建立运动轨迹模型,从动作规划来看,运动过程大多为抓取过程,缺少对手手内操作的研究。从抓取过程来看,运动轨迹大多基于传感设备做数据采集,然后加以软件拟合而成。但是在实际操作中,人手抓取之后会对物体进行重定位或是精细操作。本文根据人手外科解剖学的手指构造和已有的人手运动学模型,分析手指各指骨长度和手指间相对位置关系与运动规律,在前人研究的基础上设定手指操作目标物体的步态规划并建立指尖运动轨迹模型,最后通过实验对其论证。并应用于多指灵巧手精细操作物体的手内操作步态规划和运动仿真。

1 手指结构分析及操作规划

1.1 人手生理结构分析

根据人手解剖学结构图,人手由手掌和 5 根手指构成,对手操作来说,手指的运动为主要运动方式。五指除大拇指外,其余 4 指结构基本相同,每个手指由 3 个指节和 3 个关节构成,指节可以分为远指节、中指节和近指节,手指关节也可以分为远指节关节、中指节关节和近指节关节。拇指从外观看只有近指节和远指节 2 个指节,但从骨骼模型图上可以看出大拇指也是由 3 个关节组成,为掌腕关节、掌指关节和远指节关节。除大拇指外的四指的近指节能完成小幅度的摆动,但是手指的中指节和远指节只能完成弯曲运动,且两者之间为耦合运动。

1.1.1 人手指节长度规律

研究显示,四指远指节、中指节和近指节的长度之间存在统计学关系^[16]。假设食指的远指节长度为单位 1,整理了四指远指节长度、中指节长度和近指节长度的比例关系,如表 1 所示。对于拇指的指节长度,文献^[17]的研究表明,拇指的远指节长度和近指节长度之比约等于 1。

1.1.2 手指运动区间范围

拇指掌指关节为双轴向关节,主要作屈伸运动,另四指主要运动为外展、内收、屈伸和环转^[11],运动

表 1 四指指骨长度的比例关系

	远指节长度	中指节长度	近指节长度
食指	1	1.1 ~ 1.4	1.8 ~ 2.8
中指	1.1	1.4 ~ 2.0	2.4 ~ 3.0
无名指	1.1	1.4 ~ 1.9	2.2 ~ 3.1
小指	0.9	0.9 ~ 1.1	1.4 ~ 2.0

角度范围如表 2 所示。如果以中指为中间位置,四指掌骨相对于中指掌骨的偏转角作为四指相对于中指的初始偏角。拇指相对于中指的初始角度是五指平放在平面上,并且拇指向后伸展达到一个比较舒适的角度时,拇指朝向和中指掌骨朝向的夹角,可以得到四指偏转角度的置信区间^[18],整理如表 2。

表 2 人手指指节弯曲和偏转角度范围

	远指节弯曲角度/°	中指节弯曲角度/°	近指节弯曲角度/°	近指节偏转角度/°
拇指	0 ~ 90	—	0 ~ 20	45.7 ~ 54.7
食指	0 ~ 80	0 ~ 120	0 ~ 90	2.33 ~ 5.7
中指	0 ~ 80	0 ~ 120	0 ~ 90	0
无名指	0 ~ 80	0 ~ 120	0 ~ 90	1.5 ~ 4.5
小指	0 ~ 80	0 ~ 120	0 ~ 90	5.4 ~ 8.3

1.2 操作过程规划

手作为人体最灵活的部分可以完成很多复杂的手内操作模式,为了使研究结果更加清晰,先对操作过程进行一定的规划,以明确接下来需要分析的内容。

1.2.1 运动步态规划

以三指转动一个单位球体为典型运动模式,在任务空间上,可以根据实际操作过程对整个运动进行操作动作的分解,这里将精细操作中的一个子类问题称为步态问题。

此处的步态问题可以分为 4 个时期,如图 1 所示。(1)三指抓取期,让 3 个手指沿球体赤道线间隔 120 °均匀分布在球体表面,三指稳定抓取物体;(2)单指摆动期,以食指为例,食指离开物体,沿轴线边缘摆动改变接触点位置;(3)单指降落期,食指重新“降落”在物体赤道线上,中指和拇指同方向“起飞”和“降落”;(4)三指摆动期,直到 3 个手指都沿边缘运动结束,再同时摆动近指节,带动物体一起

转动到初始位置。当所有手指完成“起飞”任务并回到初始坐标点时,称其为一轮操作。也就是说,可以重新定位边缘上的一些手指,同时保持其余手指的抓取。本文将手指的步态定义为任意周期性的手指顺序序列。

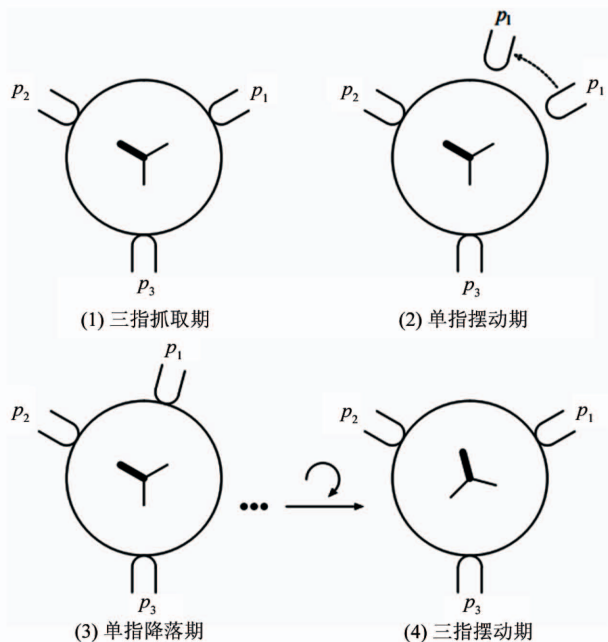


图1 三指操作步态示意图

1.2.2 操作过程的规则假设

在研究人手重定位操作目标物体问题时,为了使问题能够得到更好的定义,在操作过程中做出以下规则假设。

(1) 目标物体是光滑的,即不允许有角。更精确地说,就是要求边界是一个圆的物体。

(2) 手指在操作实验期间不考虑运动惯性和人手操纵的不稳定性,并且忽略各运动阶段之间的过渡曲线,以稳定抓取为前提条件,指端沿物体赤道线摆动,目的是研究其运动规律性。

(3) 一旦选择了手指沿边界的初始顺序(通过选择其中一个作为第一个,并逆时针传递给其他手指编号),那么在操作期间手指的顺序将保持不变。

2 单个手指的运动分析

2.1 指尖坐标位置分析

本文对手指的指骨和关节进行简化,将人手看

作是点杆式连接的刚体。根据设定的步态规划,三指是按相同的规律做同向运动,其运动过程的规律可以通过单个手指来表达。这里把食指手指指尖的运动过程作为研究对象,假设手指在 xy 坐标平面运动,不考虑 z 轴上的上下浮动,建立理想情况下的指尖运动轨迹模型。

2.1.1 几何学方法

假设目标物体为半径是 r 的球体,如图2所示, o 点为物体的质心, C_{ob} 为物体坐标系, C_b 为手指基坐标系,其与物体坐标系同 x 轴,且 o' 与 o 点之间的距离为 R 。指尖初始位置为起飞点 A 点, A 点在球体的赤道线上, A 点坐标设为 (x_1, y_1) ,经过一轮操作过程后运动到着陆点 B 点,虚线为指尖的运动轨迹,先以几何方法求解 B 点坐标 (x_2, y_2) 。

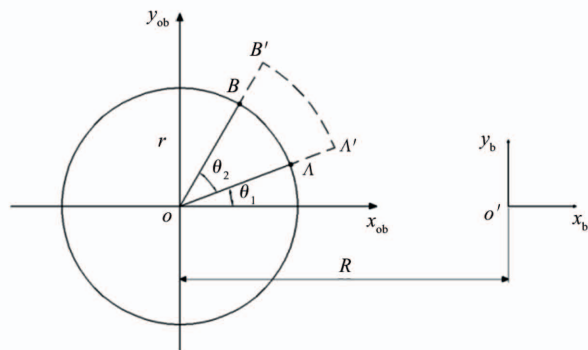


图2 指尖运动轨迹的几何示意图

若以球心质点为原点,根据几何示意图可以求出 B 点坐标为

$$\begin{aligned} x_2 &= r \cos(\theta_1 + \theta_2) = r(\cos\theta_1 \cos\theta_2 - \sin\theta_1 \sin\theta_2) \\ &= x_1 \cos\theta_2 - y_1 \sin\theta_2 \\ y_2 &= r \sin(\theta_1 + \theta_2) = r(\sin\theta_1 \cos\theta_2 + \cos\theta_1 \sin\theta_2) \\ &= y_1 \cos\theta_2 + x_1 \sin\theta_2 \end{aligned} \quad (1)$$

若将 o' 点作为原点,可得出转换后的手指运动时的指尖轨迹方程为

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \sin\theta_1 & -r \sin\theta_1 & 0 & -R \\ r \sin\theta_1 & r \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta_2 \\ \sin\theta_1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.1.2 齐次变换矩阵方法

图3所示为食指单指抓取的坐标系,从中可以

得到手指与目标物体构成的封闭运动链。其中目标物体坐标系为 C_{ob} , 手指基坐标系为 C_b , 全局坐标系为 C_G 。 R 为手指基坐标距离全局坐标系的长度, a_1 、 a_2 、 a_3 为食指每段指节的长度, r 为球体的半径。

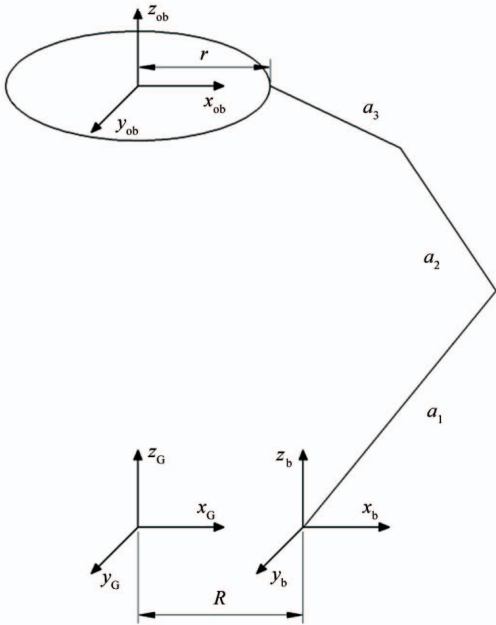


图 3 手封闭的食指抓取链

图 3 中的运动链满足：
$${}^G_bT = {}^G_b({}^b_1T_2{}^b_2T_3{}^b_3T_4{}^b_4T_5{}^b_5T_6)T_{ob} = {}^G_bT_5^bT_{ob}^5T \quad (3)$$

通常情况下, 手指基坐标系与全局坐标系之间的坐标变换矩阵是常量, 由手掌的结构参数决定, 则：

$${}^G_bT = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -R \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

假设物体坐标系相对于全局坐标系的齐次变换矩阵为

$${}^G_{ob}T = \begin{bmatrix} c_\alpha c_\beta & c_\alpha s_\beta s_\gamma - s_\alpha c_\gamma & c_\alpha s_\beta c_\gamma + s_\alpha s_\gamma & x \\ s_\alpha c_\beta & s_\alpha s_\beta s_\gamma + c_\alpha c_\gamma & s_\alpha s_\beta c_\gamma - c_\alpha s_\gamma & y \\ -s_\beta & c_\beta s_\gamma & c_\beta c_\gamma & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

可以得到指尖在其手指基坐标中的位置 $\{x_t, y_t, z_t\}$ ：

$$\begin{cases} x_t = -c_\beta c_\delta r + x + R \\ y_t = -(s_\alpha s_\beta c_\delta + c_\alpha c_\delta)r + y \\ z_t = -(-c_\alpha s_\beta c_\delta + s_\alpha s_\delta)r + z \end{cases} \quad (6)$$

在拟定的运动中, 指尖坐标系沿 z 轴向上平移 a 之后, 绕 Z 轴转过 θ 角度, 可以得到：

$$\begin{cases} x_t = -r \cos \theta + R \\ y_t = -r \sin \theta \\ z_t = a \end{cases} \quad (7)$$

齐次变换矩阵的方法得到的结果与几何方法相符合, 由此可以得出指尖到物体质心的距离变化规律 $s(t)$, 假设手指为匀速运动, 速度为 v , 则有：

$$\begin{cases} r + vt & (0 < t < \frac{R-r}{v}) \\ R & (\frac{R-r}{v} < t < \frac{\pi R \theta}{180v} + \frac{R-r}{v}) \\ 2R + \frac{\pi R \theta}{180} - r - vt & (\frac{\pi R \theta}{180v} + \frac{R-r}{v} < t < \frac{\pi R \theta}{180v} + \frac{2R-2r}{v}) \\ r & (\frac{\pi R \theta}{180v} + \frac{2R-2r}{v} < t < \frac{\pi \theta (6R+r)}{180v} + \frac{6R-6r}{v}) \\ \dots\dots \end{cases} \quad (8)$$

2.2 手指运动轨迹方程

按照规划的手指步态, 指尖从 A 点运动到 A' 点, 再绕 Z 轴转动一定角度到达 B' 点, 最后落到 B 点。当 3 个手指依次完成该操作后, 同时转动手指的近指节关节, 指尖将回到起飞原点, 即 A 点。以单指指尖位置为例, 分析其在 xy 平面所做的运动轨迹, 如图 4 所示。

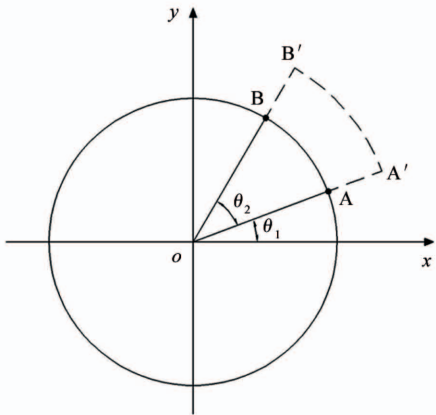


图 4 指尖运动轨迹的几何示意图

指尖的运动轨迹用三次笛卡尔多项式法, 通过平滑输出 x, y 的初值 x_1, y_1 和终值 x_2, y_2 之间的插

值来求解^[19],采用式(9)三次多项式,令 $s_1=0$, $s_2=1$ 。

$$\begin{aligned} x(s) &= s^3x_2 - (s-1)^3x_1 + \alpha_x s^2(s-1) \\ &\quad + \beta_x s(s-1)^2 \\ y(s) &= s^3y_2 - (s-1)^3y_1 + \alpha_y s^2(s-1) \\ &\quad + \beta_y s(s-1)^2 \end{aligned} \tag{9}$$

为了满足 x 和 y 的边界条件,则有

$$\begin{aligned} x' &= k\cos\theta \\ y' &= k\sin\theta \end{aligned} \tag{10}$$

其中 k 为自由参数, k 的选择会影响路径的方向和曲度,如图5所示。

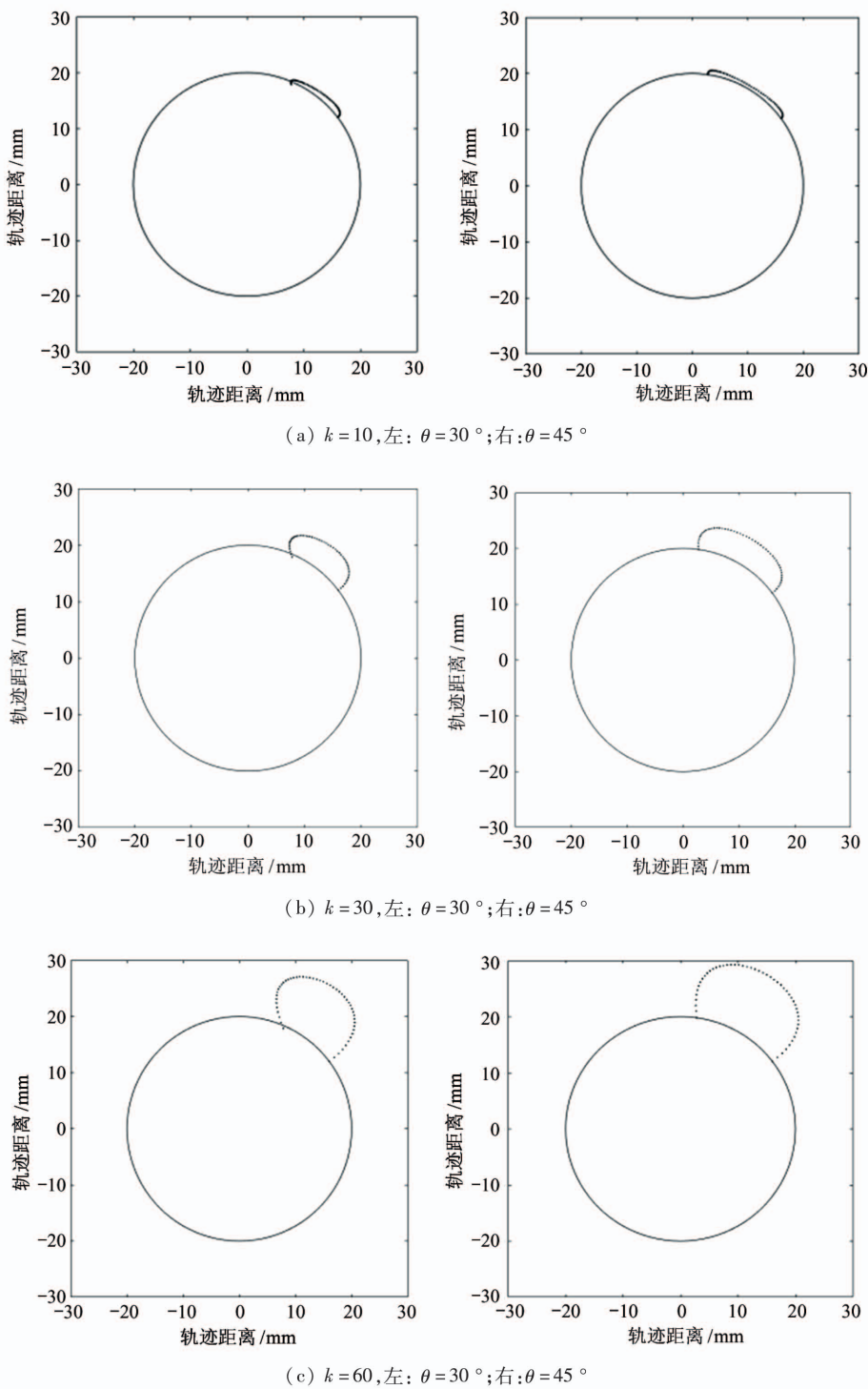


图5 用三次笛卡尔多项式法规划出的指尖运动路径

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} k\cos\theta_2 - 3x_2 \\ k\sin\theta_2 - 3y_2 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \beta_x \\ \beta_y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} k\cos\theta_1 - 3x_1 \\ k\sin\theta_1 - 3y_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{11}$$

这里令食指的起飞点的坐标为 $y_1(16, 12)$, 手指绕物体坐标系的 z 轴逆时针转过 30° 和 45° , 根据第 2 节的方法可以得到降落点的坐标 $y_2(8\sqrt{3}-6, 6\sqrt{3}+7.5)$ 和 $y'(2\sqrt{2}, 14\sqrt{2})$, 由此可以得到 α_1 、 α_2 、 β_1 和 β_2 的值。轨迹弧形的弯曲程度取决于 k 值的大小, 这里分别取 $k=10$ 、 30 和 60 , 画出其轨迹, 如图 5 所示。

由以上模型及仿真, 建立了三指操作球体转动基本动作的步态模块, 可以描述人手手内操作过程中单手指的运动过程及其特性。

3 实验分析

3.1 实验准备

为了获取手指操作目标物体过程的运动规律, 设计了实验, 实验过程如下。

3.1.1 实验手指连杆机构长度测量

根据《人体测量手册》^[20] 中定点定位活体测量的要求, 测量了实验手指的各指节长度。远指节为背侧远指关节与指尖之间的直线距离; 中指节是背侧远指关节和近指关节之间的直线距离; 近指节是手指近指关节和中指关节之间的直线距离。测量工具为游标卡尺, 通过测量得出拇指的远指节和近指节的长度分别为 28.6 mm 、 35.3 mm , 食指的远指节、中指节和近指节的长度分别为 21.8 mm 、 26.0 mm 和 46.2 mm , 中指的远指节、中指节和近指节长度分别为 23.0 mm 、 32.2 mm 和 50.0 mm 。三指近指节中心点距离食指指尖投影到手掌坐标系的距离, 食指垂直时候距离为 30 mm , 最远距离为 70 mm 。

所操作的目标物体是直径为 40 mm 的乒乓球, 乒乓球距顶点中心 15 mm 处间隔 120° 分布 3 个反光球, 以测定球本身的运动数据。

3.1.2 三指操作过程的数据测量

模拟用三指按照所规划的步态操作直径为 40 mm 的乒乓球, 对这一过程用 NOKOV 光学三维动

作捕捉系统的摄像功能对手指操作目标物体的过程进行摄像。NOKOV 系统可采集人手的操作过程的运动轨迹和运动学参数, 并进行数据处理。

实验 1 将反光球置于球上 3 点处, 另外 3 个反光球置于三指指尖, 在系统中心按照规划的步态转动目标物体, 如图 6(a) 所示, 图中 O 点为坐标原点。通过系统自带软件按照每秒 60 组数据导出关于指尖坐标的 Excel 表格, 得到操作过程中各手指的指尖坐标和速度、加速度变化数据。

实验 2 将反光球分别置于食指指尖、远指节关节、中指节关节、近指节关节以及手掌背面, 如图 6(b) 所示。仍旧在系统中心按照规划的步态转动目标物体, 测量操作过程手指关节的角度变化。

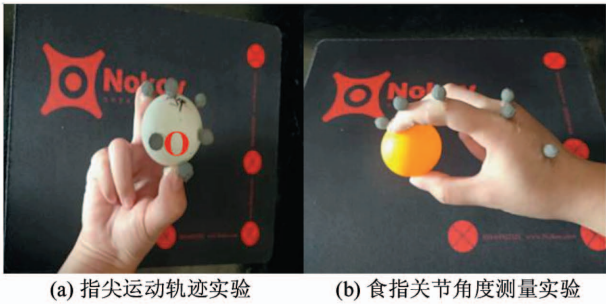


图 6 三指操作目标物体实验

3.2 指尖运动轨迹随时间变化分析

在指尖到物体质心的距离变化规律 $s(t)$ 中, 根据表 2, 令 a_5 为球体半径 20 mm , 按照人手生理结构及最优运动幅度, 假设 a_1 为手指近指关节到手掌全局坐标系原点之间的距离是 25 mm , 转动角度为 30° , 运动速度为 30 mm/s , 可以得到模拟的距离曲线, 如图 7 中曲线(1)所示。

在系统中进行了多组实验, 每组实验测时为 30 s , 待操作过程趋于稳定后, 截取其中第 $10\sim 20\text{ s}$ 的实验数据进行分析。在以食指为例的分析中, 图 7 中曲线(2)为实验测得的食指与目标物体中心的距离曲线图。

从图 7 可以看出, 理论值曲线和实测值曲线同为类抛物线图, 符合所描述运动规律。曲线最低值为物体半径, 两者大体一致。但是两者在相位和幅值上存在误差, 其原因主要在于理论数据人为设定了恒定的速度和指尖最远距离, 而人手实验不能很

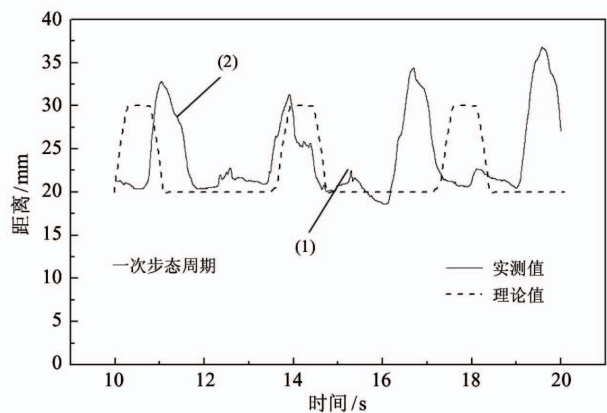


图7 食指指尖到物体中心的距离变化曲线

好地控制人手做匀速运动和每次动作幅度一样,这些因素都将影响实验结果与理论仿真的拟合。

图8为实验2中第10~20s食指近指节关节的角度实测曲线,与图7中指尖距离曲线相比较,同为上升急速平滑、下降平缓的类抛物线,符合所规划步态的运动规律。

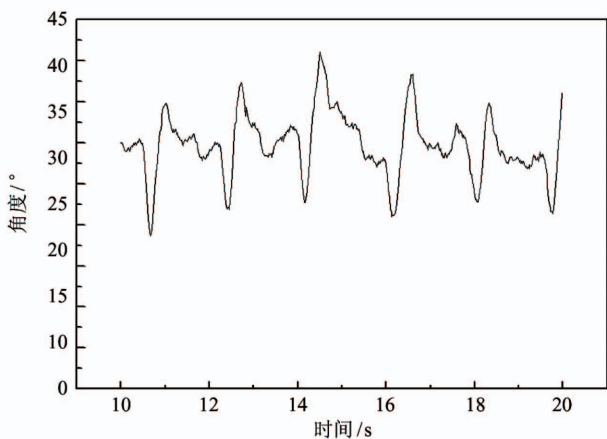


图8 食指近指节关节角度实测变化曲线

按照笛卡尔三次多项式,考虑到不干扰目标物体运动以及人手操作的最优范围,选择 $k=30$ 、 $\theta=45^\circ$ 的轨迹曲线。根据规划的步态模式,食指达到降落点,等待其余手指完成起飞和降落之后,同时转动近指节关节,3个手指指尖回到起飞坐标位置,完成一轮操作任务。所以食指指尖的理论运动轨迹如图10中曲线(1)所示,并以此类椭圆曲线做循环运动。图10中曲线(2)所示为图9实验中10~20s时间内4轮操作运动拟合而成的曲线。可以看出,图像基本为区域范围内的类椭圆形运动,与理论图形

大致相同。理论数据设定了恒定人手运动角度和远离目标物体的最大距离,而人手运动时角度和距离存在不稳定性,且中指摆动时会对食指的基关节有所拉扯,导致食指位置变化,所以两者在范围上存在一定差距。若不考虑人手抖动导致的曲线锐化,图形比较符合所描述的运动规律,机械灵巧手不存在基关节拉扯和运动角度不定的情况,该理论曲线可用于机械手的研发。

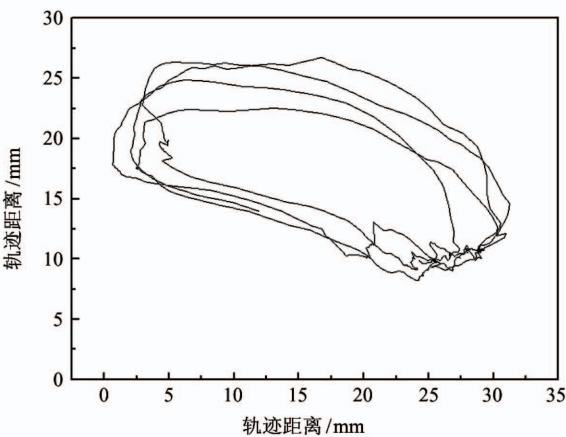


图9 10~20s食指指尖运动实验轨迹曲线

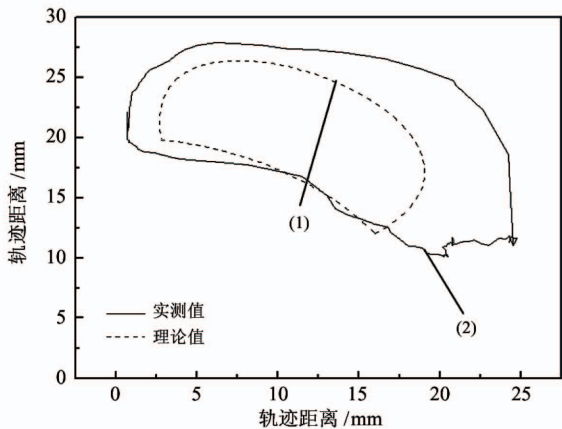


图10 一轮任务中的食指指尖运动轨迹曲线

通过多组实验对指尖运动轨迹模型进行了验证,证明了该步态模式和运动轨迹方程符合认知速度和人手操作习惯。同时对理论研究过程中假设的速度和手指相对于手掌的变换矩阵有了实际的参考数值,提高了理论分析的准确度。理论模型基于步态模式的建立和拆解,将完整的操作过程分为多个子运动,再作为碎片式动作模块组合为操作运动,可适用于更多同类目标物体的重定位操作。

4 结 论

在分析人手指运动特征的基础上,建立了指尖运动轨迹的模型。通过实验对操作步态和运动模型进行了验证,当三指操作已知形状的目标物体时,指尖的位置运动轨迹可以由一定的运动规律来描述。因此,可以用一定的运动规律来控制多指灵巧手操作目标物体的运动过程,且在加速度约束范围内设定需要的操作时间和速度。这一结果对多指灵巧手的进一步研究和开发以及手内精细操作和抓取之后的手内重定位具有积极的指导意义,后期可以期待对更复杂形状的物体操作以及非循环操作问题进行研究,进一步完善手内操作规划。

参考文献

[1] 钱善华,葛世荣,王永胜,等. 救灾机器人的研究现状与煤矿救灾的应用[J]. 机器人, 2006, 28(3): 350-354

[2] 李铁凤,李国瑞,梁艺鸣,等. 软体机器人结构机理与驱动材料研究综述[J]. 力学学报, 2016, 48(4): 756-766

[3] 李光林,郑悦,吴新宇,等. 医疗康复机器人研究进展及趋势[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(6): 793-802

[4] 赵欣. 智能机器人在农业自动化领域的主要应用[J]. 中国农学通报, 2010, 26(10): 360-364

[5] 周建荣. 教育娱乐机器人在当今的发展[J]. 机器人技术与应用, 2007(6): 21-21

[6] 贾灵. 三指灵巧手控制和感知系统的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学机电工程学院, 2003

[7] Iversen E, Sear H H, Jacobsen S C. Artificial arms evolve from robots or vice versa[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2005, 25(1):16-20

[8] Haidacher S, Jörg Butterfaß, Fischer M, et al. DLR hand II: hard- and software architecture for information processing[C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Taipei, China, 2003: 14-19

[9] Shadowrobot. Shadowrobot [EB/OL]. <https://www.shadowrobot.com/>; Shadowrobot, 2018

[10] Kim Y J, Lee Y, Kim J, et al. RoboRay hand: a highly backdrivable robotic hand with sensorless contact force measurements[C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Hong Kong, China, 2014: 6712-6718

[11] 杨庆华,张立彬,阮健,等. 人类手指抓取过程关节的运动规律研究[J]. 中国机械工程, 2004, 15(13): 1154-1157

[12] 王华. 水下灵巧手运动学分析与实验[J]. 机械传动, 2012, 36(3): 67-69

[13] Zhu Z H, Gao S M, Wan H G, et al. Trajectory-based grasp interaction for virtual environments[C] // Proceedings of the 24th International Conference on Advances in Computer Graphics, Hang Zhou, China, 2006: 300-311

[14] 朱玉乐,郭冰菁. 人工肌肉驱动的多指灵巧手运动学计算与分析[J]. 机械设计与制造, 2013(11): 224-227

[15] 张乔飞. 人手运动特征分析与机械实现[D]. 武汉:华中科技大学机械科学与工程学院, 2015: 13-21

[16] Szabo R M. Surgical anatomy of the hand and upper extremity[J]. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 2003, 85(12): 2495-2496

[17] Hamilton R, Dunsmuir R A. Radiographic assessment of the relative lengths of the bones of the fingers of the human hand[J]. *Journal of Hand Surgery*, 2002, 27(6): 546-548

[18] 史浩浩. 基于人手形态特征的拟人手设计方法研究[D]. 武汉:华中科技大学机械科学与工程学院, 2019: 14-20

[19] 布鲁诺·西西里安诺. 机器人学:建模、规划与控制[M]. 西安:交通大学出版社, 2015: 354-360

[20] 邵象清. 人体测量手册[M]. 上海:上海辞书出版社, 1985

Research on the regularity of the movement trajectory of human hand operating the target object

Zhang Yaqi, Zhou Bangda, Ma Xiaolong, Cai Shibo, Bao Guanjun

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

Abstract

Based on the physiological characteristics of fingers and the motion characteristics between fingers, the sphere motion process of the three-finger operation unit is analyzed. Then the gait pattern of the finger motion is designed, and the motion characteristics of the fingertips during the operation and the laws of the fingertip motion trajectory are discussed. Using the NOKOV software visual capture system, the object rotation speed and finger movement trajectory of the finger operation process are measured, and the three-finger rotation operation motion is analyzed, simulated and compared. The experimental results show that the finger rotation movement of the target object by man's hand conforms to the movement law of the planned gait. The research results are instructive for the motion simulation of finger repositioning objects and the gait planning of in-hand operations.

Key words: three-finger movement gait, finger movement trajectory, movement law