

基于有限元的人体-机械手交互力计算方法

李学勇^{1,2,3}, 赵仲秋^{1,2}, 张春松^{1,2}, 路长厚^{1,2,3}

(1. 山东大学机械工程学院, 济南 250061; 2. 山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室, 济南 250061;
3. 山东大学机械工程专业国家级实验教学示范中心, 济南 250061)

摘要:通过建立人肢体骨骼、肌肉组织与康复机器人机械手指节表面的曲面方程, 对人肢体肌肉组织划分微元, 通过微元的应变逐步求解康复机器人机械手的指节压力, 从而实现对人机交互力的计算与分析。在简化模型仿真验证中, 展现了位移量(压入量)、交互位置、人肢体软组织弹性模量、泊松比等参数对人机交互力的影响规律, 位移量为 5 mm 时, 理论计算与仿真结果的平均相对误差在 10%~15% 左右。仿真结果表明: 本文理论可以有效计算康复机器人机械手的指节压力, 能对人机交互力进行计算与评价。

关键词:机械电子工程; 人机交互力; 仿人康复机器人; 有限元; 可变形体抓取

中图分类号: TP242.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2021)05-1612-08

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb20200501

Finite element based calculation method of human-robot interaction force

LI Xue-yong^{1,2,3}, ZHAO Zhong-qiu^{1,2}, ZHANG Chun-song^{1,2}, LU Chang-hou^{1,2,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, China; 3. National Demonstration Center for Experimental Mechanical Engineering Education, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The proposed method builds surface equations of bones, muscle of human limb and robot fingers, divides finite elements of muscle tissue of human limbs, gradually obtains finger force of rehabilitation robot hand, and finally realizes the calculation and analysis of human-robot interaction force. In simulation verification of simplified model, the effects of displacement, position of interaction, elasticity modulus of human soft tissue and Poisson's ratio on human-robot interaction force are revealed, and the average relative error between theoretical calculation and simulation data varies from 10% to 15% when the displacement is 5 mm. The simulation outcomes indicate that the proposed theory is able to effectively calculate finger force of rehabilitation robot hand, calculate and evaluate human-robot interaction force.

Key words: mechatronic engineering; human-robot interaction force; humanoid rehabilitation robot; finite element; deformable object grasping

收稿日期: 2020-07-04.

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2019GGX104038); 山东大学基本科研业务费专项项目(2016JC001).

作者简介: 李学勇(1974-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 机器人. E-mail: mechsd@163.com

0 引言

近年来,因年老、中风以及意外事故造成的重度失能人员越来越多,需要对其四肢定时进行康复运动,以保持关节活动度、促进血液循环、防止肌肉萎缩^[1,2]。这类康复运动简单往复、劳动强度大,适合由康复机器人辅助完成。

康复机器人可以分为末端牵引式、外骨骼式^[3]、坐卧式、悬挂式等^[4]等多种类型,尽管很多已经用于临床,但由于结构所限,大多数康复机器人只能完成一种或少数几种康复运动,通用性和柔性差。最近推出的一种康复方案^[5]使用通用机械臂,将人肢体绑缚在机械臂末端的执行器上,由机械臂带动人肢体完成康复训练。这种康复方案可以左、右肢和上、下肢通用,具有很好的柔性和通用性,其结构也更简单。但是,因为人肢体与末端执行器之间采用绑缚方式固定,存在绑缚过程繁琐、适应性差等问题。因此,研究一种模仿人手能直接抓握人肢体完成康复动作的仿人康复机械手^[6,7]具有重要意义。与其他应用场合不同,以人肢体为被抓取对象,对机械手提出了更高的要求。较小的抓取力可能会导致人肢体意外掉落;而较大的抓取力可能会使患者不适、甚至受伤。另外,人肢体外部的肌肉、脂肪、皮肤等都是软体组织,受抓取力后会产生形变,如何计算施加抓取力后人肢体组织与机械手间的交互力是实现软体安全稳定抓取的关键问题。

力封闭^[8,9]广泛应用于刚性物体的抓取稳定分析,但是可变形物体的稳定抓取仍是一个难题,缺少有效和通用的方法。能量优化法^[10,11]常被用于抓取可变形物体的形变预测,其分析结果也较为精确,但数据量计算非常大,很难实时操作。Kim等^[12]采用形封闭法研究可变形物体的稳定抓取,该方法需要机械手对被抓物体的完全包围,会导致机械手尺寸过大,很难用于康复机械手的设计与分析。本文提出了一种基于有限元的人机交互力数值计算方法,能快速计算不同交互状态时人肢体与机械手指之间的压力,实现对人机交互力的分析,既可用于对抓取操作的安全可靠性进行评估,又可指导仿人机械手的结构与控制设计。

1 基于有限元的人机交互力计算理论

基于有限元的人机交互力计算分为以下 3 个步骤:建立机械手指节模型、建立人肢体肌肉和骨

骼的有限元模型、进行人机交互力计算。

1.1 建立机械手指节模型

图 1 为机械手的 n_1 个指节表面曲面方程 $f^i(x, y, z), i = 1, 2, \dots, n_1$ 。机械手参考点位置为 $(R_x R_y R_z)$, 表示机械手在坐标系中的位置,加之指节 1 相对于 $(R_x R_y R_z)$ 的旋转 θ_1 和位移 h_1 , 可获取指节 1 参考点位置 $(R_x^1 R_y^1 R_z^1)$, 进一步依据指节 1 的几何特征获得指节 1 在坐标系中的曲面方程:

$$(R_x R_y R_z) \xrightarrow{\theta_1, h_1} (R_x^1 R_y^1 R_z^1) \xrightarrow{\text{指节1几何特征}} f^1(x, y, z) \quad (1)$$

同理,指节 i 相对于 $(R_x^{i-1} R_y^{i-1} R_z^{i-1})$ 的旋转和位移分别为 θ_i, h_i , 依据指节 i 的几何特征可获得指节 i 在坐标系中的曲面方程:

$$(R_x^{i-1} R_y^{i-1} R_z^{i-1}) \xrightarrow{\theta_i, h_i} (R_x^i R_y^i R_z^i) \xrightarrow{\text{指节}i\text{几何特征}} f^i(x, y, z) \quad (2)$$

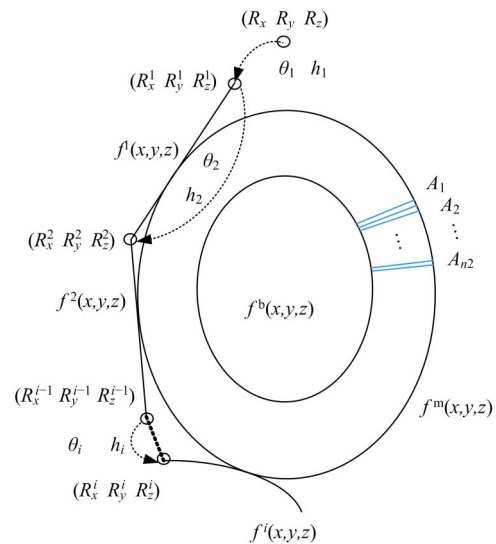


图 1 指节表面方程的构建与微元的划分

Fig. 1 Establishment of equations of finger surface and divisions of finite elements

1.2 建立人肢体肌肉和骨骼的有限元模型

通过医学影像学工具获得人肢体肌肉外表面曲面方程为 $f^m(x, y, z)$, 骨骼外表面曲面方程为 $f^b(x, y, z)$ 。由于人肢体肌肉是柔性体,为其划分微元的如图 1 所示,在 $f^m(x, y, z)$ 上划分边长为 c 的正方形网格,沿网格向肌肉内部放射状延伸,直至 $f^b(x, y, z)$, 则肌肉被划分为 n_2 个微元 A_1, A_2, \dots, A_{n_2} 。

1.3 进行人机交互力计算

机械手对人肢体施加抓取力, $f^i(x, y, z)$ 与

$f^m(x, y, z)$ 发生交互,如图 2 所示。肌肉微元 A 在被机械手压迫的过程中,发生位移 $u = (u_x \ u_y \ u_z)^T$ 。令 A 的应变为 $\epsilon = (\epsilon_x \ \epsilon_y \ \epsilon_z \ \gamma_{xy} \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx})^T$, ϵ 可基于 u 计算:

$$\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & & & & & \\ & \frac{\partial}{\partial y} & & & & \\ & & \frac{\partial}{\partial z} & & & \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & & & & \\ & & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} & & \\ \frac{\partial}{\partial z} & & \frac{\partial}{\partial x} & & \frac{\partial}{\partial y} & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

设肌肉组织的弹性模量和泊松比为 E, u_0 。 A 受到的应力为 $\sigma = (\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \tau_{xy} \ \tau_{yz} \ \tau_{zx})^T$, σ 可基于 ϵ 计算:

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{pmatrix} = \frac{E(1-u)}{(1+u)(1-2u)} \times \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & \frac{u}{1-u} & \frac{u}{1-u} \\ \frac{u}{1-u} & 1 & \frac{u}{1-u} \\ \frac{u}{1-u} & \frac{u}{1-u} & 1 \\ & & \frac{1-2u}{2(1-u)} \\ & & \frac{1-2u}{2(1-u)} \\ & & \frac{1-2u}{2(1-u)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

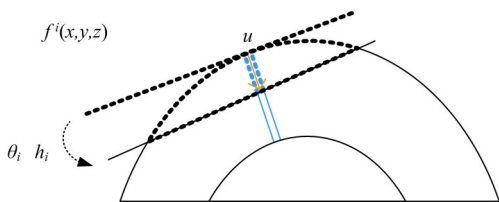


图 2 机械手指节与人肢体交互

Fig. 2 Interaction of robot finger and human limb

A 与曲面 $f^i(x, y, z)$ 接触点的单位法向量为 $(l^i \ m^i \ n^i)^T$, 则 A 受到的正应力 σ_i 为:

$$\sigma_i = \frac{(\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z) \cdot (l^i \ m^i \ n^i)}{|(l^i \ m^i \ n^i)|} (l^i \ m^i \ n^i)^T = (\sigma_x l^i + \sigma_y m^i + \sigma_z n^i) (l^i \ m^i \ n^i)^T \quad (5)$$

机械手第 i 个指节受到的肌肉微元的作用力 F_i 为:

$$F_i = \sum c^2 \sigma_i \quad (6)$$

式中: F_i 为机械手的指节压力。

2 简化模型仿真验证

由于人肢体复杂的生理结构,很难获得人体肌肉及骨骼外表面的曲面方程。为验证本文提出的基于有限元的人机交互力计算法方法的正确性,分别以二指二关节和二指三关节机械手为例进行人机交互力计算,并对机械手指及人肢体模型进行简化,具体为:①将机械手指节表面简化为空间平面;②将人肢体肌肉、骨骼表面简化为空间解析曲面。以下重点介绍对二指二关节机械手进行人机交互力计算及使用有限元软件对计算结果进行验证的实现方法和过程。利用三关节简化模型进行计算的过程与二关节类似。

2.1 二指二关节简化模型的构建

2.1.1 机械手指节模型

二指二关节机械手模型如图 3(a) 所示。具有两个对称分布的手指,每个手指有两个指节,指节 1 通过一个平移关节连接在机械手基体上,指节 2 通过一个旋转关节连接在指节 1 上。在简化模型中,机械手与人肢体如图 3(b) 所示,图中各坐标轴单位为 mm。

机械手参考点位置如图 3(a) 中 $(R_x \ R_y \ R_z)$ 所示,指节 1 相对于 $(R_x \ R_y \ R_z)$ 无旋转,有平行位移,位移量为 h_1 。根据指节 1 的结构和机械手在坐标系中的空间位置,指节 1 参考点位置 $(R_x^1 \ R_y^1 \ R_z^1) = (R_x - 12 \ R_y \ R_z - 18 - h_1)$, 依据指节 1 的几何特征,依据式(1),可得指节 1 在坐标系中的平面方程 $f^1(x, y, z)$:

$$\begin{cases} z - R_z + 18 + h_1 = 0 \\ R_x - 100 \leq x \leq R_x - 12 \\ R_y \leq y \leq R_y + 36 \end{cases} \quad (7)$$

指节 2 相对于 $(R_x^1 \ R_y^1 \ R_z^1)$ 的旋转量为 θ_2 , 无位

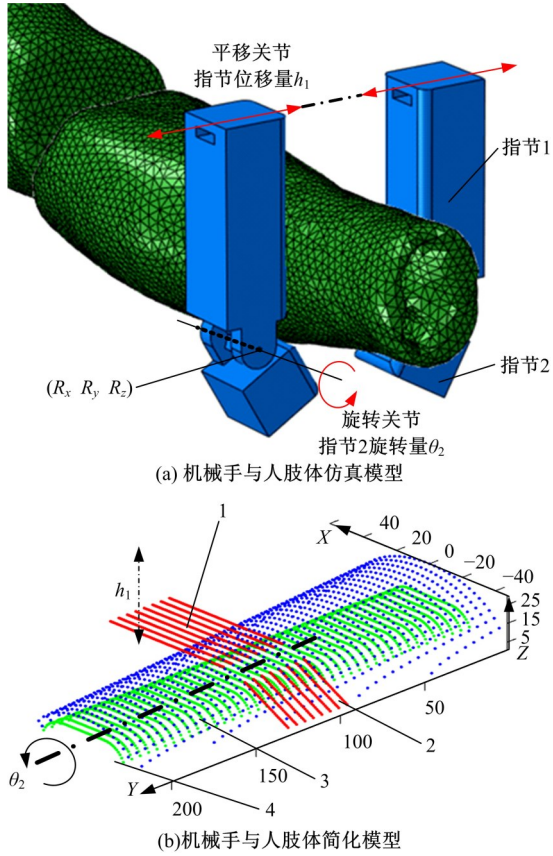


图 3 机械手与人肢体模型

Fig. 3 Model of robot hand and human limb

移。根据指节 2 的结构和机械手在坐标系中的空间位置,指节 2 参考点位置 $(R_x^2 R_y^2 R_z^2) = (R_x - 18\sin\theta_2 + 12\cos\theta_2 R_y R_z - h_1 - 18\cos\theta_2 - 12\sin\theta_2)$ 依据指节 2 的几何特征,依据式(2)可得指节 2 在坐标系中的平面方程 $f^2(x, y, z)$:

$$\begin{cases} x \sin\theta_2 + z \cos\theta_2 - \\ \sin\theta_2(R_x - 18\sin\theta_2 + 12\cos\theta_2) - \\ \cos\theta_2(R_z - h_1 - 18\cos\theta_2 - 12\sin\theta_2) = 0 \\ R_x + 12\cos\theta_2 - 18\sin\theta_2 \leq x \leq \\ R_x + 42\cos\theta_2 - 18\sin\theta_2 \\ R_y \leq y \leq R_y + 36 \\ R_z - 42\sin\theta_2 - 18\cos\theta_2 - h_1 \leq z \leq \\ R_z - 18\cos\theta_2 - 12\sin\theta_2 - h_1 \end{cases} \quad (8)$$

2.1.2 人肢体肌肉和骨骼的有限元模型

参考成年男子上肢肢体尺寸,以解析曲面代替人肢体肌肉、骨骼实际曲面。建立简化肌肉表面方程 $f^m(x, y, z)$,如图 3(b)所示,划分微元大小 $c = 1 \text{ mm}$ 。其在坐标系中的曲面方程为:

$$\begin{cases} x^2 + \frac{z^2}{30^2} - \frac{(y - 618)^2}{618^2} = 0 \\ 0 \leq y \leq 206 \end{cases} \quad (9)$$

建立简化骨骼表面方程 $f^b(x, y, z)$,其在世界坐标系中的曲面方程为:

$$\begin{cases} (x + 12.5)^2 + z^2 - 12.5^2 = 0, -25 \leq x < -12.5 \\ z - 12.5 = 0, -12.5 \leq x \leq 12.5 \\ (x - 12.5)^2 + z^2 - 12.5^2 = 0, 12.5 < x \leq 25 \\ 0 \leq y \leq 206 \end{cases} \quad (10)$$

2.1.3 人机交互力计算

在简化模型中,影响人机交互力的关键参数有机械手抓取肢体的位置 $(R_x R_y R_z)$ 、指节 1 的位移量 h_1 、指节 2 的旋转量 θ_2 、肌肉组织的弹性模量 E 、肌肉组织的泊松比 u 。因此选取以上参数进行对照计算,参数具体数值如表 1 所示。在每个仿真组中,令 h_1 分别为 2、3、4、5 时,根据机械手指节表面 $f^1(x, y, z)$ 、 $f^2(x, y, z)$ 与人肢体肌肉表面 $f^m(x, y, z)$ 的交互情况,获取肌肉微元的位移 u ,通过式(3)~(6)可分别计算得指节 1 与人肢体的交互力 F_1 ,指节 2 与人肢体的交互力 F_2 。其中,在 θ_2 的影响下,指节 2 会发生穿入骨组织或与肌肉组织无接触等情况,因此将其值固定为 30° 。

表 1 二指二关节机械手计算与仿真参数

Table 1 Parameters of calculation and simulation

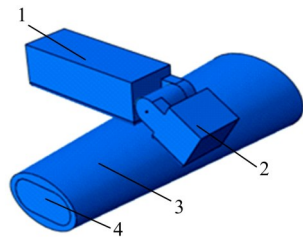
仿真组	$(R_x R_y R_z)$	E/MPa	u	$\theta_2/(\text{°})$	h_1/mm
1	(20 30 47)	0.5×10^6	0	30	2, 3, 4, 5
2	(20 95 44)	0.5×10^6	0	30	2, 3, 4, 5
3	(20 30 47)	1.0×10^6	0	30	2, 3, 4, 5
4	(20 30 47)	0.5×10^6	0.2	30	2, 3, 4, 5

2.2 二指二关节机械手仿真验证

通过软件 ABAQUS 对简化模型计算的指节压力的准确性进行验证。建立与 2.1 所述简化模型相同的仿真模型,如图 4 所示。

依据表 1 的参数进行指节压力的仿真,4 组仿真验证的指节压力的计算值与理论值的对比如图 5 所示,其中横坐标代表指节位移量 h_1 的值,mm;纵坐标代表指节压力的大小,压力方向沿各指节法向,N。

通过图 5(a)对比第一组仿真验证的指节压力的计算值与仿真值,指节压力相对误差计算如式(11)所示,相对误差如图 6 所示,其中横坐标代



1-指节1;2-指节2;3-肌肉组织;4-骨组织

图 4 简化仿真模型

Fig. 4 Simplified simulation model

表指节位移量,mm;纵坐标代表相对误差值。由于较小的交互力受系统误差的影响较大,指节1指节压力的计算值与仿真值相对误差随指节1位移量的增加而减小,最大相对误差为 23.30%,最小相对误差为 1.64%。指节2指节压力的计算值与仿真值相对误差保持在 15% 左右。产生差距的原因是:①提出的计算方法与实际的有限元方法相比,简化了计算过程,在理论上不可避免地存在误差;②在 ABAQUS 中使用的肌肉模型,无法通过 $f^m(x, y, z)$ 方程直接建立,因此在 Solid Works 中采取“放样凸台”的方法建立,与肌肉表面的曲面方程 $f^m(x, y, z)$ 稍有不同,因此造成了误差。其中,指节1的指节压力 F_1 相符程度较好,指节2的指节压力 F_2 相符程度稍差,原因是倾斜的指节2平面增加了简化模型与仿真模型中的机械手与人肢体的交互误差。

$$\delta = \frac{|F_{\text{计算}} - F_{\text{仿真}}|}{F_{\text{计算}}} \times 100\% \quad (11)$$

第二组仿真验证更改了机械手抓取人肢体的位置,将抓取位置改为前臂远端,由图 5(b)可得出,验证数据结果与第一组类似:指节1的指节压力 F_1 相符程度较好,指节2的指节压力 F_2 相符程度稍差。

与第一组仿真验证相比,第三组更改了肌肉模型的弹性模量 E ,由 0.5×10^6 MPa 增大到 1.0×10^6 MPa。通过图 5(c)可得,指节压力计算值增加到原来的 2 倍,因为在简化模型中,更改弹性模量不能影响整个模型的任何一个微元的应变状态,每个微元的应变量与第一组相同,指节压力的变化与弹性模量的变化正相关。但是,第三组仿真验证的仿真值未严格增大为第一组仿真值的 2 倍,因为在仿真过程中,每个微元之间可相互影响,应变状态会随弹性模量的变化有少量改变。

与第一组仿真验证相比,第四组更改了肌肉

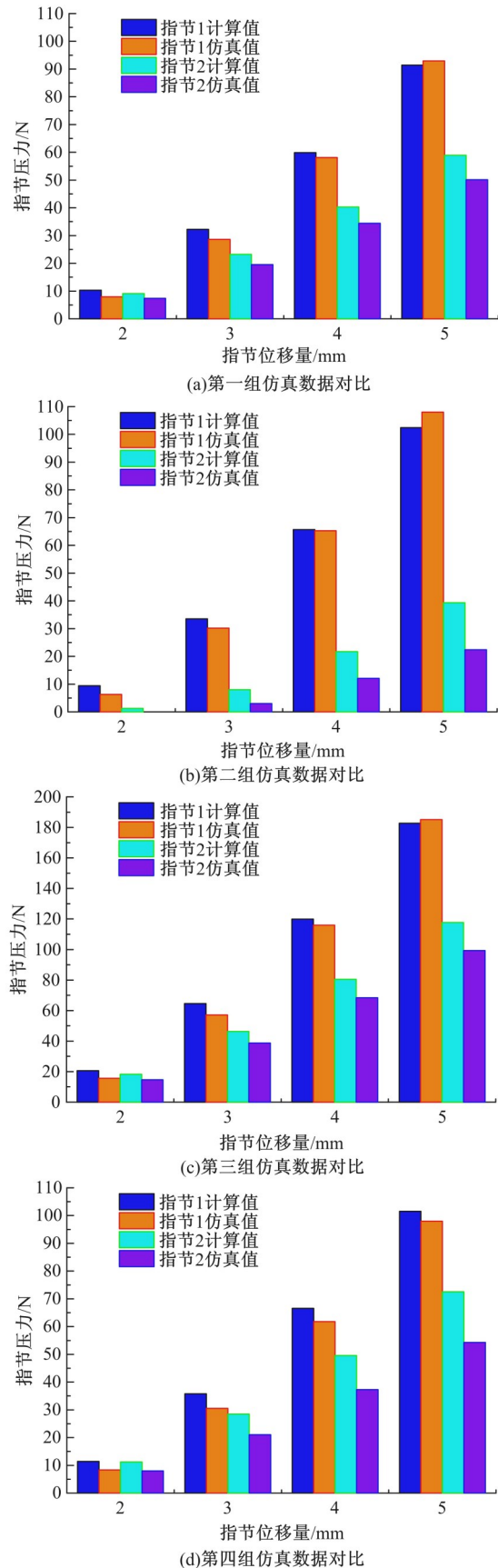


图 5 表 1 中仿真结果对比

Fig. 5 Simulation result comparisons of table 1

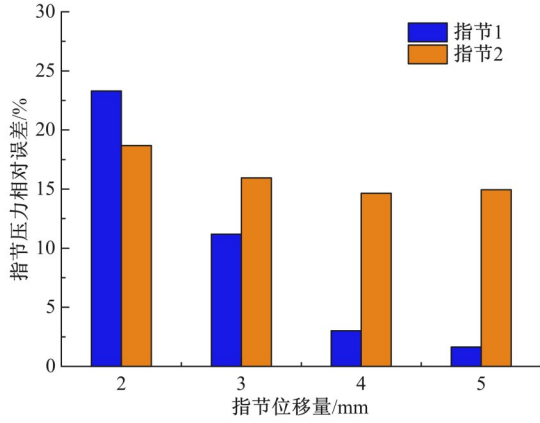


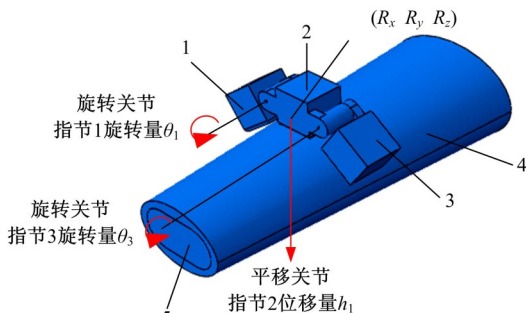
图 6 第一组仿真结果的相对误差

Fig. 6 Relative errors of simulation results in group 1

组织的泊松比 u , 由 0 更改为 0.2, 通过图 5(d) 可得, 指节压力的计算与仿真值有不同程度的增大。泊松比的含义为横向变形因数, 是指材料微元在垂直于载荷方向上的变形与在载荷方向上的变形的比的绝对值。第一组仿真验证中, 泊松比为 0, 肌肉微元在受到压力时, 没有垂直于载荷方向上的变形。第四组仿真中, 泊松比为 0.2, 使肌肉微元受到载荷压力时, 有垂直于载荷方向上的变形, 产生垂直于载荷方向的应力, 因此增大了正压力。

2.3 二指三关节机械手仿真验证

为进一步验证本文计算方法的的有效性, 与 2.1 节类似, 又建立了二指三关节机械手的简化模型进行验证, 二指三关节机械手的两个对称手指分别有 3 个指节, 与二关节手指相比, 更接近于人手, 其简化模型如图 7 所示。二指三关节机械手参考点位置如图 7 中 $(R_x R_y R_z)$ 所示, 指节 2 相对于 $(R_x R_y R_z)$ 无旋转, 有平行位移, 位移量为



1-指节1; 2-指节2; 3-指节3; 4-肌肉组织; 5-骨组织

图 7 二指三关节简化仿真模型

Fig. 7 Simplified simulation model

h_1 , 指节 2 参考点位置 $(R_x^2 R_y^2 R_z^2) = (R_x R_y R_z - 12 - h_1)$ 。指节 1 相对于 $(R_x^2 R_y^2 R_z^2)$ 的旋转量为

θ_1 , 无位移。指节 3 相对于 $(R_x^2 R_y^2 R_z^2)$ 的旋转量为 θ_3 , 无位移。根据式 (12), 结合指节 1、指节 2 和指节 3 的几何特征, 可得 3 个指节在坐标系中的曲面方程分别为:

$$\begin{cases} x \sin\theta_1 + z \cos\theta_1 - \sin\theta_1(R_x + 20 - 12\sin\theta_1 + 8\cos\theta_1) - \cos\theta_1(R_z - h_1 - 12\cos\theta_1 - 8\sin\theta_1) = 0 \\ R_x + 20 + 8\cos\theta_1 - 12\sin\theta_1 \leq x \leq R_x + 20 + 33\cos\theta_1 - 12\sin\theta_1 \\ R_y \leq y \leq R_y + 36 \\ R_z - 33\sin\theta_1 - 12\cos\theta_1 - h_1 \leq z \leq R_z - 12\cos\theta_1 - 8\sin\theta_1 - h_1 \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} z - R_z + 12 + h_1 = 0 \\ R_x - 12 \leq x \leq R_x + 12 \\ R_y \leq y \leq R_y + 24 \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} z \cos\theta_3 - x \sin\theta_3 + \sin\theta_3(R_x - 20 + 12\sin\theta_3 - 8\cos\theta_3) - \cos\theta_3(R_z - h_1 - 12\cos\theta_3 - 8\sin\theta_3) = 0 \\ R_x - 20 - 33\cos\theta_3 - 12\sin\theta_3 \leq x \leq R_x - 20 - 8\cos\theta_3 - 12\sin\theta_3 \\ R_y \leq y \leq R_y + 24 \\ R_z - 33\sin\theta_3 - 12\cos\theta_3 - h_1 \leq z \leq R_z - 12\cos\theta_3 - 8\sin\theta_3 - h_1 \end{cases} \quad (14)$$

与二指二关节类似, 理论计算与仿真验证选取的相关参数如表 2 所示。该实验中, 人肢体肌肉和骨骼采用了 2.1 节中相同的有限元模型。与 2.2 节类似, 采用 ABAQUS 软件建立了与本节二指三关节简化模型相同的仿真模型, 如图 7 所示。实验过程与 2.2 节相同, 即采用本文提出的理论模型据表 2 的参数进行指节压力计算得到计算值, 然后再与仿真得到的仿真值进行比较。图 8 给出了表 2 中第一组参数对应的理论计算值与仿真值对比情况。

表 2 二指三关节机械手计算与仿真参数

Table 2 Parameters of calculation and simulation

仿真组	$(R_x R_y R_z)$	E/MPa	u	$\theta_1/(\circ)$	$\theta_3/(\circ)$	h_1/mm
1	(20 30 41)	0.5×10^6	0.0	32	30	4, 5
2	(20 100 38)	0.5×10^6	0.0	32	30	4, 5
3	(20 30 41)	1.0×10^6	0.0	32	30	4, 5
4	(20 30 41)	0.5×10^6	0.2	32	30	4, 5

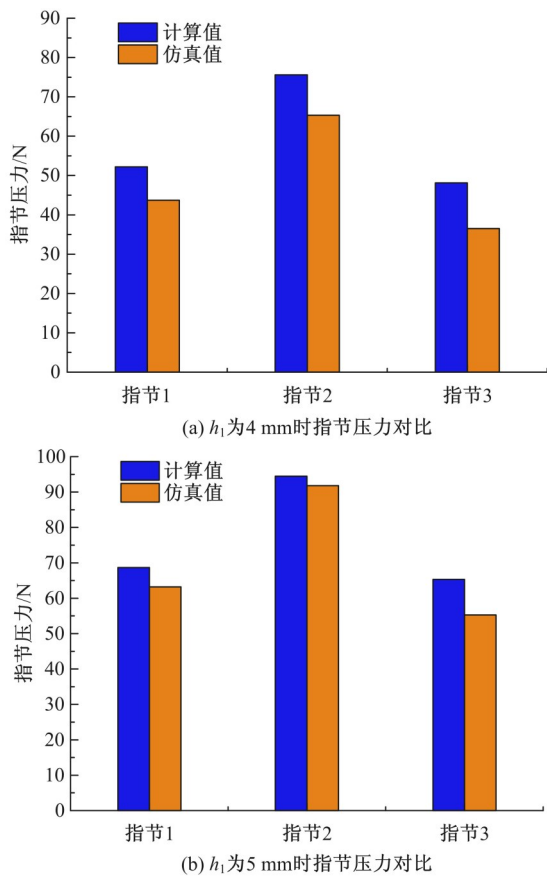


图 8 表 2 中第一组仿真结果对比

Fig. 8 Simulation result comparisons of group 1 in table 2

根据图 8 中压力值,利用式(11)可以计算出相对误差。经计算知,当指节位移为 4 mm 时,其中指节 1 的相对误差为 16.28%,指节 2 的相对误差为 13.62%,指节 3 的相对误差达到 24.12%;当指节位移为 5 mm 时,指节压力的相对误差明显较小,指节 1、2、3 的相对误差分别为 8.11%、2.86%、14%,可见指节位移量(压入量)对误差有较大影响,压入量越大,误差越小;指节 2 与指节 1、3 相比误差较小,经分析,这与指节 2 与人肢体正压力接触面积大,且指节面积范围内压力均衡有关。另外,指节 3 误差大于指节 1 的原因是转角 θ_3 小于 θ_1 ,使实际的压入量比指节 1 小造成的。这些规律与 2.2 节二指二关节仿真验证结果具有类似规律。表 2 中其他各组参数对应的各关节计算值与仿真值误差规律也与二指二关节类似。

从以上针对二指二关节及二指三关节的仿真验证结果可知,本文所设计的人机交互力快速计算方法均与仿真值有一定的误差,产生误差的主要原因是机械手、骨骼、肌肉的模型都进行了简

化,并对计算过程也进行简化造成的。另外,指节位移量(压入量)、交互位置、人肢体软组织弹性模量、泊松比等都对计算误差有一定的影响,其中指节位移量(压入量)影响最大,压入量越大,计算误差越小,这是因为压入量越小,由于模型及其计算过程简化造成的影响越大;当位移量 h_1 为 5 mm 时,理论计算与仿真结果的平均相对误差在 10%~15% 左右。实际应用中,机械手跟人肢体力交互中,大多数情况下压入量(肌肉变形量)都会较大,因此本文方法能满足实际应用要求,能对人机交互力进行计算与评价。

3 结束语

提出了一种快速计算应用康复机器人过程中人机交互力的方法,该方法基于有限元理论,表达出人肢体肌肉、骨骼组织和机械手指节在坐标系中的表面方程,将肌肉组织划分微元,依据机械手与人肢体的交互状态,通过肌肉微元的位移逐步获取肌肉微元的应变、应力,对应力积分求得机械手指节压力,最终实现对人机交互力的计算与分析。为验证提出理论的正确性,使用解析几何曲面代替复杂的人肢体肌肉、骨骼外表面和机械手指节外表面,分别建立了二指二关节及三关节简化模型。在有限元软件中建立了相同的简化模型,分别预设 4 组不同模型参数,进行仿真值与理论值的对比。仿真结果不仅证明本文理论能有效计算人机交互力,也展示了位移量(压入量),交互位置、人肢体软组织弹性模量、泊松比等参数对人机交互力的影响规律。

本文的不足之处是没有进行人肢体的实验验证,原因是现阶段难以获取人肢体的肌肉、骨骼表面曲面方程,无法进行理论计算。在进一步的研究中,将通过医学影像学技术获取人肢体的肌肉、骨骼表面曲面方程,使用人肢体进行实验验证。

参考文献:

[1] Hu J, Hou Z G, Chen Y X, et al. Lower limb rehabilitation robots and interactive control methods[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(11): 2377-2390.

[2] Basteris A, Nijenhuis S M, Stienen A H A, et al. Training modalities in robot-mediated upper limb rehabilitation in stroke: a framework for classification based on a systematic review[J]. Journal of Neuroen-

- gineering and Rehabilitation, 2014, 11(1): 1-15.
- [3] 曹恩国, 刘坤, 吉硕, 等. 减重站起康复训练系统机械结构设计与优化[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2019, 49(5): 1558-1566.
Cao En-guo, Liu Kun, Ji Shuo, et al. Mechanical structure design and optimization of weight-support STS rehabilitation training system[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2019, 49(5): 1558-1566.
- [4] 刘坤, 赵建琛, 曹恩国, 等. 基于下肢动力学检测分析的站起康复训练机器人控制[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2015, 45(3): 837-844.
Liu Kun, Zhao Jian-chen, Cao En-guo, et al. Control methods for standing-up rehabilitation robot based on estimation and analysis of lower limb kinetics [J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2015, 45(3): 837-844.
- [5] Robotics Today . Life science robotics[EB/OL]. [2020-05-14]. <https://www.lifescience-robotics.com>
- [6] Zhao Z, Li X, Lu C, et al. Compliant manipulation method for a nursing robot based on physical structure of human limb[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2020, 100: 973-986.
- [7] Gan H, Li X, Lu C, et al. Biomechanical study of human limbs under a robot hand manipulation using finite element analysis[C]//IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Changchun, China, 2018: 1856-1860.
- [8] 于建均, 安硕, 阮晓钢, 等. 基于仿人机械手的五指力封闭抓取算法[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(5): 192-198.
Yu Jian-jun, An Shuo, Ruan Xiao-gang, et al. Five-finger closed grasp algorithm based on humanoid manipulator[J]. Computer Measurement and Control, 2019, 27(5): 192-198.
- [9] 邹俞, 晁建刚, 林万洪. 基于力封闭的虚拟手稳定抓持力生成方法[J]. 计算力学学报, 2019, 36(4): 548-554.
Zou Yu, Chao Jian-gang, Lin Wan-hong. Force closure based virtual hand stable grip generation method [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2019, 36(4): 548-554.
- [10] Tian J, Jia Y B. Modeling deformations of general parametric shells grasped by a robot hand[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2009, 26(5): 1297-1302.
- [11] Zaidi L, Corrales J A, Bouzgarrou B C, et al. Model-based strategy for grasping deformable objects using a multi-fingered robotic hand[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2017, 95: 196-206.
- [12] Kim D, Maeda Y, Komiyama S. Caging-based grasping of deformable objects for geometry-based robotic manipulation[J]. Robomech Journal, 2019, 6(3):1-13.