

# 腱驱动假手手指运动及力分析

刘伊威, 任伟, 高一夫

(哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 150080 哈尔滨)

**摘要:** 为优化多自由度假手的机械结构,降低其复杂性以及提高其可靠性,采用腱驱动方法实现假手单手指的独立运动. 腱驱动假手手指由驱动腱、钢丝轮、3个指节、3个关节及关节扭簧等构成,关节扭簧实现关节的预紧和腱松弛后关节的回复运动. 对弹簧刚度进行优化设计,实现腱驱动的手指各关节的顺序弯曲及手指的大抓握. 分析了手指抓取时各指节所受接触力与钢丝轮驱动力矩之间的关系. 建立了手指的动力学模型,得到手指的动力学方程. 数值计算与仿真分析比较证明了理论计算的正确性,手指运动及抓握实验证明了该种结构手指的可行性. 腱驱动的假手手指具有零件少、结构简单、可靠性高等优点,为多自由度假手的研制提供了有利条件.

**关键词:** 假手; 手指结构; 腱驱动; 欠驱动; 手指动力学模型

**中图分类号:** TP24      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0367-6234(2012)05-0046-06

## Kinematics and dynamics of a tendon-driven prosthetic finger

LIU Yi-wei, REN Wei, GAO Yi-Fu

(State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, 150080 Harbin, China)

**Abstract:** A tendon-driven finger structure is applied to optimize the mechanism, reduce the complexity and improve the reliability of prosthetic hand, which also realizes the independent movement for single finger. The structure consists of a drive tendon, three knuckles, three joints, torsion springs, and so on. The joint torsion spring is designed to realize the joint preload and the joint reversion after the tendon looseness. By optimizing the spring stiffness, it is able to realize the sequential curling and the large range grip. Based on these analyses, the relation between contact force on the knuckles and the drive torque of the wire wheel, the finger dynamic model and dynamic equations are established. The numerical calculation, simulation and experiments are done to validate the correctness of the theoretical analysis and the feasibility of the finger structure. By the advantages of fewer parts, simpler structure and higher reliability, the tendon-driven finger structure provides favorable conditions for development of multi-degree prosthetic hand.

**Key words:** prosthetic hand; finger structure; tendon-driven; underactuated; finger dynamic model

残疾人假手具有重要的应用价值,国内外的众多研究机构以及商业公司开发了多种形式的假手,比较有代表的假手有 OTTOBOCK Hand<sup>[1-2]</sup>、Southampton Hand<sup>[3]</sup>、TBM Hand<sup>[4]</sup>、IOWA Hand<sup>[5]</sup>、RTR II Hand<sup>[6]</sup>以及 Smart hand<sup>[7]</sup>、英国的 I-limb 手<sup>[8]</sup>等. 国内外现有的假手,包括商业应用的假手产品及实验室开发的假手样机,有3个突出问题:1)自由度

少,抓握功能不足,不能满足使用者日常操作需要和由各个手指单独运动所带来的心理需求;2)自由度增加引起的系统复杂性、可靠性及成本等问题,限制了多自由度假手的实际应用;3)现有假手的尺寸、质量及外观与人手相比,差距仍然较大.

本文针对5自由度假手的研制,提出了一种腱传动的欠驱动手指结构,并研制了假手 HIT p-Hand I(如图1),该假手有5个可单独运动的手指构成,分别由5个电机驱动,外形与人手相似、体积约为成年人手体积的85%,质量仅为350 g. HIT p-Hand I假手结构具有以下突出特点:1)手

收稿日期: 2011-03-25.

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2008AA04Z203); 中国博士后基金(201003442); 黑龙江省博士后基金(LBH-Z09104).

作者简介: 刘伊威(1977—),男,副教授.

通信作者: 刘伊威, lyw@hit.edu.cn

指结构简单. 具有3个弯曲关节的手指,通过一根腱驱动,零件数少,加工难度低,可靠性高,加工成本低. 零件数及加工成本约为哈工大连杆结构手指<sup>[9]</sup>的30%. 2)集成度高. 电机、减速机构、传感器、驱动和控制电路板等均集成在手掌内,节省空间,便于更换、维护. 3)非金属材料的采用,减轻假手的质量、降低加工费用. 手指的指节及手掌采用非金属树脂,基于激光快速成形方法,质量约为铝合金材料的30%. 本文将进行手指的运动学及力学的分析,并通过仿真分析手指的运动,证明该种结构手指的可行性和有效性.

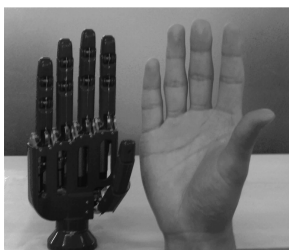


图1 HIT p-Hand I假手

### 1 腱驱动手指机械机构

HIT p-Hand I 由5个模块化手指构成. 除拇指外的其余4指有相近的结构,中指结构如图2和图3所示. 手指采用直流电机驱动,经过行星减速器和锥齿轮副传动,驱动钢丝轮(腱轮)转动. 手指驱动腱的一端缠绕在钢丝轮上,穿过近指节和中指节处固定的弹簧套管、跨过3个关节,另一端与远指节固定. 腱在关节处,不穿过关节的转动轴线,而是有一距离,形成力臂. 腱张紧时,腱的张力在关节处产生弯曲力矩,驱动关节转动;当腱松弛时,借助关节处的扭簧,使关节恢复到初始位置. 优化3个关节处的扭簧刚度,实现手指各关节的期望弯曲角度关系. 拇指在其余4指的基础上,在基关节位置另增加一个关节和弹簧,实现其先于上部3个弯曲关节的外展/内收运动,当拇指内收后具有与其余4指相同的运动特性.

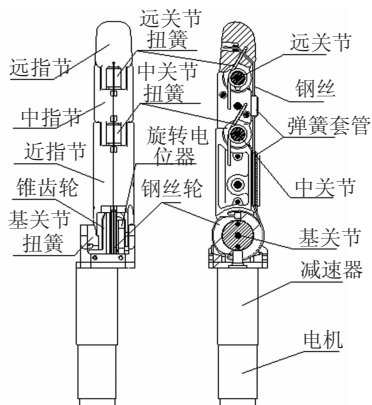


图2 腱驱动假手的中指结构

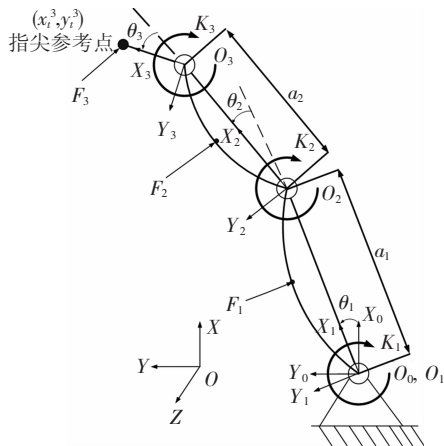


图3 腱驱动假手指结构简图

### 2 手指运动分析

手指结构简图及参数定义如图3,末端两关节及基关节结构分别如图4、5所示,末端两关节结构相同. 各关节的力矩平衡关系:

$$T = \frac{K_1(q_1 + q'_1)}{r_1}, T = \frac{K_2(q_2 + q'_2)}{r_2(q_2)}, T = \frac{K_3(q_3 + q'_3)}{r_3(q_3)} \quad (1)$$

式中:  $T$ 为腱张力,根据文献[10],在腱与弹簧管低速相对运动、腱鞘曲率较小时,可忽略腱与弹簧管间的摩擦力,腱张力在各处均相同; $K_i$  ( $i = 1, 2, 3$ )分别为基关节、中关节、远关节的扭簧刚度; $r_i$  ( $i = 1, 2, 3$ )为腱在各关节处的力臂,腱到各关节转动中心的距离,  $r_1 = 8.5 \text{ mm}$ ,  $r_2 = C \cos((90 - \theta_2)/2)$ ,  $r_3 = C \cos((90 - \theta_3)/2)$ ;  $C$ 为关节几何常数,  $C = 7.78 \text{ mm}$ ;  $\theta_i$  ( $i = 1, 2, 3$ )为各关节转角,  $0 \sim 90^\circ$ ;  $\theta'_i$  ( $i = 1, 2, 3$ )为各关节弹簧的预紧角度,即  $\theta_i = 0^\circ$  ( $i = 1, 2, 3$ )时,扭簧的扭转角度,  $\theta'_i = 30^\circ$ , ( $i = 1, 2, 3$ ).

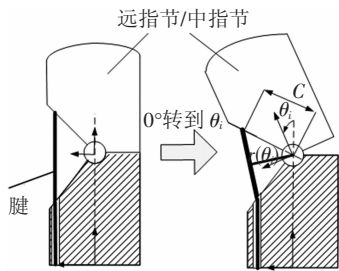


图4 中关节及远关节的几何结构

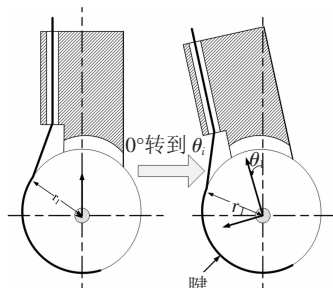


图5 基关节的几何结构

优化3个关节处的扭弹刚度,使假手指具有模拟人手手指的弯曲运动规律和最大的抓取操作空间.模仿人手手指,假手指的末端两个关节具有1:1的耦合运动关系,取  $K_2 = K_3$ .由文献[11-12],人手手指在抓取时基关节会比末端两个关节先转动  $14^\circ \sim 50^\circ$ ,增大抓取操作空间.在式(1)中消去  $T$ ,令  $\theta_2 = 0$  (近似为0),可得基关节超前角度  $\psi$  的表达式:

$$\psi = \frac{r_1 \theta_2'}{C \cos 45^\circ K_1} - \theta_1' \quad (2)$$

由式(2)可以看出,优先选择增大两扭簧的刚度比,增大  $K_2$ 、减小  $K_1$ ,可以增大超前角.由实验确定  $K_1 = 0.6 \text{ N} \cdot \text{mm}/(\text{^\circ})$ 、 $K_2 = 0.94 \text{ N} \cdot \text{mm}/(\text{^\circ})$ ,此时超前角最大为  $\psi = 43^\circ$ .不同超前角  $\psi$  对应的手指工作空间如图6所示,  $\psi = 43^\circ$  与  $\psi = 90^\circ$  的手指运动轨迹基本重合.

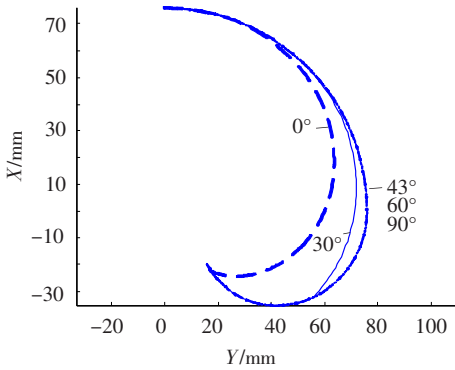


图6 不同超前角时的指尖运动轨迹

以公式(1)为约束条件,建立各关节转动角度相对钢丝轮转角的关系曲线,如图7所示.

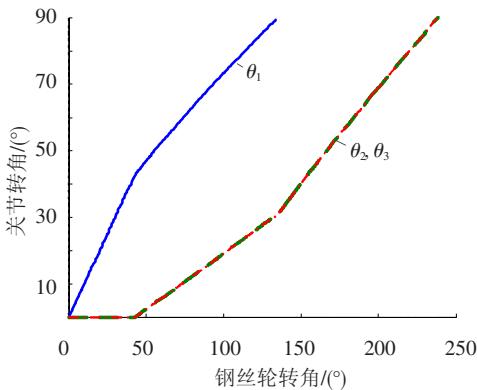


图7 各关节转角关系

手指运动可分为3个阶段:1)当  $0 < \theta_1 < \psi$  时,基关节弯曲,中关节和远关节不转动,手指以伸直状态绕基关节转动;2)当  $\psi < \theta_1 < 90^\circ$  时,中关节和远关节开始转动,3个关节同时转动;3)从  $\theta_1 = 90^\circ$  开始,基关节到达极限位置,停止转动,末端两个关节继续转动,直至达到极限位置.

### 3 手指静力学分析

手指静力学主要研究当手指稳定抓取物体时,各指节所受接触力与钢丝轮驱动力矩之间的关系.采用虚功原理,建立手指静力学方程.手指稳定抓取物体时的参数定义如图3所示,力的作用点和接触力向量在各指节局部坐标中可写成

$$p_i^i = (x_i^i, y_i^i, 1)^T, F_i^i = (f_x^i, f_y^i, 1)^T, i = 1, 2, 3.$$

将力作用点的位置和速度、力向量由指节局部坐标变换到手指基座坐标系可得

$$P = \begin{bmatrix} p_1^0 \\ p_2^0 \\ p_3^0 \end{bmatrix}, \dot{P} = \begin{bmatrix} \dot{p}_1^0 \\ \dot{p}_2^0 \\ \dot{p}_3^0 \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} F_1^0 \\ F_2^0 \\ F_3^0 \end{bmatrix}, J(q) = \begin{bmatrix} J_1^0(q) \\ J_2^0(q) \\ J_3^0(q) \end{bmatrix}.$$

$q = (\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3)^T$  为手指关节角度向量,  $p_i^0, \dot{p}_i^0, F_i^0, J_i^0$  分别为各力作用点在基座坐标系下的位置、速度、力向量及雅可比矩阵.

由虚功原理  $\tau^T \delta q = F^T \delta p$  得

$$\tau = J^T(q)F = \sum_{i=1}^3 (J_i^0(q))^T {}_i^0 R F_i^i,$$

$$\tau = (\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3)^T = \begin{bmatrix} Tr_1 - K_1(\theta_1 + \theta_1') \\ Tr_2(\theta_2) - K_2(\theta_2 + \theta_2') \\ Tr_3(\theta_3) - K_3(\theta_3 + \theta_3') \end{bmatrix} \quad (3)$$

假设各指节与物体在力作用点上仅存在法向正压力,无摩擦力,由式(3)求解,可得各指节的接触力:

$$f_1 = - (CAa_1(x_2c_{23} - a_2c_2c_3 - x_3c_2) + CBx_3(a_1c_2 + x_2) - x_2x_3r_1)M / (x_1x_2x_3r_1) + (a_1r_1K_3(\theta_3 + \theta_3')(x_2c_{23} - a_2c_2c_3 - x_3c_2) + x_3r_1K_2(\theta_2 + \theta_2')(a_1c_2 + x_2) - K_1(\theta_1 + \theta_1')x_2x_3r_1) / (x_1x_2x_3r_1),$$

$$f_2 = - (A(x_3 + a_2c_3) - Bx_3)CM / (x_2x_3r_1) + (K_3r_1(\theta_3 + \theta_3')(x_3 + a_2c_3) - K_2x_3r_1(\theta_2 + \theta_2')) / (x_2x_3r_1),$$

$$f_3 = ACM / (x_3r_1) - K_3(\theta_3 + \theta_3') / x_3. \quad (4)$$

其中:  $A = \sin((\pi + 2\theta_3)/4)$ ,  $B = \sin((\pi + 2\theta_2)/4)$ ;  $M = Tr_1$ ;  $c_i = \cos \theta_i, c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$ .

从式(4)可以看出,接触力  $F_i$  取决于以下因素:手指指节尺寸  $a_1$  和  $a_2$ ,力作用点位置  $p_i^i$ ,手指稳定抓取时的构型  $\theta_i$  以及钢丝轮驱动力矩  $M$ .当假手稳定抓握物体后,  $A, B, p_i^i$  等参数确定、不变,接触力只取决于钢丝轮驱动力矩  $M$ .而钢丝轮驱动力矩  $M$  是电机经减速后的输出力矩,可通过电机电流进行测量、控制.

### 4 手指动力学分析

如图3的符号定义,用牛顿-欧拉法正向递推手指各连杆的运动量,得正向递推方程组<sup>[13]</sup>:

$$\begin{cases} {}^{i+1}\vec{\omega}_{i+1} = {}^{i+1}\mathbf{R}_i \vec{\omega}_i + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\vec{z}_{i+1}, \\ {}^{i+1}\vec{\omega}_i = {}^{i+1}\mathbf{R}_i \vec{\omega}_i + {}^{i+1}\mathbf{R}_i \vec{\omega}_i \times \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\vec{z}_{i+1} + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\vec{z}_{i+1}, \\ {}^{i+1}\vec{v}_{i+1} = {}^{i+1}\mathbf{R}_i [ {}^{i+1}\vec{v}_i + \vec{\omega}_i \times \vec{p}_{i+1} + \vec{\omega}_i \times (\vec{\omega}_i \times \vec{p}_{i+1}) ], \\ {}^{i+1}\vec{v}_{ci+1} = {}^{i+1}\vec{v}_{i+1} - {}^{i+1}\vec{\omega}_{i+1} \times {}^{i+1}\vec{r}_{ci+1} - {}^{i+1}\vec{\omega}_{i+1} \times ({}^{i+1}\vec{\omega}_{i+1} \times {}^{i+1}\vec{r}_{ci+1}) ]. \end{cases}$$

式中:  ${}^i\omega_i$  为在  $i$  坐标系下连杆  $i$  的角速度;  ${}^i\omega_i$  为在  $i$  坐标系下连杆  $i$  的角加速度;  ${}^i\mathbf{v}_i$  为在  $i$  坐标系下连杆  $i$  的坐标原点的加速度;  ${}^i\mathbf{v}_{ci}$  为在  $i$  坐标系下连杆  $i$  质心的加速度;  $\dot{\theta}_i$  为关节  $i$  的角速度;  $\ddot{\theta}_i$  为关节  $i$  的角加速度;  ${}^i\mathbf{r}_{ci}$  为从连杆  $i$  的质心指向连杆  $i$  的关节坐标原点的向量;  $\mathbf{p}_{i+1}$  为在  $i$  坐标系下从关节  $i$  的坐标原点到关节  $i+1$  的坐标原点的向量;  $\mathbf{z}_i$  为关节  $i$  处沿着  $z$  方向的单位向量。

由正向递推方程组及如下初始递推条件,可递推得到各指节的  ${}^i\mathbf{v}_i$ 、 ${}^i\omega_i$ 、 ${}^i\omega_i$ 、 ${}^i\mathbf{v}_{ci}$ ,  $i = 1, 2, 3$ 。

$${}^0\vec{v}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, {}^0\omega_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, {}^0\dot{\omega}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

指节受力时参数定义如图8所示,应用牛顿第二定律和欧拉方程可得各指节的受力平衡方程:

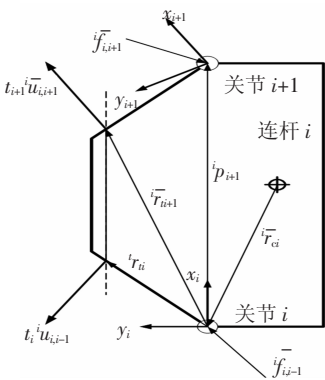


图8 手指指节受力模型

$$m_i {}^i\vec{v}_{ci} = \vec{f}_{i,i+1} + \vec{f}_{i,i-1} + t_{i+1} {}^i\vec{u}_{i,i+1} + t_i {}^i\vec{u}_{i,i-1}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} I_i {}^i\omega_i \vec{z} = & \vec{r}_{ci} \times \vec{f}_{i,i-1} + (\vec{r}_{ci} + \vec{p}_{i+1}) \times \vec{f}_{i,i+1} + \\ & (\vec{r}_{ci} + \vec{r}_{i+1}) \times t_{i+1} {}^i\vec{u}_{i,i+1} + (\vec{r}_{ci} + \vec{r}_{ii}) \times \\ & t_i {}^i\vec{u}_{i,i-1} - K_i(\theta_i + \theta'_i). \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $t_i$ , ( $i = 1, 2, 3$ ) 为第  $i$  段腱的张力;  ${}^k\vec{u}_{i,j}$ , ( $i = 1, 2, 3$ ) 为在第  $k$  个关节坐标系下由第  $i$  个指节指向第  $j$  个指节的腱张力方向的单位向量,在本

文中  ${}^i\vec{u}_{i,i+1} = (\cos \theta_{i+1}/2, \sin \theta_{i+1}/2, 0)^T$ ,  ${}^i\vec{u}_{i,i-1} = (-\cos \theta_i/2, \sin \theta_i/2, 0)^T$ ;  ${}^j\vec{r}_{ii}$ , ( $i = 1, 2, 3$ ) 为从  $j$  坐标系原点到腱张力  $t_i$  作用点的向量;  ${}^i\vec{r}_{ci}$ , ( $i = 1, 2, 3$ ) 为在第  $i$  个关节坐标系下从指节  $i$  的质心到关节  $i$  原点的向量;  ${}^i\vec{p}_{i+1}$ , ( $i = 1, 2, 3$ ) 为从关节  $i$  到关节  $i+1$  的向量;  ${}^k\vec{f}_{i,j}$ , ( $i = 1, 2, 3$ ) 为在  $k$  坐标系下指节  $i$  受到来自  $j$  关节的关节力向量;  $m_i$  为指节  $i$  的质量;  $I_i$  为指节  $i$  绕过其质心的  $z$  轴的转动惯量。

忽略腱的拉伸变形,在指节弹簧管两端的腱拉力差仅由速度阻尼产生,即有  $t_i - t_{i+1} = c(v_i - v_{i+1})$ 。当稳定抓取时,弹簧管两端的腱张力相等,与前述推导相一致。 $t_1$  为由钢丝轮驱动力矩产生的钢丝张力,可由钢丝轮半径计算得到。 $t_2$  和  $t_3$  可递推得

$$\begin{cases} t_2 = t_1 - c \left( \frac{\dot{\theta}_1}{r_1} + C \cos \left( \frac{90 - \theta_2}{2} \right) \dot{\theta}_2 \right), \\ t_3 = t_1 - c \left( \frac{\dot{\theta}_1}{r_1} + C \cos \left( \frac{90 - \theta_3}{2} \right) \dot{\theta}_3 \right). \end{cases}$$

将各关节处的腱张力带入各指节平衡方程(5)、(6),经计算推倒可得式(7),式(7)求解,可得各关节的角度、角速度、角加速度。

$$\begin{cases} I_3 {}^3\omega_3 \vec{z} = M_{33} + {}^3\vec{r}_{i3} \times t_3 {}^3\vec{u}_{3,2} - K_3(\theta_3 + \theta'_3), \\ I_2 {}^2\omega_2 \vec{z} = M_{22} + M_{23} + {}^2\vec{r}_{i3} \times t_3 {}^2\vec{u}_{2,3} + {}^2\vec{r}_{i2} \times \\ \quad t_2 {}^2\vec{u}_{2,1} + K_3(\theta_3 + \theta'_3) - K_2(\theta_2 + \theta'_2), \\ I_1 {}^1\omega_1 \vec{z} = M_{11} + M_{12} + {}^1\vec{r}_{i2} \times t_2 {}^1\vec{u}_{1,2} + {}^1\vec{r}_{i1} \times \\ \quad t_1 {}^1\vec{u}_{1,0} + K_2(\theta_2 + \theta'_2) - K_1(\theta_1 + \theta'_1). \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $M_{33} = {}^3\vec{r}_{i3} \times m_3 {}^3\vec{v}_{i3}$ ,  $M_{22} = {}^2\vec{r}_{i2} \times m_2 {}^2\vec{v}_{i2}$ ,  $M_{11} = {}^1\vec{r}_{i1} \times m_1 {}^1\vec{v}_{i1}$ ,  $M_{23} = -{}^2\vec{p}_3 \times (m_3 {}^2R_3 {}^3\vec{v}_{i3} + t_3 {}^2\vec{u}_{2,3})$ ,  $M_{12} = -{}^1\vec{p}_2 \times (m_2 {}^1R_2 {}^2\vec{v}_{i2} + m_3 {}^1R_3 {}^3\vec{v}_{i3} + t_2 {}^1\vec{u}_{1,2})$ 。

### 5 手指力学仿真验证

#### 5.1 手指静力学仿真

在 Adams 仿真软件中模拟中指抓握 20 mm 直径的圆柱体;腱张力从初始的 5 N 线性增加,增速为 4 N/s,达到 45 N 时停止仿真。按照公式(4),使用 Matlab 软件计算腱张力大于 20 N 稳定接触后的接触力。各指节的受力情况(Matlab 计算结果与 Adams 仿真结果的对比)如图9所示,计算结果和仿真结果基本吻合,各指节的接触力具

有相近的变化趋势。

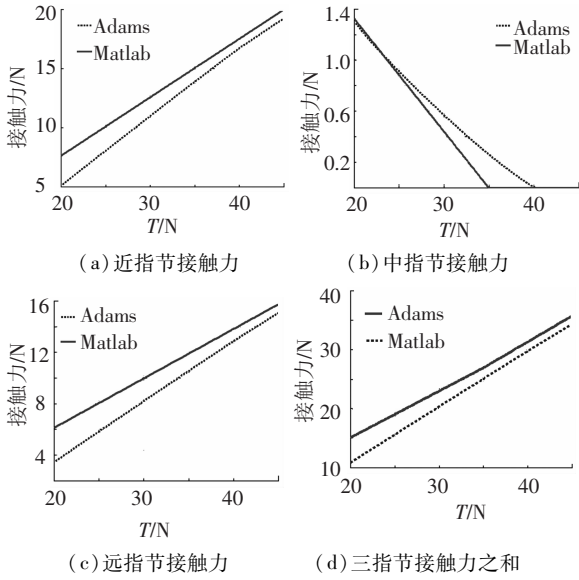


图9 指节受力的计算结果与仿真结果对比

### 5.2 手指动力学仿真

在动力学仿真实验中,把手指三维模型导入 Adams 环境,设定腱张力的时间函数为  $t_1 = 4time + 5(N)$ ,仿真时间0.9 s,获得手指空载运动时各指节的位置、速度和加速度曲线. 利用 Matlab,采用龙格库塔方法对微分方程组(7)求解,相同的腱张力时间函数,数值计算得到各关节的位置、速度和加速度曲线.

仿真与计算的结果对比如图10所示. 在关节转动位置比较中,基关节和中关节的仿真结果和计算结果一致性较好,远关节的差距较大,主要是由于串联式连杆机构的积累误差造成的,连杆误差依次累加,导致末端关节的偏差最大. 在3个关节位置中,计算结果均大于仿真结果,主要原因是在仿真中,由于关节扭簧的作用各关节有微小的负转角,而计算中认为手指是伸直的,由此导致计算结果略大于仿真结果.

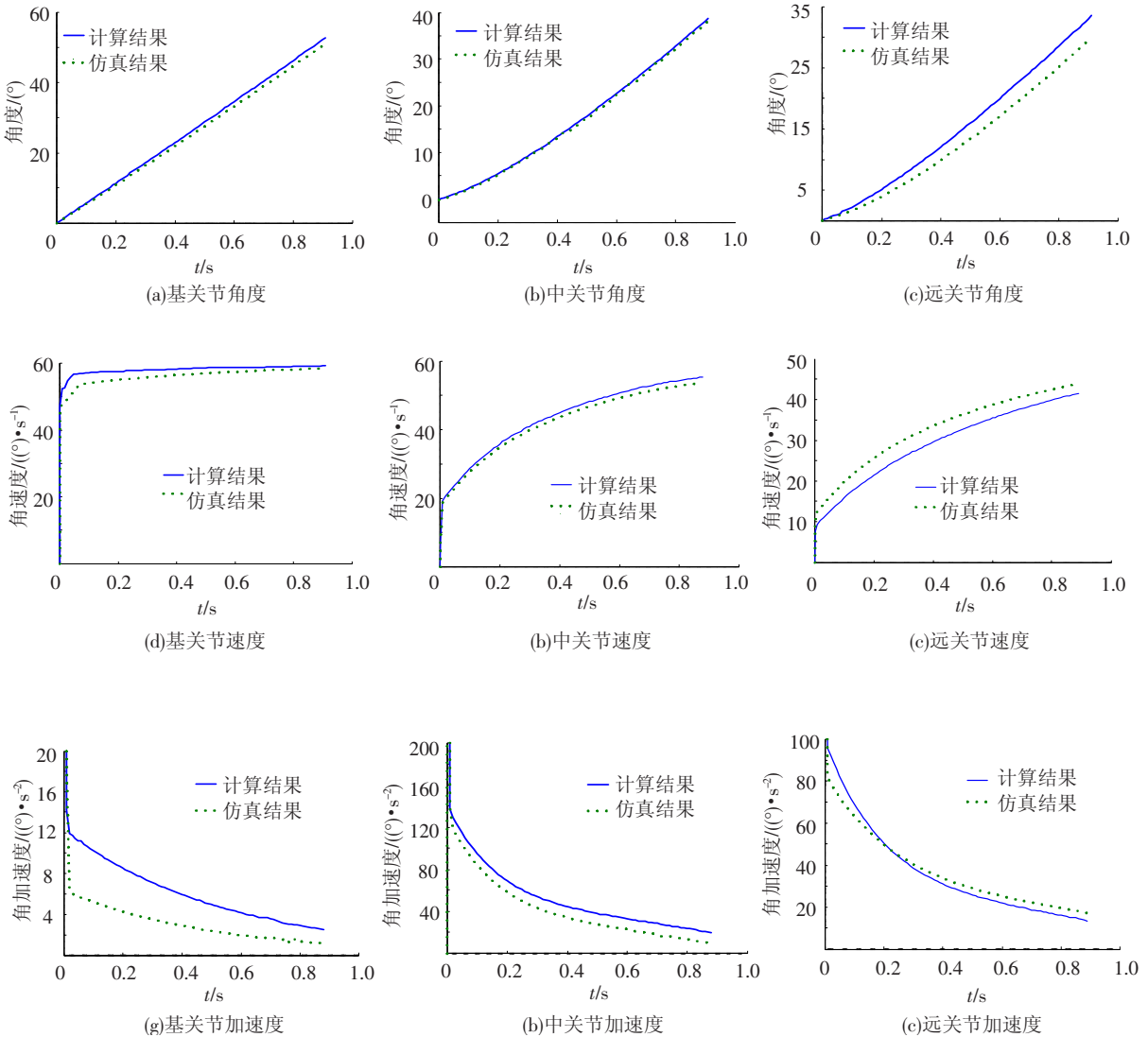


图10 手指各运动量的计算与仿真结果

图11 为食指的动作过程,可见手指的运动与 前述设计相符,可以实现设计的运动规律.

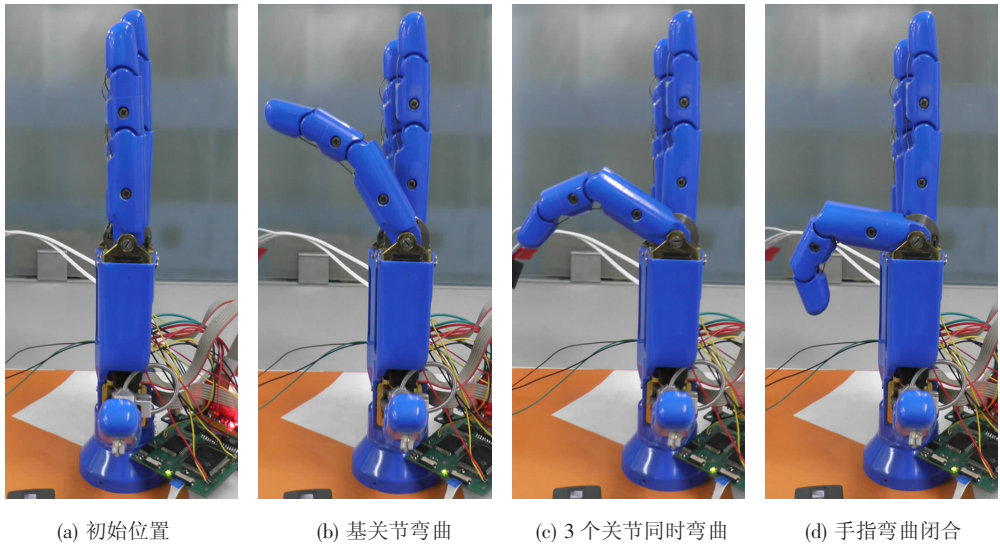


图 11 食指运动过程

## 6 结 论

本文完成了腱驱动假手手指的运动学、静力学和动力学的分析,通过数值计算与仿真分析比较以及假手的运动和抓握实验,验证了理论计算的正确性,也证明该种假手手指结构的有效性、合理性,为后续的完善和假手的实际应用奠定了理论基础。

## 参考文献:

- [1] CHAPPELL P H, KYBERD P J. Prehensile control of a hand prosthesis by a microcontroller [J]. *Biomedical Engineering*, 1991, 13(5): 363 - 369.
- [2] OTTO BOCK. Otto Bock [EB/OL]. [2010 - 01 - 25]. <http://www.Ottobock.de>.
- [3] KYBERD P J, LIGHT C M, CHAPPEL P H, *et al.* The design of anthropomorphic prosthetic hands: a study of the southampton hand [J]. *Robotica*, 2001, 19(6): 593 - 600.
- [4] DECHEV N, LEGHORN W L, NEUMANN S. Multiple finger passive adaptive grasp prosthetic hand [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2001, 36(10): 1157 - 1173.
- [5] YANG J Z, ESTEBAN P P, KARIM A M, *et al.* A multifingered hand prosthesis [J]. *Mechanism and machine Theory*, 2004, 39(6): 555 - 581.
- [6] ZOLLO L, ROCCELLA S, TUCCI R, *et al.* Biomecha-

tronic design and control of an anthropomorphic artificial hand of prosthetics hand robotic applications [C]// *Biorob 2006*. Pisa: IEEE, 2006: 402 - 407.

- [7] CIPRIANI C, CONTROZZI M, CARROZZA M C, *et al.* Progress towards the development of the smarth and transtadial prosthesis [C]// 2009 IEEE 11<sup>th</sup> International Conference on Rehabilitation Robotics. Piscataway: IEEE, 2009: 682 - 687.
- [8] CONNOLLY C. Prosthetic hands from touch bionicsm [J]. *Industrial Robot*, 2008, 35(4): 290 - 293.
- [9] WANG Xin-qing, LIU Yi-wei. Design and control of a coupling mechanism-based prosthetic hand [J]. *Journal of shanghai jiaotong university*, 2010, 15(5): 571 - 577.
- [10] PALLI G, MELCHIORRI C. Model and control of tendon-sheath transmission systems [C]// *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 988 - 993.
- [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] KAMPER D G, CRUZ E G, SIEGEL M P. Stereotypical fingertip trajectories during grasp [J]. *J Neurophysiol*, 2003, 90: 3702 - 3710.
- [13] 熊有伦. 机器人技术基础 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1996: 35 - 50.

(编辑 杨 波)