

# 基于 ADAMS 的欠驱动三指机械手虚拟设计及参数优化

雷翔鹏, 刘业峰

(沈阳工学院 机械工程与自动化学院, 辽宁 抚顺 113122)

**摘要:**针对现有一款模块化欠驱动三指机械手本身的结构特征不完善,所能实现的抓取任务、承载能力有限等问题,设计了一种弹簧被动自适应手指机构;根据欠驱动手指的结构、构件的尺寸、驱动规律及构件间相对关系,以单指为例采用 D-H 坐标法建立了运动学模型;利用 ADAMS 软件对该欠驱动手的 3 种抓取构型进行运动学仿真,验证了结构设计的合理性;在满足运动学模型准确性的前提下,选出一种抓取构型,以中心滑盘连接手指处所受应力最小为目标,对基指节内部推杆的长度及摆动的角度进行参数优化,有效地增强了欠驱动手抓取的多样性,可为该机械手的设计研究提供可靠的理论依据。

**关键词:**欠驱动;三指机械手;弹簧自适应;ADAMS;虚拟设计;参数优化

## Virtual Design and Parameter Optimization of Under-actuated Three-Finger Manipulator Based on ADAMS

Lei Xiangpeng, Liu Yefeng

(School of Mechanical Engineering and Automation, Shenyang Institute of Technology, Fushun 113122, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of an existing modular under-actuated three-finger manipulator with imperfect structural features, achievable grasping tasks, and limited bearing capacity, a spring passive adaptive finger mechanism was designed. According to the structure of the under-actuated finger, the size of the component, the driving law and the relative relationship between the components, a kinematic model was established by using the D-H coordinate method with a single finger as an example. Kinematics simulation of the two grasping configurations of the under-driven hand using ADAMS software verifies the rationality of the structural design. Under the premise of satisfying the accuracy of the kinematics model, a grasping configuration was selected, with the goal of minimizing the stress on the fingers connected to the central sliding plate, and parameter optimization of the length and swing angle of the push rod inside the base knuckle. Effectively enhance the diversity of under-actuated hand grasping, and provide a reliable theoretical basis for the design and research of the manipulator.

**Keywords:** under-actuated; three-finger manipulator; spring adaptive; adams; virtual design; parameter optimization

## 0 引言

欠驱动多指手对被抓物体的抓取构型主要分为强力抓取和精确捏取两种<sup>[1-2]</sup>,其动力学仿真也主要分为强力抓取仿真和精确捏取仿真两种,而针对不同结构的欠驱动机械手,其抓取构型也不同。文中提出了一种可拆卸的模块化手指机构<sup>[3]</sup>(即弹簧自适应手指机构),可应用于欠驱动多指手的多种抓取构型当中。可以利用手指转位机构改变手指的方向来改善手指的灵活度,也可以通过更换不同类型的手指机构来

实现多种抓取构型,使欠驱动手机械手的精确抓取能力得到提高。因此可以通过 ADAMS 虚拟样机仿真,根据不同抓取目标的特点来验证所选择的抓取模式是否适用于该抓取构型,从而确定出最适合抓取目标的抓取模式。

## 1 模块化手指的结构及原理

本机械手采用连杆机构作为传动机构,它在机构设计中是应用最为广泛的机构。为了完成对弹簧被动自适应手指相对运动关系的描述,这里不考虑机身的旋转,将底座与机身看作机架固定,其它构件简化为基本杆件,结构简图如图 1 所示。

如图 1 所示,手指机构在滑块 A 的主动推力  $F_5$  的作用下,通过曲柄滑块机构带动平面四连杆机构运动,从而使刚性指节、柔性指节以及自适应弹簧产生相应的动作变化,完成对物体的抓取动作。通过对被抓物体进行自适应性包络,弹簧被动自适应手指机构指尖节处的被动自适应弹簧发生弹性形变,使弧形杆在指定滑槽内运动,加强了手指对被抓物体的包络性与抓取稳定性,大大增加了欠驱动多指机械手爪的承载能力。

收稿日期:2020-09-16; 修回日期:2020-10-16。

**基金项目:**国家自然科学基金(61603262);辽宁省自然科学基金重点领域联合开放基金(2020-KF-11-09);辽宁省自然科学基金(20180550418);沈阳工学院 i5 智能制造研究所基金(i5201701);辽宁“百千万人才工程”培养经费资助。

**作者简介:**雷翔鹏(1994-),男,辽宁沈阳人,初级实验师,硕士,主要从事机器人优化设计,机器人技术方向的研究。

**通讯作者:**刘业峰(1981-),男,山东淄博人,教授,博士,主要从事智能优化算法及应用、复杂系统建模及优化、智能制造等方向的研究。

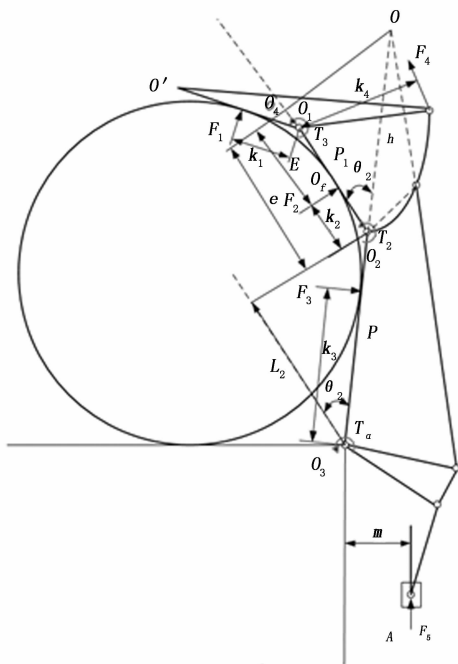


图 1 弹簧被动自适应手指机构传动原理

## 2 模块化手指的硬件设计

### 2.1 弹簧被动自适应手指结构设计

在设计欠驱动多指手时，需要充分考虑手指之间的欠驱动性以及手指机构对抓取目标的自适应性<sup>[4]</sup>，因此采用基于四连杆机构设计机械手指结构。基于模块化的设计思想，以下采用单个手指的结构进行说明：单个欠驱动手指可分为底座结构、手指驱动滑块、可拆卸结构、耦合曲柄、平面四连杆机构、橡胶指节和被动自适应指节所构成。弹簧自适应手指机构采用基于四连杆机构的 4 指节方案，由于基指节主要起到手指的安装和驱动作用，所以整个手指的自由度为 3 个。而对于不同的目标物体，欠驱动机械手往往有不同的抓取姿态<sup>[5]</sup>，由于欠驱动机械手的系统参数不同，被抓取物体的大小、形状、位置不同，抓取方式也不一样。以下为弹簧被动自适应模块化欠驱动手指的单指设计方案，如图 2 所示。

如图 2 所示，为了弥补原有欠驱动手指机构两个指节包络面积小的缺点，同时还要满足机械手在抓取过程中具有良好的抓取稳定性<sup>[6]</sup>的需求。在机械手抓取目标物体时，两个关节中扭弹簧会限制关节的相对转动，使机械手具有一定的柔性。在机械手抓取较大物品时，指尖节与二指节处的拉伸弹簧会根据被抓物体的形状进行自适应包络<sup>[7]</sup>，从而提高抓取的多样性。弹簧自适应手指还可以依靠手指末端关节自身的被动自适应机构<sup>[8]</sup>来增加手指与抓取目标之间的接触点个数以及两者之间的包络面积，使机械手对抓取目标具有更好的包络性以及抓取载荷<sup>[9]</sup>，能较好地满足多种不同的抓取运动规律以及轨迹要求<sup>[10-11]</sup>。

### 2.2 弹簧被动自适应手指机构运动学分析

根据设计要求，由于欠驱动手的 3 个手指结构完全相

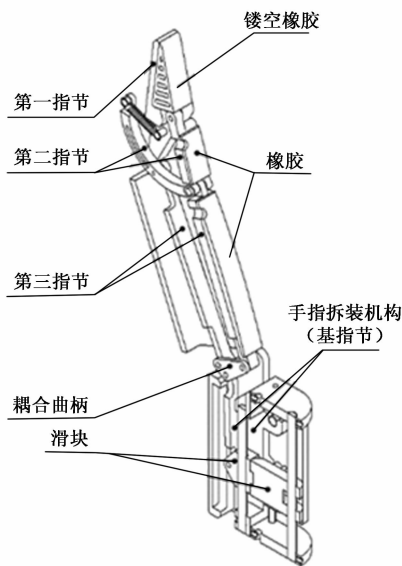


图 2 弹簧被动自适应欠驱动手指结构组成

同，所以以单指为代表进行运动学分析，其余两根欠驱动手指在计算运动学模型时的分析过程方面与此手指完全相同。手指运动学主要描述的是指尖运动（包括位置、线速度和线加速度）与手指关节运动（包括关节位置、角速度和角加速度）之间的相互关系，它是建立手指数学模型和控制系统的基础之一。弹簧被动自适应手指机构数学模型的建立如图 3 所示。

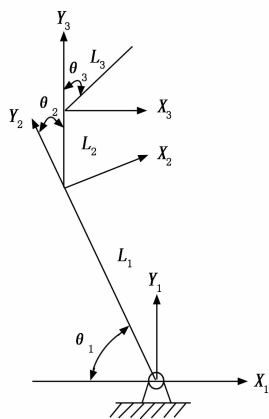


图 3 弹簧被动自适应手指数学模型

其中： $L_i$  表示各手指节的长度， $i$  表示手指关节数； $d_i$  表示相邻两连杆旋转轴的两坐标系正方向的轴向垂直距离； $\alpha_i$  表示与之相对应的指节  $L_i$  的扭转角； $\theta_i$  表示指节  $L_{i-1}$  和相邻指节  $L_i$  之间的旋转角。

表 1 为 2 种模块化手指的结构参数表。

表 1 弹簧被动自适应手指的 D-H 参数表

| 关节 $i$ | $\theta_i$ | $\alpha_i$ | $L_i$ | $d_i$ | $\theta_i$ 运动范围           |
|--------|------------|------------|-------|-------|---------------------------|
| 1      | $\theta_1$ | $\alpha_1$ | $L_1$ | $d_1$ | $65^\circ \sim 135^\circ$ |
| 2      | $\theta_2$ | $\alpha_2$ | $L_2$ | $d_2$ | $0^\circ \sim 30^\circ$   |
| 3      | $\theta_3$ | $\alpha_3$ | $L_3$ | $d_3$ | $5^\circ \sim 30^\circ$   |

其中两相邻指节之间的齐次变换关系为:

$${}_{i-1}^i\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i\cos\alpha_i & \sin\theta_i\sin\alpha_i & L_i\cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i\cos\alpha_i & -\sin\theta_i\sin\alpha_i & L_i\sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

手指指根位置在基础坐标系中的坐标表示分别为:

$$[O_x \ O_y \ O_z \ 1]^T = \begin{bmatrix} l1c1 + l2c12 + l3c123 \\ l1s1 + l2s12 + l3s123 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

其中:  $\cos(\theta_i) = c_i, \sin(\theta_i) = s_i, \cos(\theta_i + \theta_j) = c_i + c_j, \sin(\theta_i + \theta_j) = s_i + s_j$ 。

### 3 实验结果与分析

本文所研制的欠驱动多指手有 3 根手指, 每根手指有 4 个关节, 其中 3 根手指由 1 个微型直流步进电机进行驱动, 由于基指节主要起到手指的安装和驱动作用, 所以整个手指的自由度为 3 个。为了能够丰富欠驱动手的抓取模式, 在基于模块化手指的基础上, 又增加了两个手指间的耦合自由度 (即手指转位机构), 该手指转位机构中, 每根手指各有  $90^\circ$  的旋转空间, 机械手可通过变换手指的方向来适应不同的抓取任务, 该转动由 1 个  $9\text{ g}$  的舵机进行驱动。因此该欠驱动多指手共有 10 个自由度。欠驱动手抓取规划方法如图 4 所示。

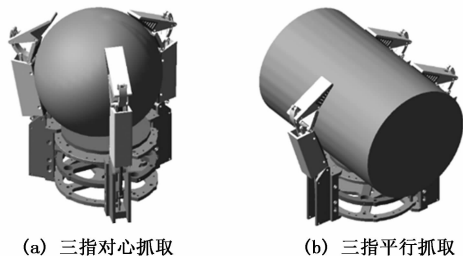


图 4 欠驱动手抓取规划方法

ADAMS 中的模型需要一开始在 Creo 中建好三维模型, 并简化导入。将模型导入以后, 首先在 ADAMS 中定义欠驱动手各个零部件的材料, 定义好材料以后需要在欠驱动手各关节处增加运动副约束、载荷和驱动, 然后开始进行抓取仿真, 最后对仿真结果进行分析, 整理出欠驱动手在针对不同抓取目标的抓取过程中, 其各关节的转动角度和接触力随时间变化的曲线图。

#### 3.1 三指对心包络抓取球形物体仿真

欠驱动手要进行的是抓取仿真, 不是转位仿真, 所以将欠驱动手掌和手指转位机构在 ADAMS 中装配为一个整体, 另外在欠驱动手建模时先不要加入被抓物体, 需要在 ADAMS 软件中进行建模, 包括设置其位置和大小。三指对心包络抓取球体的虚拟样机模型如图 5 所示。

在进行抓取仿真时, 欠驱动手各手指关节都会与球体接触, 并产生接触力, 因此需要在手掌、各手指关节、底座与球体之间施加接触载荷, 各指节之间还需要添加扭转

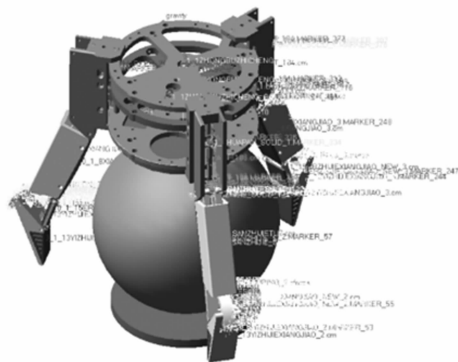


图 5 三指对心包络抓取虚拟样机模型

弹簧阻尼器, 以防止仿真过程中会出现指节之间的干涉对分析过程造成的影响。其次, 选择 ADAMS 中的 STEP 函数作为施加在手掌中心滑盘处的驱动函数, 整个抓取过程很平稳, 即关节速度的变化也比较平缓, 因此可以得到较为稳定的接触力。当欠驱动手三指对心包络抓取球体时, 在中心滑盘处施加的驱动函数为 STEP (time, 0.0, 0, 7.5, -4); 当球体被平稳抓取时, 在手腕处施加的驱动函数为 STEP (time, 7.8, 0, 10, 50)。其中 ADAMS 抓取仿真过程截图如图 6 所示, 重力方向为  $-Y$  方向。抓取球体的尺寸如下, 半径为  $50\text{ mm}$ , 重量为  $2.5\text{ kg}$ 。

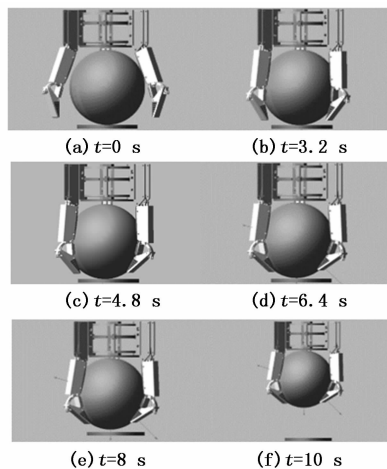


图 6 ADAMS 三指对心包络抓取仿真过程

在抓取仿真过程中, 观察欠驱动手与被抓球体之间的接触力和各手指关节角度随时间变化的曲线, 如图 7 (a), 7 (b) 所示。

由图 7 所知, 由于欠驱动手手指各指节间的扭弹簧作用, 在抓取运动刚开始时, 所有指节都一起运动, 当第三指节接触到球体之后, 由于手指连杆之间的机械限位的作用, 二指节开始运动, 以此类推, 最后由于指尖节的自适应弹簧作用, 欠驱动手会对球体实行三指对心包络抓取。

#### 3.2 三指平行抓取圆柱体仿真

三指平行抓取圆柱体仿真的各个操作步骤与其无较大区别, 因此三指平行抓取圆柱体的虚拟样机模型如图 8 所示。

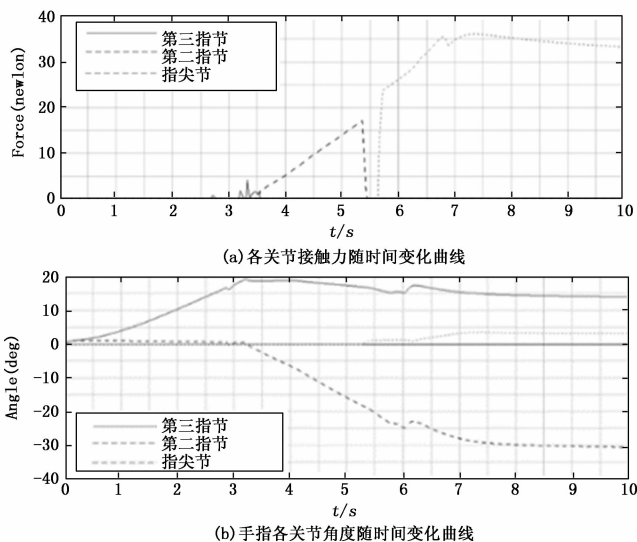


图 7 欠驱动手与被抓球体之间各参数随时间变化曲线

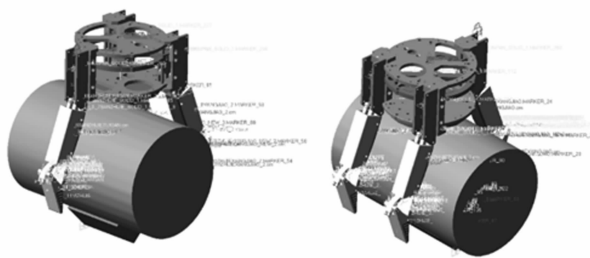


图 8 三指平行抓取虚拟样机模型

选择 ADAMS 中的 STEP 函数作为施加在手掌中心滑盘处的驱动函数，整个抓取过程很平稳，即关节速度的变化也比较平缓，因此可以得到较为稳定的接触力。当欠驱动手三指平行抓取圆柱体时，在中心滑盘处施加的驱动函数为 STEP (time, 0.0, 0, 3.1, 3.1)；当球体被平稳抓取时，在手腕处施加的驱动函数为 STEP (time, 3.2, 0, 7, 50)。其中 ADAMS 抓取仿真过程截图如图 9 所示，重力方向为 -Y 方向。抓取球体的尺寸如下，半径为 50 mm，长度为 150 mm，重量为 2.5 kg。

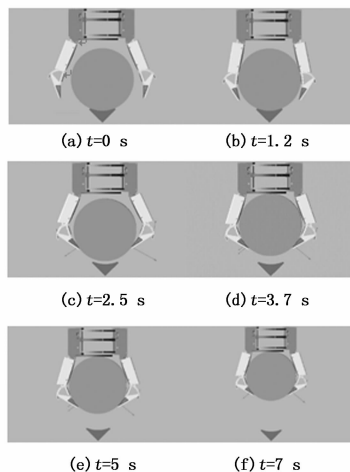


图 9 ADAMS 三指平行包裹抓取仿真过程

在抓取仿真过程中，观察欠驱动手与被抓球体之间的接触力随时间变化的曲线，如图 10 所示。

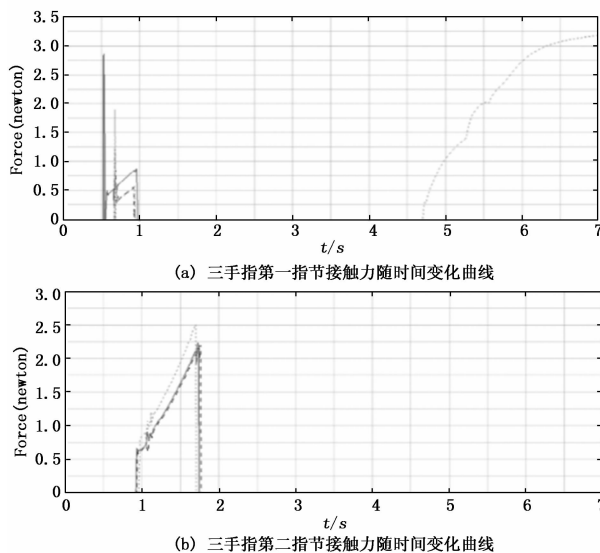


图 10 欠驱动手与被抓圆柱体之间各参数随时间变化曲线

由图 10 可知，欠驱动多指手在三指平行抓取圆柱体的过程中，圆柱体一侧的单手指指尖节与物体的接触力在 30 N 左右，而圆柱另一侧的双手指指尖节与物体的接触力在 15 N 左右，两侧手指与圆柱体的接触力相差 2 倍左右。手指在三指平行抓取圆柱体的过程中，3 根手指各指节角度随时间变化曲线如图 11 所示。

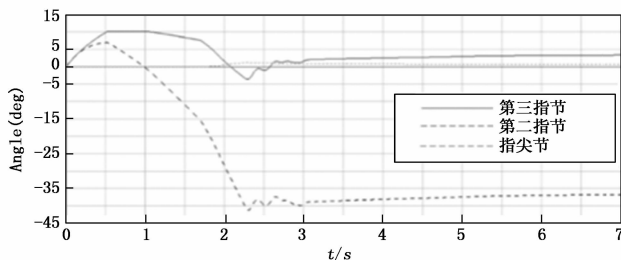


图 11 手指各指节的旋转角度随时间变化曲线

### 3.3 三指对心捏取正四面体仿真

三指平行抓取圆柱体仿真的各个操作步骤与其无较大区别，因此三指平行抓取圆柱体的虚拟样机模型如图 12 所示。

选择 ADAMS 中的 STEP 函数作为施加在手掌中心滑盘处的驱动函数，整个抓取过程很平稳，即关节速度的变化也比较平缓，因此可以得到较为稳定的接触力。当欠驱动手三指对心捏取正四面体时，在中心滑盘处施加的驱动函数为 STEP (time, 0.0, 0.0, 6.0, 5.5)；当物体被平稳抓取时，在手腕处施加的驱动函数为 STEP (time, 6.1, 0, 10, 50)。其中 ADAMS 抓取仿真过程截图如图 13 所示，重力方向为 -Y 方向。抓取正四面体的尺寸如下，各边边长为 5 mm，重量为 2.5 kg。

在抓取仿真过程中，观察欠驱动手与被抓正四面体之

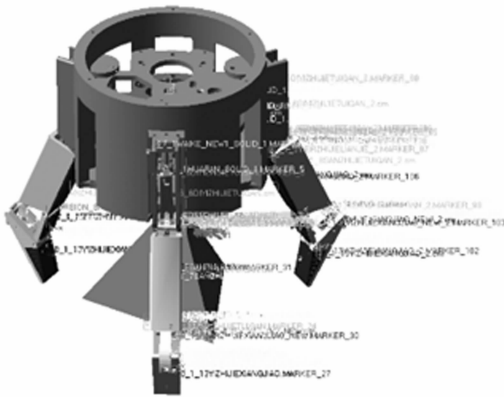


图 12 三指对心捏取虚拟样机模型

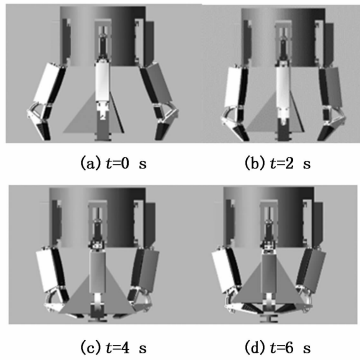


图 13 ADAMS 三指平行包络抓取仿真过程

间的接触力和各手指关节角度随时间变化的曲线, 其变化曲线如图 14 (a), 14 (b) 所示。

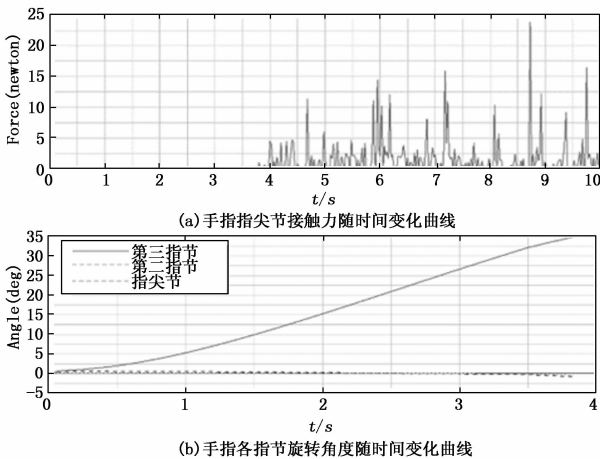


图 14 欠驱动手与被抓正四连体之间各参数随时间变化曲线

### 3.4 欠驱动三指机械手参数优化

现对欠驱动多指手 3 种不同的抓取构型进行参数化建模, 分别以中心滑盘连接手指处所受应力最小为目标在 ADAMS 中进行参数优化来优化基指节内部推杆的长度及摆动的角度。

本文的参数化设计主要以中心滑盘连接手指处所受应力最小为目标在 ADAMS 中进行参数优化来优化基指节内部推杆的长度及摆动的角度。在建模的过程中, 将铰链的

关键点进行参数化, 最终完成动力学模型的建立。其参数化模型的建立如图 15 所示。

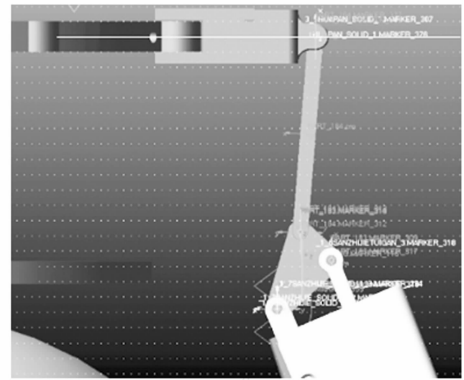


图 15 基指节内部结构参数化模型

本文参数化的坐标点主要是中部滑盘与基指节推杆的连接点、基指节推杆与其三角形连接块的联结点以及基指节连接块与第三指节的连接点。参数化变量如表 2 所示。

表 2 欠驱动多指手参数化的变量

| 序号 | X 坐标       | Y 坐标        | Z 坐标        |
|----|------------|-------------|-------------|
| 1  | 39.159 191 | -11.262 007 | 30.809 523  |
| 2  | 39.009 191 | 39.734 692  | 29.562 047  |
| 3  | 39.009 191 | -46.8       | -25.809 523 |
| 4  | 39.009 191 | -40.440 013 | -32.866 475 |

影响中心滑盘连接手指处的应力大小的因素非常多, 影响因素主要有基指节推杆的长度以及其摆动的角度等等。忽略基指节内部各个连接件之间摩擦力以及振动对其应力的影响, 本文选择了 3 个角度、1 个连杆长度和弹簧刚度作为优化变量。设计变量的设置如表 3 所示。

经过优化设计计算后, 优化后的最佳变量值如表 4 所示。

表 3 欠驱动多指手设计变量的设置

| 序号 | 标准值   | 区间             |
|----|-------|----------------|
| 1  | 28.5  | [25.5, 31.5]   |
| 2  | 177.5 | [175.5, 179.5] |
| 3  | 267   | [265, 269]     |
| 4  | 268   | [266, 270]     |
| 5  | 50    | [49, 51]       |

表 4 欠驱动多指手优化后的最佳变量值

| 序号 | 标准值   | 优化值               |
|----|-------|-------------------|
| 1  | 28.5  | 25.562 859 963 5  |
| 2  | 177.5 | 175.511 841 114 7 |
| 3  | 267   | 265.056 722 984 9 |
| 4  | 268   | 269.866 487 886 7 |
| 5  | 50    | 48.833 091 416 4  |