DOI: 10.3901/JME.2021.01.008

混合工作模式欠驱动手设计及其接触力分析^{*}

李小彭 郭军强 孙万琪 尚东阳 闻邦椿
(东北大学机械工程与自动化学院 沈阳 110819)

摘要: 机器人手目前主要应用于机器人与环境的交互。传统欠驱动机器人手的手指末端运动轨迹并不是一条直线,这种运动轨迹使得它们无法抓取桌面上较薄的物体以及小物体。为了克服这个缺陷,许多研究者在欠驱动手结构中加入了直线机构,使其能够捏取平台上的物体,但目前存在的结构均为双指关节结构,相对于三关节手指其抓取范围较小且适用场合较少。为了解决以上问题,设计了一种新型的基于变胞原理的欠驱动手。手指具有三个指关节,它拥有两种工作模式:线性平行捏取模式和自适应抓取模式。在线性平行捏取模式下,该欠驱动手指可视为双关节手指,拥有更好的稳定性;在自适应抓取模式下,该欠驱动手指可视为三关节手指,拥有更大的工作空间且能更好地抓取不规则物体。该机构可以根据目标物体的尺寸、位置和形状特征自适应的改变工作模式。对欠驱动手的手指部分进行运动学分析以及接触力的分析,为设计提供理论参考。制作样机进行抓取试验,试验结果表明,该手拥有较大的适用范围并具有良好的抓取性能。

关键词: 变胞机构; 机械手; 欠驱动; 运动学; 接触力

中图分类号: TH112

Design and Contact Force Analysis of Under-actuated Manipulator with Hybrid Working Mode

LI Xiaopeng GUO Junqiang SUN Wanqi SHANG Dongyang WEN Bangchun
(School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819)

Abstract: At present, robot hand is mainly used in the interaction between robot and environment. The finger end trajectory of the traditional underactuated robot hand is not a straight line, which makes it impossible for them to grasp the thinner objects and small objects on the desktop. In order to overcome this defect, many researchers add a straight-line mechanism to the underactuated hand structure, so that it can grasp the objects on the platform. However, the existing structures are all structures with two knuckles, which have smaller grasping range and less application occasions compared with the structures with three knuckles. In order to solve the above problems, a new type of under drive operation based on the theory of metamorphic principle is designed. The finger has three knuckles. It has two working modes: linear parallel pinching mode and adaptive grasping mode. In the linear parallel pinching mode, the underactuated finger can be regarded as a two joints finger with better stability; in the adaptive grasping mode, the underactuated finger can be regarded as a three joints finger with larger working space and better ability to grasp irregular objects. The mechanism can adaptively change the working mode according to the size, position and shape characteristics of the object. In order to provide theoretical reference for design, kinematic analysis and contact force analysis are carried out on the finger part of under-actuated manipulator. The experimental results show that the hand has a wide range of application and good grasping performance.

Key words: metamorphic principle; manipulator; under-actuated; kinematic; contact force

0 前言

随着机器人在工业生产和人类生活中被广泛应

用,对其抓取能力的要求也越来越高。在过去的 30 年里,机器人手的发展得到了研究人员的极大关注^[1],有许多学者在机器人手领域取得了杰出的成就。根据系统执行器的数目与其自由度数目的关系,将机器人手分为冗余手、全驱动手和欠驱动手三类。其中,冗余和全驱动设计方法广泛应用于灵巧手领

^{*} 国家自然科学基金(51875092)和中央高校基本科研业务专项资金(N170302001)资助项目。20191129 收到初稿,20200323 收到修改稿

域。其特点是可以通过控制每个手指关节的运动从而实现对手指位姿的精确控制。近年来, 研究者开发了许多灵巧手, 比较典型的有 NASA^[2], Gifu^[3]以及 BCL-13^[4]。这些灵巧手可以完成复杂的抓取任务。但由于每个关节自由度至少由一个执行器驱动, 且通常具有复杂的控制和传感系统来管理整个设备, 使得冗余驱动和全驱动机械手重量太大且造价昂贵, 这些缺点限制了这些机械手的实用性。因此, 需要设计出一种在保证能实现各种复杂的抓握的前提下, 控制相对简单且重量低的机械手^[5]。这导致了欠驱动手指的发展, 例如 SDM^[6], TH-1^[7], TH2^[8], 以及 SARAH^[9-12], TBM^[13]。

欠驱动技术是拟人机器人的发展不可或缺的研究方向之一^[14]。欠驱动意味着这种手指所需要的执行器的数目要小于它们所拥有的自由度的数目, 取而代之的是弹簧或耦合机构来实现欠驱动抓取功能。这种设计使得欠驱动手能够进行多级抓握, 预加载弹簧用于被动控制手的运动, 直到欠驱动手与被抓握的物体接触, 它能自适应抓取不同形状和大小的物体, 解决了控制难的问题^[15]。

虽然传统的欠驱动手可以满足大多数的应用需求, 但其手指末端在抓取或捏取模式下的运动轨迹不是直线, 这样的设计会导致的问题是: 当手指合拢时, 它们的指尖的位置实际上会改变, 从而产生一个间隙。这使得传统欠驱动手在没有复杂的控制系统的情况下无法用于抓取桌面上较薄的物体以及小物体。为了解决这一问题, LUO 等^[16]提出了一种新型的直线机构, 并设计出一种具有混合抓取模式的两指节机器人手指 VGS。但相比于三关节欠驱动手指, 双关节的手指的抓取范围较小。因此, 本文基于变胞原理设计了一种新的具有混合抓取模式的欠驱动机械手。该手指在线性平行捏取模式下末端指关节运动轨迹为直线, 且在末端指骨接触物体后, 第二、第三指关节无相对运动, 可视为双关节手指; 在自适应抓取模式下, 第一或第二指骨先接触物体, 之后其他两个指骨依次接触物体, 对物体进行自适应包络抓取, 该模式下, 该手指结构为三指关节结构, 有着更大的抓取范围。该欠驱动手指结构提高了机器人手的应用范围和可靠性。

1 欠驱动手结构与工作原理

欠驱动手指的整体结构如图 1 所示, 其中第三指骨主要实现线性平行捏取模式下对物体的捏取; 第一、第二和第三指骨依次接触物体即可实现对物

体的包络抓取。欠驱动手指的机构简图如图 2 所示。

图 1 欠驱动手指结构

图 2 机构简图

1~11: 连杆 12: 套筒 13, 14: 弹性元件
15~17: 第一、第二、第三指骨

图 2 中, 1、2、3、6、7、12 和 15 构成直线运动机构, 其中连杆 3 与套筒 12 通过旋转副与基座连接, 在 3 与 12 的约束下, 杆件 6 的上端在手指工作过程中无竖直方向的位移, 连杆 6、7、15、2 以及连杆 1、2、3 构成两个平行四边形结构, 因此, 在手指工作过程中, 连杆 7 沿水平方向作直线运动。

机构在与目标物体接触之前, 连杆 5 对 8 产生的作用力不足以使弹性元件伸长, 此时构件 7、8 可视为同一构件, 因此, 第二和第三指骨沿水平方向运动, 直至第三指骨与目标物体接触, 则完成线性平行捏取。

若目标物体先与第一或第二指骨接触, 则欠驱动手会自适应的执行自适应包络抓取, 在自适应包络抓取中第一指骨 15 首先接触物体, 此时构件 1、

2、3、6、7、12、13、15 的运动均被限制, 连杆 5 克服弹性元件的拉力使构件 8 与 7 分离。由于弹性元件 14 的存在指骨 16 与 17 可视为一体, 此时第二、第三指骨绕第一指骨上端的旋转副旋转, 直至第二指骨 16 接触物体, 连杆 9 克服弹力推动弹性元件使构件 10 与第三指骨 17 分离, 之后第三指骨绕第二指骨上端的旋转副作旋转运动直至将目标物体包络。

一般的欠驱动手在平行夹持模式下, 指尖的运动轨迹通常是弧形的, 因此指尖将在纵向上有位移。当其捏取桌面上不同尺寸的小物体时, 其位移也不同, 因此很难控制。在线性平行捏取模式下, 该问题得到了解决。该模式采用不同的机构实现平行夹持, 使指尖沿着水平方向运动, 在纵向上不会有位移, 对于不同的物体, 指尖的高度是相同的, 如图 3 所示。

图 3 不同捏取模式示意图

欠驱动手中, 为了保证线性捏取模式下第三指骨能够在竖直方向无位移, 在第一支关节处采用了直线运动机构^[15], 其机构简图如图 4 所示。

图 4 直线运动机构

为了具有直线轨迹, 连杆机构的长度应满足

$OP:OQ:PR:d=1:1.5:6:5$ ^[16]。此时, 在连杆 OP 与套筒的限制下, 点 R 在一定范围内沿水平方向运动, 在竖直方向位移为 0, 证明过程如下。

将全局坐标系固定于 O 点, 根据以上结构, 可得到矢量方程

$$\vec{OP} + \vec{PQ} = \vec{OQ} \quad (1)$$

由欧拉方程可得

$$\begin{cases} l_{OP} \cos \theta_1 + l_{PQ} \cos \theta_2 = x_Q \\ l_{OP} \sin \theta_1 + l_{PQ} \sin \theta_2 = y_Q \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可得

$$l_{PQ}^2 = x_Q^2 + y_Q^2 + l_{OP}^2 - 2l_{OP}x_Q \cos \theta_1 - 2l_{OP}y_Q \sin \theta_1 \quad (3)$$

对三角形 OPQ 有

$$\cos P = (l_{OP}^2 + l_{PQ}^2 - l_{OQ}^2) / 2l_{OP}l_{PQ} \quad (4)$$

$$\cos \theta_3 = (l_{OQ}^2 + l_{PQ}^2 - l_{OP}^2) / 2l_{OQ}l_{PQ} \quad (5)$$

根据几何关系可得

$$y_R = l_{PR} \sin(\pi/2 - \theta_3) - l_{OP} \sin(\pi/2 - \theta_3 - P) \quad (6)$$

$$x_R = \begin{cases} l_{OP} \cos \theta_1 - l_{PR} \cos(\pi/2 - \theta_3) & 0 \leq \theta_1 < \pi/2, 3\pi/2 \leq \theta_1 < 2\pi \\ l_{OP} \cos \theta_1 + l_{PR} \cos(\pi/2 - \theta_3) & \pi/2 \leq \theta_1 < 3\pi/2 \end{cases} \quad (7)$$

根据已知条件设 $x_Q = 0$, $y_Q = 15$, $l_{OP} = 10$ mm, $l_{PQ} = 15$ mm, $l_{PR} = 60$ mm, 联立式(1)~(7)可得到 x_R 与 y_R 关于 θ_1 的运动学方程, 设连杆 OP 绕 P 点以 $\omega_{OP} = 36^\circ/\text{s}$ 的角速度运动, 在 Matlab 中得到 R 点的位置关于 t 的变化曲线。同时在 ADAMS 中建模进行仿真分析, 结果如图 5 所示。

图 5 R 点坐标 x_R 与 y_R 在 Matlab 以及 ADAMS 中的仿真结果

由仿真结果可知, 在 $0 \leq t \leq 0.4$ ($0^\circ \leq \theta_1 \leq 14.4^\circ$) 以及 $4.6 \leq t \leq 10$ ($165.6^\circ \leq \theta_1 \leq 360.0^\circ$) 时, R 点在竖直方向位移为 0 且在水平方向沿着同一方向运动。而由之后的运动学分析可知, 在欠驱动手的工作过

程中 θ_1 能够始终保持在上述范围内。因此, 在连杆 1、连杆 6、旋转副 Q 、 P 、 Q 以及套筒 12 的约束下, 连杆 7 作水平运动。

使用 ADAMS 对第一指关节的运动进行仿真, 如图 6 所示, 得到当连杆 10 以 $\omega_{OP} = 5^\circ/\text{s}$ 的角速度运动时, 第一指骨上方关节的运动曲线以及连杆 1 的运动范围。

图 6 第一指关节运动曲线

2 运动学分析

根据欠驱动手的结构, 可以得到该欠驱动手的工作过程中任意时刻的运动学方程, 为了便于描述, 将机构的整个工作过程分为第一构态、第二构态以及第三构态。

第一构态: 机构三个指骨均未接触物体, 第一指关节转动, 第二、第三指关节沿 x 轴方向平行移动, 包括线性平行捏取模式的整个工作过程。

第二构态: 机构第一指骨接触物体, 第一指关节固定, 第二、第三指关节转动, 且始终处于同一平面。

第三构态: 机构第一、第二指骨均与物体接触, 第三指关节转动。

2.1 第一构态时的运动学建模

由图 6 可知, 欠驱动手在第一构态下, 其第二、第三指骨在 x 轴方向的位移约为 46.36 mm, 且有 $165.6^\circ \leq \theta_1 \leq 360.0^\circ$, 因此, 在欠驱动手第一构态下的整个工作过程中, 第二、第三指骨能够始终保持在水平方向运动。根据上述分析, 欠驱动手指处于第一构态时可以等效为图 7 所示的结构。

原动件为杆 l_{AB} , 其角速度为 $\omega_{AB} = 5^\circ/\text{s}$, 则杆 l_{AB} 的运动规律为

$$\theta_A = \theta_{A0} - \omega_{AB}t \quad (8)$$

式中, θ_{A0} 为 θ_A 的初始值。

根据杆 l_{AB} 与杆 l_{BC} 的几何关系, 可得矢量方程

$$l_{AB} + l_{BC} = l_{AC} \quad (9)$$

图 7 第一构态等效机构图

由欧拉方程可得

$$\begin{cases} l_{AB} \cos \theta_1 + l_{BC} \cos \theta_2 = x_C \\ l_{AB} \sin \theta_1 + l_{BC} \sin \theta_2 = y_C \end{cases} \quad (10)$$

式(10)两方程分别对 t 求一阶导数可得到 ω_{AB} 和 ω_{BC} 关于 t 的表达式

$$\begin{cases} -l_{AB} \omega_{AB} \sin \theta_A - l_{BC} \omega_{BC} \sin \theta_B = v_{xc} \\ l_{AB} \omega_{AB} \cos \theta_A + l_{BC} \omega_{BC} \cos \theta_B = v_{yc} \end{cases} \quad (11)$$

将式(11)写成矩阵形式, 即得节点 C 的速度方程

$$\begin{bmatrix} v_{xc} \\ v_{yc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{dx_c}{dt} \\ \frac{dy_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_{AB} \sin \theta_A & -l_{BC} \sin \theta_B \\ l_{AB} \cos \theta_A & l_{BC} \cos \theta_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{AB} \\ \omega_{BC} \end{bmatrix} \quad (12)$$

对式(12)进行对 t 求一阶导数可得 α_{AB} 和 α_{BC} 关于 t 的表达式, 即可得到节点 C 的加速度方程

$$\begin{bmatrix} a_{xc} \\ a_{yc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{dv_{xc}}{dt} \\ \frac{dv_{yc}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_{AB} \cos \theta_A & -l_{BC} \cos \theta_B \\ -l_{AB} \sin \theta_A & l_{BC} \sin \theta_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{AB}^2 \\ \omega_{BC}^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -l_{AB} \sin \theta_A & -l_{BC} \sin \theta_B \\ l_{AB} \cos \theta_A & l_{BC} \cos \theta_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{AB} \\ \alpha_{BC} \end{bmatrix} \quad (13)$$

由于结构的限制可知

$$y_c = d \quad (14)$$

本文中 $d=50$ mm, $l_{AB}=l_{BC}=45$ mm, $\theta_{A0}=166.67^\circ$, 根据式(2)以及式(8)~(14)得到节点 C 的

位置、速度、加速度曲线图, 如图 8 所示。

图 8 节点 C 在 x 方向的位置、速度及加速度曲线

2.2 第二构态时的运动学建模

当欠驱动手指第一指骨与物体接触后, 进入第二构态, 此时, 第一指骨保持静止, 第二指关节绕节点 D 旋转, 第三指关节随第二指关节运动, 与杆件 10 保持相对静止。根据上述分析, 欠驱动手指处于第二构态时可以等效为图 9 所示的结构。

图 9 第二构态等效机构图

对于 ABCD 构成的四杆机构, 以节点 A 为原点, l_{AD} 为 x 轴建立笛卡儿坐标系, 可得封闭图形的矢量方程

$$l_{AB} + l_{BC} = l_{AD} + l_{DC} \quad (15)$$

根据欧拉方程可得

$$\begin{cases} l_{AB} \cos \theta_1 + l_{BC} \cos \theta_2 = l_{CD} \cos \theta_3 + l_{AD} \cos \theta_4 \\ l_{AB} \sin \theta_1 + l_{BC} \sin \theta_2 = l_{CD} \sin \theta_3 + l_{AD} \sin \theta_4 \end{cases} \quad (16)$$

式中, $\theta_4 = 0$ 。

式(16)可简化为

$$\begin{cases} l_{AB} \cos \theta_1 + l_{BC} \cos \theta_2 = l_{CD} \cos \theta_3 + l_{AD} \\ l_{AB} \sin \theta_1 + l_{BC} \sin \theta_2 = l_{CD} \sin \theta_3 \end{cases} \quad (17)$$

对式(17)两端求一阶导数可得

$$\begin{cases} -l_{AB} \omega_1 \sin \theta_1 - l_{BC} \omega_2 \sin \theta_2 = -l_{CD} \omega_3 \sin \theta_3 \\ l_{AB} \omega_1 \cos \theta_1 + l_{BC} \omega_2 \cos \theta_2 = l_{CD} \omega_3 \cos \theta_3 \end{cases} \quad (18)$$

将式(18)改写为矩阵形式可得

$$\begin{bmatrix} -l_{AB} \sin \theta_1 & -l_{BC} \sin \theta_2 \\ l_{AB} \cos \theta_1 & l_{BC} \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} = l_{CD} \omega_3 \begin{bmatrix} -\sin \theta_3 \\ \cos \theta_3 \end{bmatrix} \quad (19)$$

对式(19)两端求导可得

$$\begin{bmatrix} -l_{AB} \cos \theta_1 & -l_{BC} \cos \theta_2 \\ -l_{AB} \sin \theta_1 & l_{BC} \sin \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\omega}_1^2 \\ \dot{\omega}_2^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -l_{AB} \sin \theta_1 & -l_{BC} \sin \theta_2 \\ l_{AB} \cos \theta_1 & l_{BC} \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = l_{CD} \alpha_3 \begin{bmatrix} -\sin \theta_3 \\ \cos \theta_3 \end{bmatrix} + l_{CD} \omega_3^2 \begin{bmatrix} -\sin \theta_3 \\ \cos \theta_3 \end{bmatrix} \quad (20)$$

对式(17)消去 θ_2 可得

$$l_{BC}^2 = l_{DC}^2 + l_{AD}^2 + l_{AB}^2 - 2l_{AB}l_{DC} \cos(\theta_3 - \theta_1) - 2l_{AB}l_{AD} \cos \theta_1 \quad (21)$$

解得

$$\theta_3 = 2 \arctan((B \pm \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}) / (A - C)) \quad (22)$$

在四杆机构 ABCD 中应取

$$\theta_3 = 2 \arctan((B + \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}) / (A - C))$$

$$\theta_2 = \arctan((B + l_{AD} \sin \theta_3) / (A + l_{AD} \sin \theta_3)) \quad (23)$$

$$A = l_{AD} - l_{AB} \cos \theta_1$$

$$B = -l_{AB} \sin \theta_1$$

$$C = (A^2 + B^2 + l_{DC}^2 - l_{BC}^2) / 2l_{DC}$$

在第二构态初始条件确定的情况下, 联立式(15)-(23)可得到第二指骨与 x_1 方向的夹角以及角速度、角加速度关于 ω_1 的函数。

当 $\omega_1 = 5^\circ/\text{s}$ 时, 假设该机构在 $\theta_1 = 86.691^\circ$ 时进入第二构态, 此时 $l_{AD} = 513.717 \text{ mm}$, 可得第二指骨与 x_1 方向的夹角 θ_3 、角速度 ω_3 以及角加速度 α_3 的变化曲线如图 10 所示。

图 10 θ_3 、 ω_3 、 α_3 变化曲线

对于 DEFG 构成的四杆机构

$$\theta_7 = 2 \arctan((B \pm \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}) / (A - C)) \quad (24)$$

在四杆机构 $DEFG$ 中应取

$$\theta_7 = 2 \arctan((B + \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}) / (A - C))$$

$$A = l_{GD} - l_{GF} \cos \theta_5$$

$$B = -l_{GF} \sin \theta_5$$

$$C = (A^2 + B^2 + l_{DE}^2 - l_{EF}^2) / 2l_{DE}$$

同理可得, 第二指骨与 x_2 方向的夹角 θ_7 以及角速度 ω_7 、角加速度 α_7 关于 ω_5 的函数。由于 θ_3 与 θ_5 方向相反, 则 $\omega_5 = -\omega_3$, 可得 θ_7 、 ω_7 与 α_7 关于 t 的变化曲线如图 11 所示。

图 11 θ_7 、 ω_7 与 α_7 变化曲线

2.3 第三构态时的运动学建模

当欠驱动手指第二指骨与物体接触后, 转变为第三构态, 此时, 第一、二指骨保持静止, 第三指关节绕节点 H 旋转。欠驱动手指处于第三构态时可以等效为图 12 所示的结构, 此时, 杆件 8 相对于主动件 4 的运动与第二构态时相同。

图 12 第三构态等效机构图

对于 $DEIH$ 构成的四杆机构有

$$\theta_{11} = 2 \arctan((B \pm \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}) / (A - C)) \quad (25)$$

在四杆机构 $DEIH$ 中应取

$$\theta_{11} = 2 \arctan((B + \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}) / (A - C))$$

$$A = l_{DH} - l_{DE} \cos \theta_9$$

$$B = -l_{DE} \sin \theta_9$$

$$C = (A^2 + B^2 + l_{HI}^2 - l_{EI}^2) / 2l_{HI}$$

同理可得, 第三指骨与 x_3 方向的夹角 θ_{11} 以及角速度 ω_{11} 、角加速度 α_{11} 关于 ω_9 的函数。由于 θ_3 与 θ_{11} 方向相同, 则 $\omega_9 = \omega_3$, 联立式(22)和式(25)可得 θ_{11} 、 ω_{11} 与 α_{11} 关于 t 的函数。假设第二指骨与水平方向夹角为 45° 时与物体接触, 欠驱动手转变为第三构态, 此时 $\theta_9 = 90.241^\circ + \omega_9 t$, 同样可得 θ_{11} 、 ω_{11} 以及 α_{11} 随时间 t 变化的曲线如图 13 所示。

图 13 θ_{11} 、 ω_{11} 与 α_{11} 变化曲线

综合以上分析可得欠驱动手工作过程中第一、第二以及第三指骨的角速度与角加速度。

欠驱动手指指骨上各关节坐标系如图 14 所示, 以固连于基座的坐标系 O 作为参考坐标系, 结合已知条件可得三种构态时指骨上各节点 K 、 D 、 H 、 J 的运动学方程。求解过程如下。

图 14 指骨上各关节坐标系

(1) 第一构态。

根据式(8)~(14)可得 D 点的位置方程为

$$\begin{cases} x_D = l_{OA} \cos \pi + l_{AB} \cos \theta_A + l_{BC} \cos \theta_B + l_{CD} \cos 0 \\ y_D = l_{OA} \sin \pi + l_{AB} \sin \theta_A + l_{BC} \sin \theta_B + l_{CD} \sin 0 \end{cases} \quad (26)$$

又由于直线机构的存在, 有 $y_D = 50$, 则节点 H 的位置方程为

$$\begin{cases} x_H = x_D + l_{DH} \cos 90^\circ \\ y_H = y_D + l_{DH} \sin 90^\circ \end{cases} \quad (27)$$

最后可得到第一构态下欠驱动手指指尖 J 点的位置方程

$$\begin{cases} x_J = x_H + l_{HJ} \cos 90^\circ \\ y_J = y_H + l_{HJ} \sin 90^\circ \end{cases} \quad (28)$$

对于节点 K , 设 l_{OK} 与水平方向的夹角为 θ_{OK} , l_{KD} 与水平方向的夹角为 θ_{KD} , 则有

$$\theta_{OK} = \arccos((x_D - l_{KD} \cos \theta_{KD}) / l_{OK}) \quad (29)$$

则可得节点 K 的位置方程为

$$\begin{cases} x_K = l_{OK} \cos \theta_{OK} \\ y_K = l_{OK} \sin \theta_{OK} \end{cases} \quad (30)$$

(2) 第二构态。

第二构态下节点 D 、 K 位置固定, 其所在位置取决于目标物体的特征。根据式(15)~(24)可求得节点 H 与 J 的位置方程, 由于图 9 中固连于节点 D 的坐标系 2 与参考坐标系 0 的夹角为 π , 节点 H 的位置方程为

$$\begin{cases} x_H = x_D + l_{DH} \cos(\pi - \theta_7) \\ y_H = y_D + l_{DH} \sin(\pi - \theta_7) \end{cases} \quad (31)$$

则第二构态下欠驱动手指指尖 J 点的位置方程为

$$\begin{cases} x_J = x_H + l_{DH} \cos 90^\circ \\ y_J = y_H + l_{DH} \sin 90^\circ \end{cases} \quad (32)$$

(3) 第三构态。

第三构态下节点 D 、 K 、 H 位置均固定。根据式(25)可得节点 J 的位置方程, 设图 12 中固连于节点 D 的坐标系 3 与参考坐标系 0 的夹角为 θ_{03} , 根据几何关系有

$$\theta_{03} = \arctan((y_H - y_D) / (x_H - x_D)) \quad (33)$$

又由于 l_{HI} 与 l_{HJ} 的夹角为 $\pi/2$, 可知第三构态下欠驱动手指指尖 J 点的位置方程为

$$\begin{cases} x_J = x_H + l_{DH} \cos(\theta_{11} + \theta_{03} - \pi/2) \\ y_J = y_H + l_{DH} \sin(\theta_{11} + \theta_{03} - \pi/2) \end{cases} \quad (34)$$

3 接触力分析

为对欠驱动手指的设计和优化工作提供帮助,

建立该手指的静力学模型, 对其接触力进行分析。为简化计算过程, 忽略手指的重力和手指与物体之间的摩擦。对欠驱动手指两种不同抓取模式下的接触力进行分析, 即线性平行捏取模式和自适应包络抓取模式。

欠驱动手指接触模型如图 15 所示, 手指与抓取物体时, 主动杆在转矩 T 的作用下带动整个结构运动, 抓取物体后三个指骨与物体的接触点分别为 P_1 、 P_2 、 P_3 , 三个指骨受到物体的反作用力 F_1 、 F_2 和 F_3 , 手指结构中的弹性元件所产生的力为 F_{S1} 和 F_{S2} 。接触点 P_1 、 P_2 、 P_3 可表示为

图 15 欠驱动手指接触力模型

$$P_1 = (-L_0 \cos \theta_1 + S_1 \cos \beta_1, -L_0 \sin \theta_1 + S_1 \sin \beta_1) \quad (35)$$

$$P_2 = (-L_0 \cos \theta_1 + L_1 \cos \beta_1 + S_2 \cos \beta_2, -L_0 \sin \theta_1 + L_1 \sin \beta_1 + S_2 \sin \beta_2) \quad (36)$$

$$P_3 = (-L_0 \cos \theta_1 + L_1 \cos \beta_1 + L_2 \cos \beta_2 + S_3 \cos \beta_3, -L_0 \sin \theta_1 + L_1 \sin \beta_1 + L_2 \sin \beta_2 + S_3 \sin \beta_3) \quad (37)$$

式中, θ_0 是主动杆与水平方向的夹角, β_1 、 β_2 、 β_3 分别为第一、第二、第三指骨与水平方向的夹角, S_1 、 S_2 、 S_3 分别为三个指骨上接触点与关节轴的距离, L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 分别为右端杆件的长度。

物体与手指间的接触力可以表示为

$$F_1 = (-F_1 \sin \beta_1, F_1 \cos \beta_1) \quad (38)$$

$$F_2 = (-F_2 \sin \beta_2, F_2 \cos \beta_2) \quad (39)$$

$$F_3 = (-F_3 \sin \beta_3, F_3 \cos \beta_3) \quad (40)$$

根据虚功原理可得

$$\begin{bmatrix} -T & F_{s1} & F_{s2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta_0}{\partial X_1} \\ \frac{\partial \theta_0}{\partial X_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 & F_2 & F_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \beta_1} \\ \frac{\partial P_2}{\partial \beta_2} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \beta_3} \end{bmatrix} \quad (41)$$

将弹簧的虚功近似为 $W_s = F_s \cdot \partial X$ ，根据式(35)~(37)可得

$$\begin{aligned} \partial P_1 = & (L_0 \sin \theta_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial \beta_1} \partial \beta_1 - S_1 \sin \beta_1 \partial \beta_1, \\ & -L_0 \cos \theta_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial \beta_1} \partial \beta_1 - S_1 \cos \beta_1 \partial \beta_1) \end{aligned} \quad (42)$$

$$\begin{aligned} \partial P_2 = & (L_0 \sin \theta_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial \beta_1} \partial \beta_1 - L_1 \sin \beta_1 \partial \beta_1 - S_2 \sin \beta_2 \partial \beta_2, \\ & -L_0 \cos \theta_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial \beta_1} \partial \beta_1 + L_1 \cos \beta_1 \partial \beta_1 + S_2 \cos \beta_2 \partial \beta_2) \end{aligned} \quad (43)$$

$$\begin{aligned} \partial P_3 = & (L_0 \sin \theta_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial \beta_1} \partial \beta_1 - L_1 \sin \beta_1 \partial \beta_1 - \\ & L_2 \sin \beta_2 \partial \beta_2 - S_3 \sin \beta_3 \partial \beta_3, \\ & -L_0 \cos \theta_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial \beta_1} \partial \beta_1 + L_1 \cos \beta_1 \partial \beta_1 + \\ & L_2 \cos \beta_2 \partial \beta_2 + S_3 \cos \beta_3 \partial \beta_3) \end{aligned} \quad (44)$$

在式(42)~(44)两端分别乘以 F_1 、 F_2 、 F_3 ，可得

$$F_1 \cdot \partial P_1 = F_1 (S_1 - L_0 \cos(\theta_1 - \beta_1) \frac{\partial \theta_1}{\partial \beta_1}) \partial \beta_1 \quad (45)$$

$$F_2 \cdot \partial P_2 = F_2 ((L_1 \cos(\beta_2 - \beta_1) - L_0 \cos(\theta_1 - \beta_2)) \times \frac{\partial \theta_1}{\partial \beta_1}) \partial \beta_1 + S_2 \partial \beta_2 \quad (46)$$

$$F_3 \cdot \partial P_3 = F_3 ((L_1 \cos(\beta_3 - \beta_1) - L_0 \cos(\theta_1 - \beta_3)) \frac{\partial \theta_1}{\partial \beta_1} \partial \beta_1 + L_2 \cos(\beta_2 - \beta_3) \partial \beta_2 + S_3 \partial \beta_3) \quad (47)$$

将式(45)~(47)代入式(41)可得

$$\begin{bmatrix} F_1 & F_2 & F_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \beta_1} \\ \frac{\partial P_2}{\partial \beta_2} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \beta_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 & F_2 & F_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 \\ K_{21} & K_{22} & 0 \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial \beta_1 \\ \partial \beta_2 \\ \partial \beta_3 \end{bmatrix} \quad (48)$$

$$K_{11} = S_1 - L_0 \cos(\theta_1 - \beta_1) \frac{\partial \theta_1}{\partial \beta_1}$$

$$K_{21} = L_1 \cos(\beta_2 - \beta_1) - L_0 \cos(\theta_1 - \beta_2) \frac{\partial \theta_1}{\partial \beta_1}$$

$$K_{31} = L_1 \cos(\beta_3 - \beta_1) - L_0 \cos(\theta_1 - \beta_3) \frac{\partial \theta_1}{\partial \beta_1}$$

$$K_{22} = S_2$$

$$K_{32} = L_2 \cos(\beta_2 - \beta_3)$$

$$K_{33} = S_3$$

令雅可比矩阵 J 为

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta_0}{\partial \beta_1} & \frac{\partial \theta_0}{\partial \beta_2} & \frac{\partial \theta_0}{\partial \beta_3} \\ \frac{\partial X_1}{\partial \beta_1} & \frac{\partial X_1}{\partial \beta_2} & \frac{\partial X_1}{\partial \beta_3} \\ \frac{\partial X_2}{\partial \beta_1} & \frac{\partial X_2}{\partial \beta_2} & \frac{\partial X_2}{\partial \beta_3} \end{bmatrix} \quad (49)$$

则式(48)可改写为

$$\begin{bmatrix} -T & F_{s1} & F_{s2} \end{bmatrix} \cdot J \cdot \begin{bmatrix} \partial \beta_1 \\ \partial \beta_2 \\ \partial \beta_3 \end{bmatrix} = 3 \begin{bmatrix} F_1 & F_2 & F_3 \end{bmatrix} \cdot K \cdot \begin{bmatrix} \partial \beta_1 \\ \partial \beta_2 \\ \partial \beta_3 \end{bmatrix} \quad (50)$$

由此，以矩阵的形式得到了驱动力矩与接触力之间的关系

$$\begin{bmatrix} F_1 & F_2 & F_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -T & F_{s1} & F_{s2} \end{bmatrix} \cdot J \cdot K^{-1} / 3 \quad (51)$$

根据以上各式，可以得出两种工作模式下接触力与接触点以及旋转角度之间的关系。

当上式满足 $\beta_2 = 90^\circ$ 、 $\beta_3 = 90^\circ$ 时，欠驱动手指为线性平行捏取模式。该模式下接触力与第一指骨的旋转角度和接触点位置之间的关系如图 16 所示。这里 $T = 500 \text{ N/mm}$ ，可以看出，手指的接触力 F 随着第一指骨的旋转角度的增加而增加，当接触点远离关节轴时，接触力减小。

图 16 线性平行捏取模式下接触力变化图

同样，可以得出自适应包络抓取时接触力 F_1 、 F_2 、 F_3 与各指骨转角 β_1 、 β_2 、 β_3 以及

接触点位置 S_1 、 S_2 、 S_3 的关系如图 17~19 所示。

图 17 F_1 关于不同参数的变化图

从图 17~19 可以看出, 随着 β_1 的增大 F_1 减小, 由于弹性元件的存在, F_1 也会随着 β_2 、 β_3 的变化产生改变, 当 S_1 、 S_2 、 S_3 增大时, F_1 也会减小; 对于 F_2 , 当 β_2 大于 45° 时, 随着 β_2 的减小 F_2 增大, 当 β_2 小于 45° 后继续减小时 F_2 会随之减小, 同样,

β_1 、 β_3 发生变化时 F_2 也会改变, 当 S_2 、 S_3 增大时, F_2 会减小, 但 F_2 不会随着 S_1 的变化而改变; 对于 F_3 , 当 β_3 大于 45° 时, 随着 β_3 的减小 F_3 增大, 当 β_3 小于 45° 后继续减小时 F_3 会随之减小, F_3 也会由于 β_1 、 β_2 的变化而改变, 当 S_3 增大时, F_3 会减小, 但 S_1 、 S_2 的值不会对 F_3 产生影响。

图 18 F_2 关于不同参数的变化图

(a) F_3 关于 β_1 、 S_1 变化图 (b) F_3 关于 β_2 、 S_2 变化图 (c) F_3 关于 β_3 、 S_3 变化图图 19 F_3 关于不同参数的变化图

4 抓取试验

为了验证欠驱动手指设计和分析的准确性, 制作了该欠驱动手结构的实物模型, 并进行了抓取试验以评估所提出的手的多功能性, 如图 20 所示。

根据物体的不同, 该手能够自动执行线性平行捏取或自适应抓取: 在线性平行捏取模式下, 手指可视为双关节结构, 末端指骨的运动轨迹为直线, 可以在相对简单的控制下捏取桌面上的物体; 在自

适应抓取模式下, 手指为三关节结构, 拥有更大的抓取范围。所设计的欠驱动手指能够抓取不同形状的物体, 达到了工业装配、搬运等场合的标准要求。

(a) 线性平行捏取

(b) 自适应抓取

图 20 欠驱动手抓取试验

试验表明, 该手具有以下优点。

(1) 欠驱动性能好: 每个手指有 3 个自由度, 一个电机足以驱动。这意味着手指易于控制, 适应性强。

(2) 抓取能力强: 抓取不同物体时拥有不同的工作模式, 能够对不同大小、位置的物体进行稳定的抓取, 具有广泛的应用范围。

5 结论

本文提出了一种新的并联自适应双工作模式机器人手。从结构设计、运动学、接触力等方面进行了讨论, 并制作了样机进行抓取试验。

运动学分析验证了直线机构的设计以及两种工作模式下各个指关节的运动轨迹; 通过接触力分析揭示两种工作模式下抓取不同物体时接触力的大小, 为设计和制造过程提供了一定的理论参考。

通过抓取试验, 验证了该手不同抓取模式, 试验结果表明, 手可以适应不同大小、位置和形状的对象, 并利用欠驱动原理与变胞原理实现不同抓取模式。在线性平行模式下, 手指末端沿直线移动, 适合对平台上的物体进行捏取; 在自适应抓取模式下, 该手指具有三个指关节, 较双关节手指有着更大的抓取范围。

参 考 文 献

- [1] 张文增, 马献德, 黄源文, 等. 末端强力抓取的欠驱动

- 拟人机器人手[J]. 清华大学学报, 2009, 49(2): 194-197.
- ZHANG Wenzeng, MA Xiande, HUANG Yuanwen, et al. Under-actuated humanoid robot hand with end power grasping[J]. Tsinghua Science and Technology, 2009, 49(2): 194-197.
- [2] LOVCHIK C S, DIFLER M A. The robonaut hand: A dextrous robotic hand for space[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 10-15, 1999, Detroit, Michigan. United States: IEEE, 1999: 907-912.
- [3] KAWASAKI H, KOMATSU T, UCHIYAMA K. Dexterous anthropomorphic robot hand with distributed tactile sensor: Gifu Hand II[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2002, 7(3): 296-303.
- [4] ZHOU Jianshu, YI Juan, CHEN Xiaojiao, et al. BCL-13: A 13-DOF soft robotic hand for dexterous grasping and in-hand manipulation[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018: 3379-3386.
- [5] 张文增, 陈强, 孙振国, 等. 具有形状自适应的欠驱动拟人机器人手指[J]. 机械工程学报, 2004, 40(10): 115-118.
- ZHANG Wenzeng, CHEN Qiang, SUN Zhenguo, et al. Underactuated robotic fingers with shape adaptation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(10): 115-118.
- [6] DOLLAR A M, HOWE R D. The highly adaptive SDM hand: Design and performance evaluation[J]. The International Journal of Robotics Research, 2010, 29(5): 585-597.
- [7] 张文增, 陈强, 孙振国, 等. 变抓取力的欠驱动拟人机器人手[J]. 清华大学学报, 2003, 43(8): 1143-1147.
- ZHANG Wenzeng, CHEN Qiang, SUN Zhenguo, et al. Under-actuated humanoid robot hand with changeable grasping force[J]. Journal of Tsinghua University, 2003, 43(8): 1143-1147.
- [8] ZHANG Wenzeng, CHEN Qiang, SUN Zhenguo, et al. Passive adaptive grasp multi-fingered humanoid robot hand with high under-actuated function[C]// 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 2004, New Orleans, LA: IEEE, 2004: 2216-2221.
- [9] BEGOC V, KRUT S, DOMBRE E, et al. Mechanical design of a new pneumatically driven underactuated hand[C]// 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 10-14, 2007, Roma, Italy: IEEE, 2007: 927-933.
- [10] GOSSELIN C. Adaptive robotic mechanical systems: A design paradigm[J]. Journal of Mechanical Design, 2006, 128(1): 192-198.
- [11] BIRGLEN L, GOSSELIN C M. On the force capability of underactuated fingers[C]// Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Taipei, Taiwan, China, 2003: 1139-1145.
- [12] BIRGLEN L, GOSSELIN C M. Grasp-state plane analysis of two-phalanx underactuated fingers[J]. Mechanism & Machine Theory, 2006, 41(7): 807-822.
- [13] DECHEV N, CLEGHORN W L. Multiple finger, passive adaptive grasp prosthetic hand[J]. Mechanism and Machine Theory, 2001, 36(10): 1157-1173.
- [14] 刘菲, 何广平, 陆震. 弹性欠驱动四指灵巧手设计与试验[J]. 机械工程学报, 2014, 50(15): 53-59.
- LIU Fei, HE Guangping, LU Zhen. Research and design of a novel tendon driven underactuated multi-fingered hand[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(15): 53-59.
- [15] 吴立成, 孔岩萱, 李霞丽. 全转动关节欠驱动手指机构及其运动学分析[J]. 机械工程学报, 2017, 53(1): 47-54.
- WU Licheng, KONG Yanxuan, LI Xiali. Fully rotational joint underactuated finger mechanism and its kinematics analysis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(1): 47-54.
- [16] LUO Chao, ZHANG Wenzeng. VGS hand: A novel hybrid grasping modes robot hand with variable geometrical structure[J]. Applied Sciences, 2019, 9(8): 1-14.

作者简介: 李小彭, 男, 博士, 1976 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机械振动与动力学、机械综合设计理论方法及应用、结合面振动摩擦耦合动力学。
E-mail: xpli@me.neu.edu.cn