

# 家禽净膛机械手末端执行器的设计及运动学分析

鲍秀兰 张磊 王树才

华中农业大学工学院, 武汉 430070

**摘要** 针对家禽净膛过程中末端执行器操作空间小、抓取灵活等特点, 对家禽净膛机械手末端执行器进行总体设计, 并设计三指三关节家禽自动净膛末端执行器的结构。通过对机械手末端执行器手指腱绳伸缩量与关节角度的变化规律、手指的工作姿态、手指干涉分析等进行分析研究, 获得家禽末端执行器净膛抓取时的最佳指节倾斜倒角。应用 D-H 矩阵通过齐次矩阵变换建立家禽机械手末端执行器的模型, 对末端执行器进行运动学求解, 验证所建立的末端执行器模型的正确性与可行性。

**关键词** 家禽; 净膛; 机械手; 末端执行器

**中图分类号** TS 251.3    **文献标识码** A    **文章编号** 1000-2421(2017)04-0117-08

家禽屠宰是禽肉加工的重要环节, 净膛(掏取内脏)又是家禽屠宰中工作环境最恶劣、劳动强度大、最难以实现机械化和自动化的一道工序。发达国家已经形成包括净膛<sup>[1]</sup>、分级在内的全自动生产线, 处理能力为 3 000~12 000 只/h<sup>[2]</sup>。荷兰 Meyn 公司生产的家禽自动净膛系统由 6 台设备组成, 分别完成前处理(割肛、开口)、净膛、后处理(吸肺、去嗉囊)及内外清洗等工序<sup>[3]</sup>。由于传统饮食习惯不同, 国外家禽内脏往往不作食用, 净膛设备只需取出内脏, 对内脏完整性不作要求。我国家禽尤其是鸭鹅的内脏经济附加值高, 国内屠宰企业对家禽净膛设备要求比国外要高, 进口净膛设备不完全适宜我国屠宰加工企业, 即使进口国外设备的屠宰企业净膛工序仍基本由人工完成。当前国内的机械手净膛技术正处于高速发展, QNZ15 型家禽掏膛机使用特定结构下的机械手爪对家禽内脏进行扒取; 得到扒取式家禽内脏机械手结构, 取内脏效果相对较好。吉林艾斯克公司研发了一种家禽自动掏膛机, 该掏膛机的控制机构为空间凸轮机构, 设计并进行了夹取式机械手取内脏正交试验, 得到机械手的最优运动参数<sup>[4-7]</sup>。熊利荣等<sup>[8]</sup>对家禽屠宰中的触觉系统进行改进, 自动化程度较高。近二十年来, 我国家禽规模化、标准化养殖技术得到快速普及, 家禽自动净膛技

术的应用环境逐渐成熟。自主研发适合中国国情的家禽屠宰自动化设备十分必要<sup>[9-10]</sup>。本研究根据自动家禽净膛要求, 设计了一种净膛机械手末端执行器, 该执行器通过三指三关节腱绳驱动手指弯曲和齿轮驱动手指转动, 建立了机械手末端执行器的运动学模型, 并分析了其工作状态。所设计的末端执行器可与智能机械臂、电子称质量等设备进行集成, 为形成家禽屠宰自动化生产线提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 末端执行器工作原理及传动方案

设计的家禽净膛末端执行器以樱桃谷鸭(该鸭在我国食用范围广泛, 具有代表性, 如图 1 所示)胴体为抓取对象, 其中, 割肛处的宽度为 35 mm, 从割肛处到内脏顶部长度为 180 mm, 腹腔宽度为 73 mm。末端执行器结构如图 2 所示, 主要由驱动机构、执行机构和传动机构组成。驱动机构为电动机, 执行机构为腱绳, 传动机构包括滚筒、齿轮箱、齿轮轴、联轴器。末端执行器采用三指式设计, 主要是 3 根手指完成对家禽内脏的抓取。自动净膛作业时, 末端执行器从割肛的开口处深入, 初始状态为三指并行; 到腹腔内部顶部后, 三指周向转动, 伴随着手指的弯曲, 形成一个包络空间, 较好地将家禽内脏

收稿日期: 2016-10-10

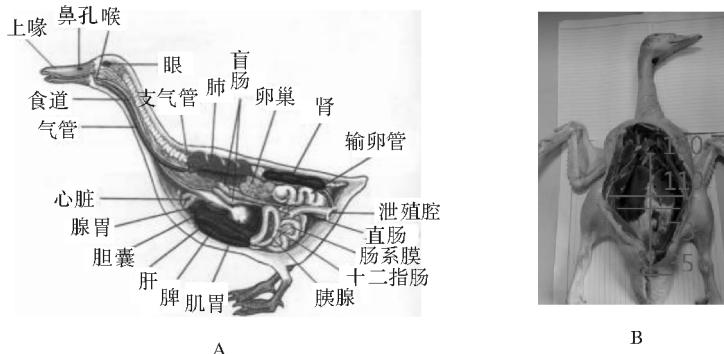
基金项目: “十二五”国家科技计划项目(2015BAD19B06)

鲍秀兰, 博士, 讲师。研究方向: 农产品加工技术与设备。E-mail: orchidbaol@ mail.hzau.edu.cn

通信作者: 王树才, 博士, 教授。研究方向: 农产品加工技术与设备及机电一体化。E-mail: wsc01@mail.hzau.edu.cn

抓住。其中,需要实现3个手指周向的运动,从而实现姿态的变化,该动作的完成是借助于底座下的一对外啮合圆柱直齿轮,3根手指中,中间手指固定不动,两侧手指连接下端的齿轮,通过电机带动齿轮转动,实现3根手指的相对角度变化。

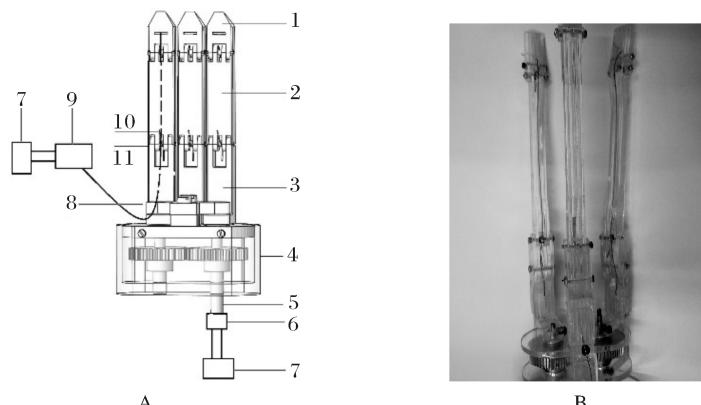
手指的弯曲动作是利用穿过指节内部的腱绳,电机带动腱绳的收缩完成手指的弯曲,利用扭簧的一个回复力保持手指指节的一个初始角度。



A.肉鸭腹腔内脏组织结构 Organizational structure of meat duck's abdominal organs; B.樱桃谷鸭胴体 Carcass of cherry valley ducks.

图1 家禽腹腔内脏结构

Fig.1 The structure of poultry abdominal viscera



A:机械手末端执行器方案示意图 A schematic diagram manipulator program; 1.远指节 Distal knuckle; 2.中指节 Middle knuckle; 3.基座 Chassis; 4.齿轮箱 Gear box; 5.齿轮轴 Gear shaft; 6.联轴器 Coupling; 7.电动机 Motor; 8.腱绳 Tendon rope; 9.滚筒 Roller; 10.扭簧 Torsional spring; 11.销轴 Hinge pin; B:机械手末端执行器实物图 Manipulator physical map.

图2 机械手末端执行器方案示意图与实物图

Fig.2 A schematic diagram manipulator program and manipulator physical map

## 1.2 机械手指的设计

家禽净膛末端执行器由3根机械手指组成<sup>[11]</sup>。每根机械手指采用连杆式结构,由基座、中指节、远指节组成,如图3所示。其中,远指节设计为尖弧形曲面,方便进入家禽内部。腱绳驱动具有结构简单、在狭小空间操作方便的特点<sup>[12-14]</sup>。机械手指的弯曲动作通过腱绳驱动。每根手指各个指节的中心位置均设有1个圆形通孔,其中远指节的圆孔将其位置延伸至矩形槽处。腱绳从手指基座插入,将其末端固定在远指端。舵机带动滚筒转动,驱动腱

绳,腱绳受力,使远指节运动,中指节随远指节一起弯曲,弯曲角度的极限值由设计时生成的倒角决定。

各关节连接处均设置有扭簧,且具有一定倾角的倒角。远指节的中部设有1个12 mm×2 mm×4 mm的矩形槽,用于固定腱绳的末端。末端执行器靠关节处的扭转弹簧恢复初始位置,故扭转弹簧需要有一个初始角度来保障手指的初始角度,最后选取初始角度为120°;各关节弹簧刚度的大小直接影响了手指的运动状态,综合考虑选取弹簧的刚度,

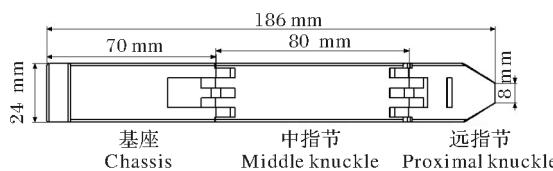


图3 手指整体示意图

Fig.3 A schematic diagram overall view of a finger

最后选取扭簧材料为65Mn的热轧弹簧钢。本研究中忽略腱绳的形变进行分析,所以选取腱绳时,主要考虑腱绳的直径与材料的刚度,综合选取直径为1 mm的304不锈钢。

$$T_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \alpha_{i-1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_{i-1} & \sin\theta_i \sin\alpha_{i-1} & a_{i-1} \cos\theta \\ \sin\theta_i & -\cos\theta_i \cos\alpha_{i-1} & -\cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & a_{i-1} \sin\theta \\ 0 & \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

在手指的基座上开始进行齐次矩阵变换,依次对相邻连杆进行变换,直至机械手指的末端部分。将各连杆变化相乘就可以得到手指末端相对于基座的总变换矩阵为:  ${}^0T_1 = {}^0T_1^{-1} {}^1T_2 {}^2T_3 \cdots {}^{n-1}T_n$ , 其中,  ${}^0T_n$  是所有  $n$  个关节变量的函数,根据  ${}^0T_n$  可以得到各手指末端的直角坐标位置及其方向姿态。

#### 1.4 末端执行器运动学正解分析

末端执行器的正向运动学分析是根据末端执行器的各关节变量,求出末端执行器操作装置的位姿。利用 D-H 法则得到相关的关节的连杆参数如表 1 所示。表 1 中,每个连杆由 4 个参数  $d_i$ 、 $a_{i-1}$ 、 $\alpha_{i-1}$ 、 $\theta_i$  描述,  $a_{i-1}$  和  $\alpha_{i-1}$  描述连杆本身的特征;  $d_i$  和  $\theta_i$  描述连杆  $i-1$  和连杆  $i$  之间的关系。对于移动关节  $i$ ,  $d_i$  是关节变量;对于转动关节  $i$ ,  $\theta_i$  是关节变量。

表1 末端执行器手指连杆(D-H)参数

Table 1 D-H parameters of manipulator

关节 $i$ Joint	$d_i$ / mm	$a_{i-1}$ / mm	$\alpha_{i-1}$ / ( $^{\circ}$ )	$\theta_i$ / ( $^{\circ}$ )	工作范围 Range
1	$L_1$	0	0	$\theta_1$	$[-90^{\circ} \quad 90^{\circ}]$
2	0	$L_2$	0	$\theta_2$	$[86^{\circ} \quad 100^{\circ}]$
3	0	$L_3$	0	$\theta_3$	$[-37^{\circ} \quad 0^{\circ}]$

### 1.3 机械手指连杆坐标系的建立

采用 D-H(Denavit-Hartenberg)参数法对家禽净膛机械手末端执行器的手指建立运动学模型。机械手指各个部件都简化为连杆,该机械手指具有 3 个转动自由度,转动关节通过销轴、弹簧连接,形成可以转动的连杆结构。由于机械手末端执行器的 3 根手指功能相似,仅位置不同,故选取其中 1 根手指为研究对象。该手指采用后置齐次变换矩阵描述相邻连杆坐标系相对位姿的关系。在各连杆上建立参考坐标系,齐次变换矩阵为  $T_i = \text{Rot}(z_{i-1}, \theta_i) \text{Trans}(0, 0, d_i) \text{Trans}(\alpha_{i-1}, 0, 0) \text{Rot}(x_i, \alpha_{i-1})$ , 即

$$T_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \alpha_{i-1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_{i-1} & \sin\theta_i \sin\alpha_{i-1} & a_{i-1} \cos\theta \\ \sin\theta_i & -\cos\theta_i \cos\alpha_{i-1} & -\cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & a_{i-1} \sin\theta \\ 0 & \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

建立的家禽净膛机械手末端执行器的手指模型如图 4 所示。

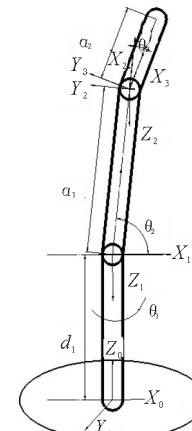


图4 手指模型示意图

Fig.4 Schematic finger model

由表 1 和图 4 求解出手指上串联连杆机构中相邻连杆之间的齐次变换矩阵,得到  ${}^0T_1$ 、 ${}^1T_2$ 、 ${}^2T_3$  三个齐次矩阵分别为:

式中,  $s\theta = \sin\theta$ ,  $c\theta = \cos\theta$ ,  $s(\theta_1 + \theta_2) = \sin(\theta_1 + \theta_2)$ ,  $c(\theta_1 + \theta_2) = \cos(\theta_1 + \theta_2)$ , 可直接求得末端执行器相对于基础坐标系的位姿矩阵。利用 D-H 法建立了末端执行器的运动学数学模型,通过正运动

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & 0 & s\theta_1 & 0 \\ s\theta_1 & 0 & -c\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} {}^1T_2 = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & l_2 c\theta_2 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & l_2 s\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} {}^2T_3 = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & l_3 c\theta_3 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & l_3 s\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

由 ${}^0T_n = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 \dots {}^{n-1}T_n$ 得:

$${}^0T_3 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta_1 c(\theta_2 + \theta_3) & -c\theta_1 s(\theta_2 + \theta_3) & s\theta_1 & c\theta_1 c\theta_2 l_2 + c\theta_1 c(\theta_2 + \theta_3) l_3 \\ s\theta_1 c(\theta_2 + \theta_3) & -s\theta_1 s(\theta_2 + \theta_3) & -c\theta_1 & s\theta_1 c\theta_2 l_2 + s\theta_1 c(\theta_2 + \theta_3) l_3 \\ s(\theta_2 + \theta_3) & s(\theta_2 + \theta_3) & 0 & l_1 + s\theta_2 l_2 + s(\theta_2 + \theta_3) l_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

学的解可以得出末端执行器各关节在动作中的轨迹;逆运动学可以求出末端执行器到达某一位置各关节的扭角,为实现机械手末端执行器自动控制提供了设计参数。根据本研究对末端执行器的设计,得到了基座、中指节、远指节的尺寸和所需转动角度,通过运动学分析可以知道其能够到达的位置范围,为下一步末端执行器控制做准备。

### 1.5 腱绳伸缩量与关节倾斜角规律分析

电机驱动滚筒使得腱绳长度变化,腱绳长度直接影响各手指关节间的相对角度。因此,需要对腱绳伸缩量 $S$ 与倾斜角 $\beta$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 之间的数值变化规律进行分析,并建立腱绳运动模型。图5中 $\beta$ 为机械手末端执行器初始状态中指节相对基座外倾倾斜角, $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 分别为机械手指中指节相对基座和远指节相对中指节的内倾倾斜角,如图5所示。

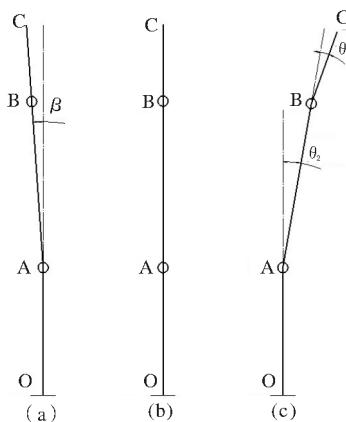


图5 手指转动角度示意图

Fig.5 Single finger bending process of change

手指采用机械和弹簧综合限位方法,手指关节套有弹簧,各指节加有钢丝腱绳<sup>[15]</sup>。腱绳采用变形较小的钢丝绳来传递指节间的动力。为了简化分析,忽略腱绳自身在拉动绷紧时发生的形变<sup>[16]</sup>,视其为刚性结构,建立腱绳运动模型有利于分析掌握腱绳在手指相对运动过程中的变化情况,在各手指

指节发生相对转动过程中,建立腱绳的伸缩量长度模型:

$$S = \begin{cases} a_2 \times \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_1 \times \cos\theta_2 + r \times \theta_2 + \\ r \times (\theta_2 + \theta_3) - a_1 - a_2 \\ (a_1 + a_2) \times (\cos\beta - 1) + r \times \beta \end{cases} \quad 0^\circ \leq \beta \leq 10^\circ, 0^\circ \leq \theta_2 \leq 4^\circ, 0^\circ \leq \theta_3 \leq 37^\circ \quad (3)$$

其中,  $AB = a_1$ ,  $BC = a_2$ ,  $S$  为腱绳的伸缩长度变化量,  $r$  为销轴半径。设计手指基本尺寸参数为  $a_1 = 80$  mm,  $a_2 = 36$  mm,  $r = 1.5$  mm 时, 代入式(3)中进行分析求解, 确定腱绳伸缩量  $S$  与倾斜角  $\beta$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$  之间的数值变化规律。

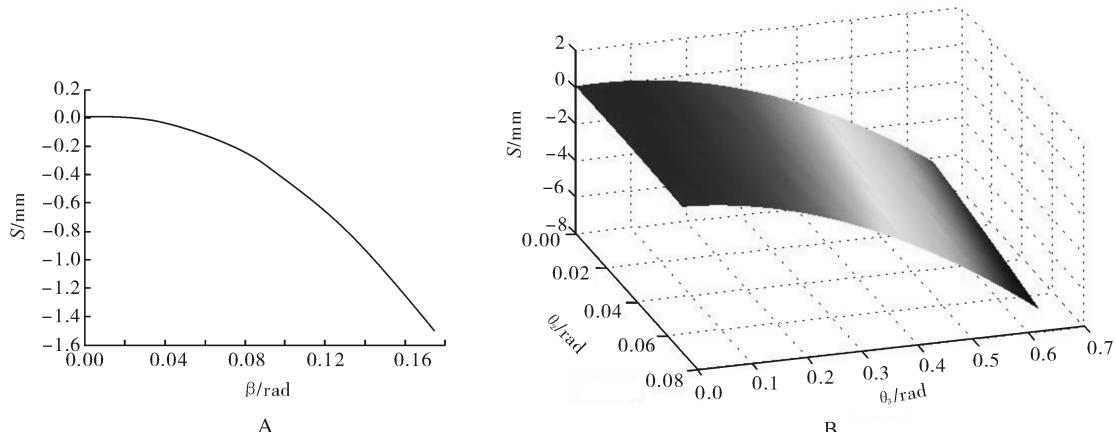
图6A 为腱绳长度伸缩量  $S$  与  $\beta$  之间变化关系, 反映了图5中机械手手指从状态(a)运动至状态(b)下腱绳长度变化情况。在  $\beta = 0.17$  rad, 位置表现为机械手指外倾的极限情况, 此时腱绳收缩了 0.8 mm 的长度, 在手指弯曲转动过程中, 逐渐回复腱绳原长, 在  $\beta = 0.06$  逐渐减小至 0 rad 过程中出现了腱绳在原长下长度先伸长增大, 然后收缩减小, 最后恢复到原长情况。图6B 为腱绳长度伸缩量  $S$  与  $\theta_2$ 、 $\theta_3$  之间的变化情况, 对应图5中末端执行器手指从状态(b)运动至状态(c)过程。在  $\theta_2$ 、 $\theta_3$  刚开始增大时, 腱绳出现了和  $\beta$  变化下相似情形的长度变化情况, 即长度先开始伸长增大, 然后再收缩减小, 回复至原长, 随着手指弯曲运动进行, 腱绳继续被拉动, 长度不断减少, 直至减小到 2.5 mm 时腱绳长度基本保持不变。

由于腱绳安装于末端执行器手指指节的圆孔中, 故可以通过腱绳伸缩量  $S$  与倾斜角  $\beta$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$  之间的数值变化规律来建立腱绳长度伸缩的近似模型。

## 2 结果与分析

### 2.1 末端执行器手指干涉分析

若手指的各指节长度尺寸或指节间相对转动角

A:  $S$  与  $\beta$  变化关系 The relation between  $S$  and  $\beta$ ; B:  $S$  与  $\theta_2$ 、 $\theta_3$  变化关系 The relation among  $S$  and  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ .图 6  $S$  与  $\beta$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$  变化关系Fig.6 The relation among  $S$  and  $\beta$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ 

度设计不当,各手指上的远指节会发生接触。因此,需要通过对倾斜角  $\beta$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$  的角度进行合理设置(如表 2 所示),使得手指的指节发生相对弯曲转动,并形成有效的抓取空间,同时保证手指在运动情况下不会发生干涉影响。

表 2 各手指节倾斜倒角

Table 2 Chamfer in section of each finger (°)

组数 Number	$\beta$	$\theta_2$	$\theta_3$
1	10	5	40
2	15	5	40
3	15	5	35
4	15	5	45
5	10	5	30
6	10	5	35
7	10	8	35
8	10	8	30
9	10	3	40
10	10	3	35
11	10	4	40
12	10	4	35
13	10	4	30
14	10	4	37

经过对  $\beta$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$  设定参数建模装配模型,检查末端执行器中多个手指的弯曲闭拢情况,检验手指之间是否发生运动干涉,确定适宜的指节上倾斜角的角度。首先对  $\beta$  进行调节,经过虚拟装配发现,当  $\beta=10^\circ$  时手指中指及以上部分的外倾位姿较为合适,然后对  $\theta_2$  进行调节,当  $\theta_2=3^\circ$  时,手指中指及以上部分的内倾姿态较为合理,最后对  $\theta_3$  进行选择取值,当  $\theta_3=35^\circ$  时,指节间的偏倾状况较为合适。

## 2.2 末端执行器受力分析

在抓取过程中,以其中一个手指为例,求取各关节力矩值。如图 7 所示,基座、中指节和远指节长度分别设为  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ ,各指节作用力分别为  $F_i$ ,各作用力分别作用于  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ ,同时表示抓取点到各关节的距离。

根据力心平移定理可知,对基座关节力矩进行求取时,需要将  $F_i$  平移至基座关节点,外加相应力对  $J_1$  点产生的作用力矩,以  $|J_1 \times F_i|$  表示力对点  $J_1$  的力臂。手指抓取示意图如图 7 所示:

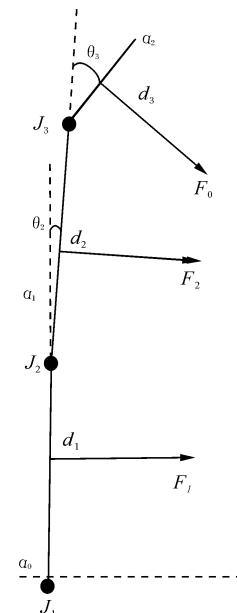


图 7 手指抓取示意图

Fig.7 A schematic diagram grab view of a finger

根据结构的几何关系,求得力臂的表达式为:

$$|J_1 \times F_i| = \begin{bmatrix} J_1 \times F_1 \\ J_1 \times F_2 \\ J_1 \times F_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 + a_1 \times \cos\theta_2 \\ d_3 + a_1 \times \cos\theta_3 + a_0 \times \cos(\theta_2 + \theta_3) \end{bmatrix}$$

$$|J_2 \times F_i| = \begin{bmatrix} J_2 \times F_1 \\ J_2 \times F_2 \\ J_2 \times F_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 - d_1 \\ d_2 \\ d_3 + a_1 \times \cos\theta_3 \end{bmatrix}$$

$$|J_3 \times F_i| = \begin{bmatrix} J_3 \times F_1 \\ J_3 \times F_2 \\ J_3 \times F_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (a_0 - d_1) \times \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_1 \times \cos\theta_2 \\ a_1 - d_2 \\ d_3 \end{bmatrix}$$

在抓取状态下所需的关节驱动力矩:

$$M_1 = (-F_1) \times d_1 + (-F_2) \times (d_2 + a_1 \times \cos\theta_2) + (-F_3) \times [d_3 + a_1 \times \cos\theta_3 + a_0 \times \cos(\theta_2 + \theta_3)]$$

$$M_2 = F_1 \times (a_0 + d_1) + (-F_2) \times d_2 + (-F_3) \times (d_3 + a_1 \times \cos\theta_3)$$

$$M_3 = F_1 \times [(a_0 - d_1) \times \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_1 \times \cos\theta_2] + F_2 \times (a_1 - d_2) + (-F_3) \times d_3$$

式中,  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  分别表示基座、中指节、远指节关节力矩;  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  分别表示基座、中指节、远指节的指节所受力;  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$  分别表示对应的力心位置;  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$  分别表示基座、中指节、远指节长度。

### 2.3 末端执行器的手指尺寸优化

为了进一步优化手指尺寸, 需要对机械手指抓取运动进行分析。评价的标准为机械手末端执行器的包络空间与樱桃谷鸭的内脏大小一致。因此, 优化的目标函数是使内脏体积与机械手包络空间的差值最小, 即  $\min(V_0 - V_1)$ 。其中  $V_0$  为樱桃谷鸭的内脏体积, 为计算方便将其简化为椭球体, 根据测得数据, 半轴长分别为 36.5、36.5、90.0 mm。 $V_1$  为机械手包络空间, 如图 8 所示。将  $V_1$  简化为  $V_2$ 、 $V_3$ 、 $V_4$  三部分体积之和。 $V_2$  是截面 1 与截面 2 之间的体积,  $V_3$  是截面 2 与截面 3 之间的体积,  $V_4$  是截面 3 与顶部之间的体积。如图 8 所示。

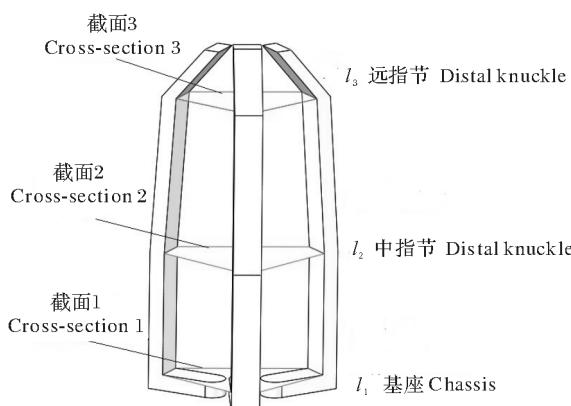


图 8 机械手状态

Fig.8 Manipulator state

优化的参数为基座长度  $l_1$ 、中指节长度  $l_2$ 、远指节长度  $l_3$ 、中指节旋转角度  $\theta_2$ 、远指节旋转角度  $\theta_3$ , 3 个手指的尺寸相同。优化的约束条件为 3 个远指节互不干涉, 即远指节的横向投影和不大于基座的横向尺寸; 中指节和远指节旋转角度不为负; 由于家禽腹腔内空间有限, 中指节的旋转角度不大于  $110^\circ$ , 远指节的旋转角度不大于  $90^\circ$ 。用 Matlab 对尺寸进行优化, 得到优化后的尺寸为  $l_1 = 85$  mm,  $l_2 = 85$  mm,  $l_3 = 41$  mm,  $\theta_2 = 4.5^\circ$ ,  $\theta_3 = 45.8^\circ$ 。此时末端执行器包络空间与内脏体积大致相等, 远指节三指指尖聚在一点, 即手指捏住鸭子喉管, 将内脏包络抓取。通过多次实验验证这种抓取姿态的内脏破损率最小, 因此, 当手指尺寸为上述参数时是最佳抓取状态。

### 2.4 末端执行器工作动作姿态设计

参考人工家禽净膛过程, 设计 3 种家禽净膛机械手末端执行器工作动作姿态, 完成家禽自动抓净膛。工作动作姿态(1)如图 9A 所示, 一方面为了保证多指机械手末端执行器能够较多地抓取家禽内脏, 另一方面为了克服机械手指之间的间距较小、分布空间窄小的缺点, 设计 3 个机械手指初始动作姿态为并排。机械手末端执行器以此状态从割肛的开口处插入家禽体腔内, 使得手指尽量沿着家禽体廓伸入。在机械手指抓取动作完成后, 舵机回转, 腱绳处于松弛状态, 在扭簧机械自动限位作用下, 使得手指上指节之间还原至外侧倾斜的状态。工作动作姿态(2)如图 9B 所示, 为了保证可以完整地抓取包络体腔内的目标对象, 设计末端执行器在插入家禽体腔一定深度位置后, 由电动机连接带动齿轮转动, 驱动两侧手指转动, 中间位置上的手指保持固定不动,

并使3个手指周向分布,形成较大抓取空间。工作动作姿态(3)如图9C所示,为了使目标对象被顺利地抓取出来,设计手指的抓取位姿为:舵机转动,通过滚筒拉动腱绳,由腱绳对手指各个指节施加的压力,克服扭簧对指节间连接部位作用的阻力矩,带动手指各指节同时进行弯曲运动。通过家禽净膛机械手末端执行器3个工作动作姿态的设计,该末端执行器可以较好地完成家禽净膛任务。

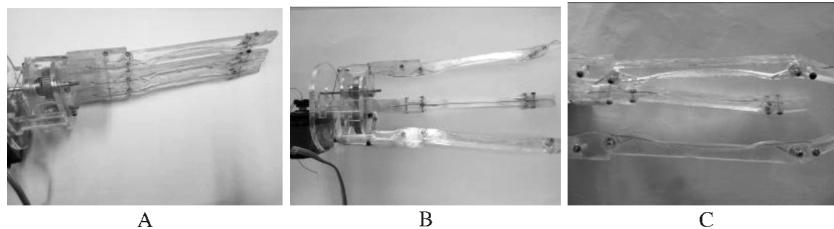


图9 机械手实际状态  
Fig.9 Manipulator actual state

### 3 讨 论

本研究根据自动家禽净膛要求和樱桃谷鸭的胴体尺寸大小,设计了三指三关节腱绳驱动手指弯曲和齿轮驱动手指转动的末端执行器。通过对外啮合齿轮传动使得手指相对转动,完成运动姿态的变换。该机械手末端执行器结构简单、合理,便于控制。对腱绳伸缩量与倾斜角之间的数值变化规律进行了分析,设计了机械手指的工作姿态,模拟了手指间的干涉情况,得出了最优倾斜角度。采用D-H参数法建立了末端执行器中单个手指的运动学模型,验证了所建立的机械手指模型的正确性与可行性。试验结果表明,该末端执行器能根据樱桃谷鸭的尺寸大小来变换姿态,满足抓取要求。在净膛过程中,要以家禽腹腔轮廓为边界,完成净膛机械手末端执行器运动轨迹,需要对家禽腹腔轮廓进行研究和分析。本研究采用三指式设计主要有三个方面原因:一是通过对人手对于内脏抓取过程的分析,发现该过程中主要是由拇指、食指、中指完成;二是家禽腹腔空间比较狭窄,受工作空间影响,所选取指数不能过多;三是考虑到下一步控制过程的相对简化。本研究对机械手末端执行器在抓取中所受力的理论关系和公式进行了研究分析,在后续的研究中需要针对具体对象,通过传感器获得准确全面的实际参数值,为下一步设计控制器提供精确的控制对象数学模型。在本研究基础上,还可进一步研究机械手末端执行器的加工材料,使其不仅满足抓取力要求,还能提高末端执行器的轻巧灵活性,增加净膛作业的成功率。

### 参 考 文 献

- [1] HEADERIKUS K, OOSTZAANN. Method and apparatus for eviscerating poultry: US, 5279517[P]. 1994-01-18.
- [2] 张奎彪.中国家禽屠宰加工技术及装备在“十二五”期间的发展目标[J].肉类工业,2011(3):8-11.
- [3] 潘金龙,叶金鹏,王子毅,等.2020年我国家禽屠宰技术装备发展战略[C]//2010年中国机械工程学会包装与食品分会学术年会(CMES)论文集.[s.l.]:中国机械工程学会包装与食品工程分会,2010:7.
- [4] 王丽红,阎楚良,叶金鹏,等.QNZ15型家禽自动取内脏机设计与试验[J].农业机械学报,2010,41(S1):220-224.
- [5] 王猛.夹取式家禽自动掏膛机械手结构和运动参数的研究[D].北京:中国农业机械化科学研究院,2014.
- [6] 邢东杰,张奎彪,张文辉.一种家禽自动掏膛机:CN201220566234.9[P].2013-06-19.
- [7] 马朋巍.扒取式家禽取内脏机械手结构及运动参数研究[D].北京:中国农业机械化科学研究院,2010.
- [8] 熊利荣,于阳,王树才.带有触觉系统的家禽屠宰净膛机械手的设计[J].华中农业大学学报,2016,35(6):142-146.
- [9] 王猛,李阳阳,叶金鹏.家禽自动掏膛机械手的发展和应用现状[J].农产品加工(学刊),2014(5):62-64.
- [10] 马朋巍,王丽红,叶金鹏,等.家禽自动取内脏技术及装备在我国应用前景[J].农产品加工(学刊),2009(10):93-96.
- [11] 李欢.果蔬采摘机器人末端执行器的设计与研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2015.
- [12] CHI Y K, MIN C L, YOON S M, et al. A study for the dynamic system of coupled cable-driven structure in surgical robot instrument [C]//Ieee/asme International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. IEEE.[s.l.]: IEEE, 2011:339-343.
- [13] 刘世廉,周华平,马宏绪.一种新型仿人多指机械手的简易实现[J].控制工程,2003,10(s1):147-151.
- [14] 何艳涛.一种绳驱式欠驱动三指灵巧手的研究[D].哈尔滨:哈

哈尔滨工业大学,2014.

[15] JIANG J G, ZHANG Y D, SHU Z. Implementation of glass-curtain-wall cleaning robot driven by double flexible rope[J]. Industrial robot, 2014, 41(5): 429-438.

[16] LEE K M, LIU C H. Explicit dynamic finite element analysis of an automated grasping process using highly damped compliant fingers[J]. Computers & mathematics with applications, 2012, 64(5): 965-977.

## Design and kinematics analyses of manipulator end effector for eviscerated poultry

BAO Xiulan ZHANG Lei WANG Shucai

College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

**Abstract** An overall design principles and programs of the end effector of automatic evisceration for poultry was proposed and the structure of automatic evisceration for poultry with three fingers and three joints was designed for small operating space and flexible fetch features of the manipulator during eviscerating poultry. The manipulator uses tendon to drive fingers bent, the gear using a pair of external gear transmission makes fingers have relative rotation. The interference of the fingers was analyzed and the knuckle inclined chamfering was optimaized. The model of the manipulator finger is established through homogeneous matrix transformation with Denavit-Hartenberg matrix (D-H method), and kinematic solutions for the manipulator fingers was conducted. The correctness and feasibility of the establishing model of manipulator finger was verified. It will provide theoretical basis and technical support for further studying automatic evisceration manipulator for poultry.

**Keywords** poultry; evisceration; manipulator; end effector

(责任编辑:陆文昌)