

文章编号: 2095-2163(2021)03-0048-04

中图分类号: TP24

文献标志码: A

# 用于肌肉电信号控制的仿生机械手设计与仿真

刘乐远, 闫炳成, 黄经纬, 李敏, 魏德轩

(上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620)

**摘要:** 针对肌肉电信号 (EMG) 控制假手的需求, 介绍了一种仿生机械手的设计和控制仿真。此机械手优势在于关节和手指尺寸完全还原真实人手的大小。首先, 在多自由度的基础上, 建立了五指的运动学模型并求出其运动学正解和逆解。然后, 通过仿真来验证其运动学解的正确性, 从而为仿生机械手的运动轨迹规划和进一步的控制提供了理论依据。最后, 简要说明了肌肉电信号如何实现对仿生机械手的运动控制。

**关键词:** 肌电信号; 仿生机械手; 运动学; 运动仿真

## Design and simulation of bionic manipulator for EMG control

LIU Leyuan, YAN Bingcheng, HUANG Jingwei, LI Min, WEI Dexuan

(School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**[Abstract]** Aiming at the demand of electromuscular signal (EMG) to control artificial hand, this paper introduces the design and control simulation of a bionic manipulator. This manipulator is mainly based on the design of fingers and joints, and it can complete a variety of gestures. The advantage is that the size of joints and fingers completely restore the size of real hands. Firstly, the kinematics model of the five fingers is established on the basis of multiple degrees of freedom and the kinematics forward solution and inverse solution are obtained. Then, the correctness of the kinematics solution is verified by simulation, which provides the theoretical basis for the motion trajectory planning and further control of the bionic manipulator. Finally, the paper briefly explains how to realize the motion control of the biomimetic manipulator by muscle electrical signal.

**[Key words]** EMG; bionic manipulator; kinematics; motion simulation

## 0 引言

随着科技的进步, 工业等方面的机械化飞速发展。其中, 机械手的应用越来越广泛。机械手的分类大致可分为工业用机械手和假肢用机械手。假肢用机械手又可叫做仿生机械手<sup>[1]</sup>, 近年来国内外学者对其的研究也日趋深入。如崔鹏等人<sup>[2]</sup>采用腱传动式仿生机械手取代了简单的夹具, 提高了末端执行器的适应性。南卓江等人<sup>[3]</sup>研发了一种质量轻且具有良好的柔顺性、灵巧性的仿生机械手。随着信号采集技术的日益发展, 通过采集到的生物电信号实现运动控制正成为一种趋势。如王宏等人<sup>[4]</sup>提出的一种基于肌肉电信号控制的假肢用机械手的设计, 为机械手控制问题提供了理论依据。刘帅等人<sup>[5]</sup>利用 ADAMS 软件建立仿生机械手的虚拟样机。李振浩等人<sup>[6]</sup>通过 ADAMS 进一步对仿生机械手进行运动学仿真分析。吕美凤等人<sup>[7]</sup>针对机械手运动过程中的运动轨迹进行了研究分析。而对于更多自由度的机械手研究, 适

合更加复杂的运动。侯歆岩<sup>[8]</sup>对 5R 机械臂进行坐标建模并确定其连杆参数。同样地, 周睿等人<sup>[9]</sup>也对一种 5 自由度机械手进行了运动学分析。陈珂等人<sup>[10]</sup>对六自由度机械手进行了 ANSYS 静力学仿真。王卫兵等人<sup>[11]</sup>对六轴机械手进行运动学分析, 并进行仿真实验。仿生机械手的设计和分析, 能够为后续的肌电输入控制做准备。

## 1 仿生机械手结构及参数

建立仿生机械手的模型, 拇指具有 2 个关节, 食指、中指、无名指、小指都具有 3 个关节。因此, 在 solidworks 中的机械手模型具有 14 个自由度。机械手结构简图如图 1 所示, 除拇指外其余四指均含有 3 个臂, 拇指含有 2 个臂, 以手掌对称轴与拇指轴线相交处建立机械手的世界坐标系  $xyz$ 。

在图 1 中,  $a, b, c$  分别为 20.785 mm、12.5 mm、39.131 5 mm,  $a$  为关节  $O_i$  在  $x$  方向距离世界坐标系的距离,  $b$  为四指间距离。具体参数见表 1。

**作者简介:** 刘乐远 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 生物电信号的采集及应用; 闫炳成 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 机械设计及应用; 黄经纬 (1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 生理信号的采集及分析; 李敏 (1996-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 硬件电路设计; 魏德轩 (1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 组合导航、惯性导航。

**通讯作者:** 刘乐远 Email: 18120035836@163.com

收稿日期: 2020-11-09

表1 关节长度  
Tab. 1 The length of the joint

标记	$l_{11}$	$l_{12}$	$l_{13}$	$l_{21}$	$l_{22}$	$l_{23}$	$l_{31}$
长度/mm	19.728	19.728	21.228	27.478	27.478	23.728	32.478
标记	$l_{32}$	$l_{33}$	$l_{41}$	$l_{42}$	$l_{43}$	$l_{51}$	$l_{52}$
长度/mm	32.478	28.728	24.978	24.978	21.228	19.728	23.728

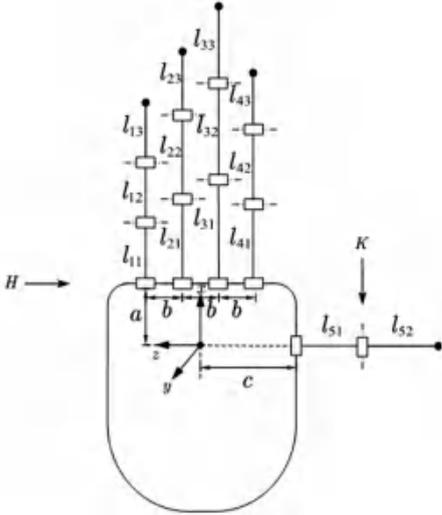


图1 机械手简化模型图

Fig. 1 Simplified model diagram

## 2 运动学分析

由于除拇指外其余四指的运动学具有相似性,因此先对四指进行运动学分析。利用图1机械手在H方向视图,可将四指简化为如图2所示的结构,其中 $O_i(i=1\sim 4)$ 分别为四指与手掌的连接关节,角度为 $\theta_{i1}(i=1\sim 4)$ , $A_i$ 和 $B_i(i=1\sim 4)$ 分别为四指中间的两关节,角度分别为 $\theta_{i2}$ 和 $\theta_{i3}(i=1\sim 4)$ , $C_i(i=1\sim 4)$ 分别为四指的指尖,以各个关节及指尖分别建立坐标系,如图2所示。

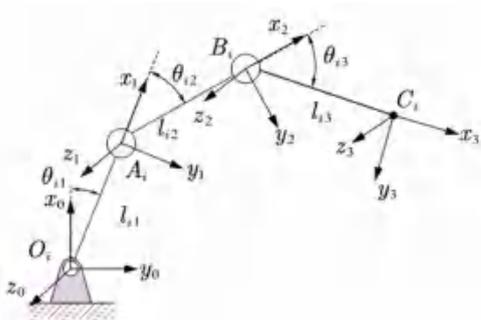


图2 四指简化模型

Fig. 2 Simplified model of four fingers

在世界坐标系下 $O_i(i=1\sim 4)$ 的坐标如下:

$$O_i(a, 0, (5-2i)b/2), \quad i=1, 2, 3, 4, \quad (1)$$

通过D-H参数计算方法获得机械手四指D-H参数表,见表2。

表2 四指D-H参数表

Tab. 2 The parameter of four fingers

标号	$a_i$	$\alpha_i$	$d_i$	$\theta_i$
0	$a$	0	$(5-2i)b/2$	0
1	$l_{i1}$	0	0	$\theta_{i1}$
2	$l_{i2}$	0	0	$\theta_{i2}$
3	$l_{i3}$	0	0	$\theta_{i3}$

由坐标系0到世界坐标系、坐标系1到0的变换矩阵 $T_{i0}$ 、 $T_{i1}$ 为:

$$T_{i0} = \begin{bmatrix} \hat{e}_1 & 0 & 0 & a & \dot{u} \\ \hat{e}_0 & 1 & 0 & 0 & \dot{u} \\ \hat{e}_0 & 0 & 1 & (5-2i)b/2 & \dot{u} \\ \hat{e}_0 & 0 & 0 & 1 & \dot{u} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$T_{i1} = \begin{bmatrix} \hat{e}_1 c\theta_{i1} & -s\theta_{i1} & 0 & l_{i1}c\theta_{i1} & \dot{u} \\ \hat{e}_1 s\theta_{i1} & c\theta_{i1} & 0 & l_{i1}s\theta_{i1} & \dot{u} \\ \hat{e}_0 & 0 & 1 & 0 & \dot{u} \\ \hat{e}_0 & 0 & 0 & 1 & \dot{u} \end{bmatrix}$$

同理,可求得坐标系1-0、2-1、3-2的变换矩阵 $T_{i1}$ 、 $T_{i2}$ 、 $T_{i3}$ ,其中 $s\theta_i = \sin(\theta_i)$ , $c\theta_i = \cos(\theta_i)$ 。由此,可获得坐标系3至坐标系0的变换矩阵 $T_{S2}$ ,如式:

$$T_{S2} = T_{i0}T_{i1}T_{i2}T_{i3}, \quad i=1, 2, 3, 4, \quad (3)$$

因此,四指指尖末端的坐标 $(x_i, y_i, z_i)$ 与各关节的数学关系为:

$$\begin{cases} x_i = a + l_{i1}c\theta_{i1} + l_{i2}c(\theta_{i1} + \theta_{i2}) + l_{i3}c(\theta_{i1} + \theta_{i2} + \theta_{i3}); \\ y_i = l_{i1}s\theta_{i1} + l_{i2}s(\theta_{i1} + \theta_{i2}) + l_{i3}s(\theta_{i1} + \theta_{i2} + \theta_{i3}); \\ z_i = (5-2i)b/2, \quad i=1, 2, 3, 4. \end{cases} \quad (4)$$

由于四指每个均有3个关节,若获得指尖的坐标 $(x_i, y_i, z_i)$ ,并给出其中一个关节角度,则可求解,且由于是仿生机械手,各关节角度需满足 $\theta_{ik} \geq 0, (i=1, 2, 3, 4, k=1, 2, 3)$ 。若给定 $\theta_{i1}$ ,利用几何关系,求解得到 $A_i$ 点坐标为:

$$\begin{cases} A_{ix} = a + l_{i1}c\theta_{i1}; \\ A_{iy} = l_{i1}s\theta_{i1}; \\ A_{iz} = (5 - 2i)b/2. \end{cases} \quad (5)$$

则可求得  $\theta_{i2}$  和  $\theta_{i3}$ , 即:

$$\begin{cases} l_{A_iC_i} = \sqrt{(x_i - A_{ix})^2 + (y_i - A_{iy})^2}; \\ \theta_{i2} = \pi/2 - \arccos \frac{a^2 + l_{A_iC_i}^2 - l_{i3}^2}{2l_{i2}l_{A_iC_i}} - \theta_{i1} - \arctan \frac{a - A_{ix}}{y_i - A_{iy}}; \\ \theta_{i3} = \pi - \arccos \frac{a^2 + l_{i3}^2 - l_{A_iC_i}^2}{2l_{i2}l_{i3}}. \end{cases} \quad (6)$$

利用机械手在  $K$  方向视图, 可得拇指简化图, 如图 3 所示。在世界坐标系下  $O_5$  的坐标为  $(0, 0, -c)$ 。其中,  $O_5$  表示拇指与手掌的连接关节,  $\theta_{51}$  表示角度,  $A_5$  表示拇指中间关节,  $\theta_{52}$  表示角度,  $B_5$  表示拇指的指尖, 以各个关节及指尖分别建立坐标系。通过  $D-H$  参数计算方法获得拇指  $D-H$  参数表, 见表 3。

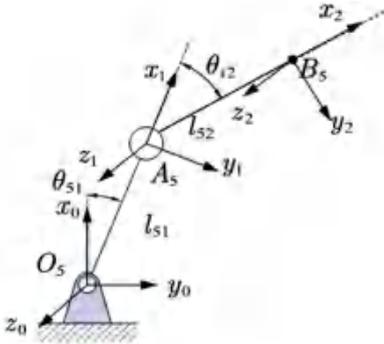


图 3 拇指简化模型

Fig. 3 Simplified model of the thumb

表 3 拇指  $D-H$  参数表

Tab. 3 The parameter of the thumb

标号	$a_i$	$\alpha_i$	$d_i$	$\theta_i$
1	$l_{i1}$	0	0	$\theta_{i1}$
2	$l_{i2}$	0	0	$\theta_{i2}$

由坐标系 1 到 0, 2 到 1 的变换矩阵  $T_{51}$ 、 $T_{52}$  为:

$$\begin{aligned} T_{51} &= \begin{pmatrix} c\theta_{51} & -s\theta_{51} & 0 & l_{51}c\theta_{51} \\ s\theta_{51} & c\theta_{51} & 0 & l_{51}s\theta_{51} \\ \hat{e} & 0 & 1 & 0 \\ \hat{e} & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \\ T_{52} &= \begin{pmatrix} c\theta_{52} & -s\theta_{52} & 0 & l_{52}c\theta_{52} \\ s\theta_{52} & c\theta_{52} & 0 & l_{52}s\theta_{52} \\ \hat{e} & 0 & 1 & 0 \\ \hat{e} & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (7)$$

由坐标系 0 到世界坐标系的变化  $T_{50}$  为:

$$T_{50} = Rot(y) Trans(x, y, z) = \begin{pmatrix} \hat{e} & 0 & 1 & 0 \\ \hat{e} & 0 & 1 & 0 \\ \hat{e} & -1 & 0 & 0 \\ \hat{e} & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{u} \\ \hat{u} \\ -c \\ \hat{u} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

由此, 可获得拇指坐标系 2 至世界坐标系的变换矩阵  $T_{mz}$  为:

$$T_{mz} = T_{50} T_{51} T_{52}. \quad (9)$$

因此, 拇指指尖末端的坐标  $(x_{51}, y_{51}, z_{51})$  与各关节的数学关系为:

$$\begin{cases} x_{51} = 0; \\ y_{51} = l_{51}s\theta_{51} + l_{52}s(\theta_{51} + \theta_{52}); \\ z_{51} = -l_{51}c\theta_{51} - l_{52}c(\theta_{51} + \theta_{52}) - c. \end{cases} \quad (10)$$

若获得拇指指尖坐标  $(x_5, y_5, z_5)$ , 则可求得  $\theta_{52}$  和  $\theta_{53}$ , 即:

$$\begin{cases} l_{O_5B_5} = \sqrt{(y_5 - O_{5y})^2 + (z_5 - O_{5z})^2}; \\ \theta_{51} = \arctan \frac{a - O_{iy}}{z_i - O_{iz}} - \arccos \frac{a^2 + l_{O_5B_5}^2 - l_{52}^2}{2l_{51}l_{O_5B_5}}; \\ \theta_{52} = \pi - \arccos \frac{a^2 + l_{52}^2 - l_{O_5B_5}^2}{2l_{51}l_{52}}. \end{cases} \quad (11)$$

### 3 仿真实验

在 Matlab 中导入 solidworks 建立的仿生机械手模型, 会生成简单的各个关节和指节的 Simulink 代码。如果想要进行复杂的手势运动需要添加激励源, 为了验证各个手指的逆运动学方程的正确性, 给出关节角度, 仿生机械手会执行并运动到特定的关节, Simulink 设计如图 4 所示。

人手的运动是一个持续的过程, 因此需要仿真出机械手运动的过程。设置一个函数使手势做出动态的变化, 从五指弯曲到食指伸直, 关节角度随时间变化, 最终手势如图 5 所示。

本文设计的仿生机械手主要是为了结合肌电信号实现手势还原。首先人体手臂做出特定手势, 然后肌电采集设备采集肌电信号 (EMG) 到上位机, 上位机通过 Matlab 处理数据并执行分类算法, 识别出实际手势, 并通过仿真还原出手势。控制流程如图 6 所示。

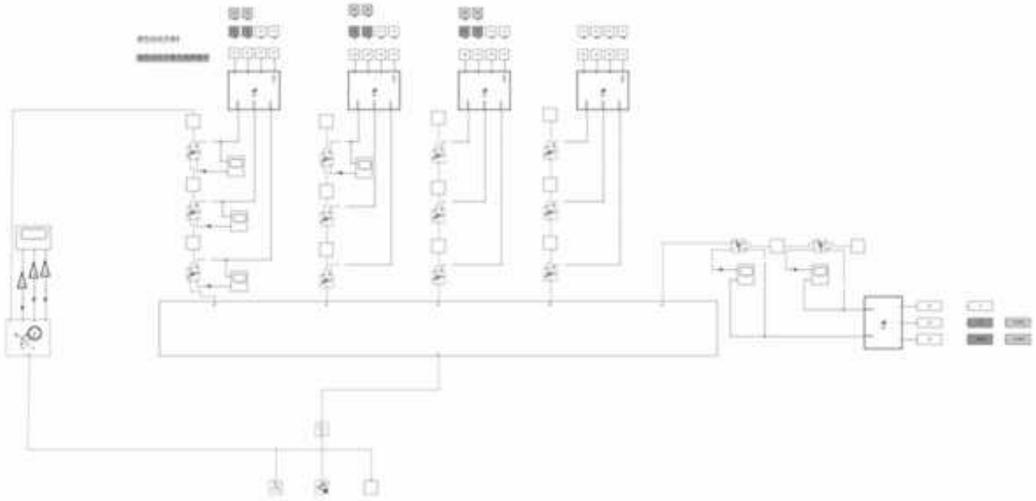


图 4 Simulink 设计图

Fig. 4 The design of Simulink

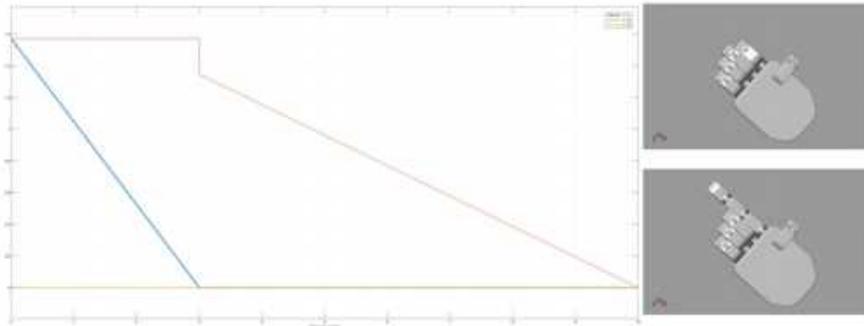


图 5 关节角度变化及动态手势

Fig. 5 Joint angle change and dynamic gesture diagram

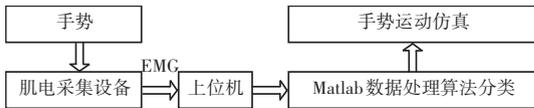


图 6 控制流程图

Fig. 6 Control flow chart

### 4 结束语

本研究以肌电控制假手的需求为背景,设计了一种多自由度仿生机械手,并进行了运动学分析和动态仿真。首先,参照实际人手设计出一种 14 自由度的机械手,并设置好各个关节参考坐标系,对每个手指进行正逆运动学分析。然后,为了方便肌电信号的数据处理和接口对接,采用 Matlab 对仿生机械手进行导入和仿真设计,实现了机械手的仿真模型建立和手势控制。最后,给出实际信号如何控制机械臂仿真模型的流程,为后续肌肉电信号控制仿生机械臂提供了充足的理论和实验准备。

### 参考文献

[1] CUI Yujie, HUA Jianning. Kinematics analysis and simulation of a

4-DOF manipulator[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 44-47: 656-660.

[2] 崔鹏, 陈志, 张小超. 苹果采摘机器人仿生机械手静力学分析与仿真[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2): 149-153.

[3] 南卓江, 杨扬, 铃森康一, 等. 基于细径 McKibben 型气动人工肌肉的仿生手研发[J]. 机器人, 2018, 40(3): 321-328.

[4] 王宏, 姬彦巧, 赵长宽, 等. 基于肌肉电信号控制的假肢用机械手的设计[J]. 东北大学学报, 2006, 27(9): 1018-1021.

[5] 刘帅, 孟岩. 仿生机械手的设计与仿真分析[J]. 现代制造技术与装备, 2019(12): 70-72.

[6] 李振浩, 管声启, 肖旭, 等. 一种新型的仿生机械手结构设计与运动学仿真[J]. 西安工程大学学报, 2020, 34(5): 56-62.

[7] 吕美凤, 钱玮. 基于 MATLAB 的六自由度机械手的运动分析与仿真[J]. 农业装备与车辆工程, 2018, 56(7): 67-69.

[8] 侯歆岩. 五自由度机械手运动学分析与仿真研究[J]. 黑龙江科学, 2020, 11(16): 28-29.

[9] 周睿, 李淑颖, 汪义博, 等. 一种 5 自由度机械手的运动学分析[J]. 工具技术, 2020, 54(8): 45-49.

[10] 陈珂, 冯卓群, 杨俊, 等. 一种六自由度机械手的结构设计[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(1): 138-140.

[11] 王卫兵, 张冀, 徐倩. 一种六轴焊接机械手运动学分析[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2019, 24(6): 125-131.