

气动人工肌肉驱动的柔性仿生肩关节 结构与优化

李芳^a, 吴阳^b, 刘凯^b

(南京航空航天大学 a. 金城学院; b. 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要:根据人体肩关节的特点设计了一种气动人工肌肉驱动的柔性仿生肩关节,推导出该仿生关节的逆运动学模型;以仿生关节最小输出转矩、气动人工肌肉输出力模型以及最大收缩率作为约束条件,以仿生关节运动范围最大为目标函数,利用遗传算法对该仿生关节的多个结构参数进行优化设计。优化结果表明,优化后的关节运动范围明显增大,有效提高了该仿生关节的灵活性。

关键词:气动人工肌肉(PAM);结构优化;肩关节

中图分类号:TH113 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2019)05-0140-03

Design and Optimization of Flexible Bionic Shoulder Joint Driven by Pneumatic Artificial Muscle

LI Fang^a, WU Yang^b, LIU Kai^b

(a. Jincheng College; b. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: According to the characteristics of human shoulder joint, a kind of flexible bionic shoulder joint is designed, and the inverse kinematic model of the bionic joint is derived. With the minimum output torque, the output force model and the maximum contraction ratio of the pneumatic artificial muscle as the constraint conditions and the maximum range of the bionic joint motion as the objective function, the genetic algorithm is used to optimize the structure parameters of the bionic joint. Experiment results show that the range of the joint motion after the optimization is obviously increased and its flexibility is improved greatly.

Keywords: pneumatic artificial muscle (PAM); structure optimization; shoulder joint

0 引言

作为仿生机器人的一类,人形机器人的研究最为活跃,由其衍生而来的仿生关节的研究,更受国内外学者的青睐。侯雨雷^[1]等人基于3-RRR 3自由度球面并联机构,提出了两种改进的可应用于人形机器人肩关节、髋关节的过约束四支链仿生关节机构。应申舜^[2]等人提出了一种基于人工肌肉的新型驱动关节设计方法,并将其应用于四足机器人髋关节的设计中。

作为一种新型驱动器,气动人工肌肉(PAM)具有高功率/体积比和较好的柔顺性,越来越多地被用作仿生关节的驱动器。与串联机构相比,并联机构具有刚度大、结构稳定、承载能力强、累积误差小、运动惯性小、运动学反解易求和便于实时控制等优点^[3]。因此,本文提出了一种气动人工肌肉驱动的柔性仿生肩关节。关节的工作空间是评价其性能的重要指标,本文采用遗传算法对该仿生肩关节进行结构优化,以增大其工作空间。遗传算法(GA)是一种基于自然界生物进化理论的优化、搜索和学

习技术,其仿造生物界和自然界的自然选择与遗传机理,通过竞争使种群进化,一代代改变一个变量群体的质量,从而追求问题解的总体合理性。基于遗传算法的工作空间优化问题,逐渐成为各类机器人优化的重要一环。吴生富^[4]等人对6-SPS并联机器人的工作空间进行了研究,并对工作空间各截面进行了分析,讨论了扩大工作空间的几种途径。陈在礼^[5]等人利用遗传算法优化6自由度空间并联机器人的机构参数,满足给定工作空间,使结构变得紧凑。

1 肩关节的机构构型与运动学分析

1.1 构型分析

人体肩关节由肱骨头与肩胛骨的关节盂构成,是典型的球窝关节。作为典型的少自由度并联机构之一,3自由度并联机构的结构、运动状态和特性与人体的肩关节非常相似,非常适合人形机器人的肩关节原型机构^[6]。

3自由度转动并联机构主要由末端执行器、大运动平

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51405229);江苏省自然科学基金资助项目(BK20151470)

作者简介:李芳(1979—),女,江苏淮安人,副教授,硕士,主要研究方向为仿生机器人、机电一体化。

通信作者:吴阳(1994—),男,江苏泰州人,硕士,主要研究方向为仿生机器人控制。

台、小运动平台、气动人工肌肉、固定杆和固定平台等组成。其中,大运动平台和小运动平台分别由伸缩长度为100 mm和48 mm两组气动人工肌肉作为伸缩移动副来驱动。图1为仿生肩关节机构简图,固定平台与大平台通过3根气动人工肌肉 PMA_i ($i=1-3$)及球面副 (O_2)连接,3根气动人工肌肉两端的球面副均匀分布在固定平台 A_i ($i=1-3$)和大运动平台 B_i ($i=1-3$)上, A_i 位于半径为 R_A 的圆上, B_i 位于半径为 R_B 的圆上,在固定平台上建立固定坐标系 $O_1x_1y_1z_1$,原点位于固定平台的中心 O_1 , O_1x_1 轴指向 A_1 ,在小运动平台球面副上建立它的坐标系 $O_2x_2y_2z_2$,原点位于球面副 O_2 的中心, O_2x_2 与 O_4b_1 平行, O_4 位于大运动平台的中心。小运动平台与大运动平台的相互转动是通过 PMA_4 和 PMA_5 驱动,这两根气动人工肌肉两端的球面副对称分布在两平台上, B_4 、 B_5 通过半径 R_B , C_1 、 C_2 通过的半径 R_C , O_1O_2 距离为 L , O_2O_4 距离为 l , O_2O_3 距离为 b 。其中小运动平台与末端执行器垂直固接于杆 O_2O_4 上, O_1O_2 杆垂直固接于固定平台。

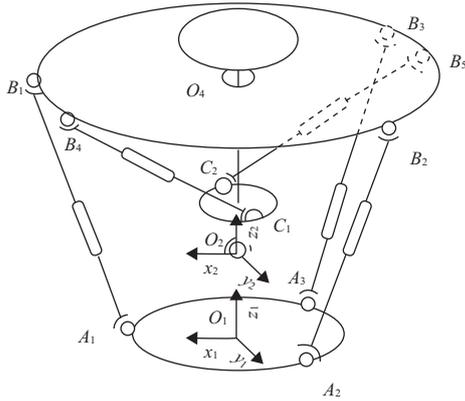


图1 3自由度转动并联机构简图

1.2 运动学分析

求此并联机构的运动学逆解,即为已知运动平台的转动角度,求解各气动人工肌肉的长度。

固定坐标系 $O_1x_1y_1z_1$ 中, A_1 、 A_2 、 A_3 在的齐次坐标分别表示为 P_{Ai} ($i=1,2,3$)。小运动平台坐标系 $O_2x_2y_2z_2$ 中, B_1 、 B_2 、 B_3 在的齐次坐标为 P_{Bi} ($i=1,2,3$)。取 z - y - x 型欧拉角 (α 、 β 、 γ)表示小运动平台姿态相对于自身的转动,首先小运动平台坐标系 $O_2x_2y_2z_2$ 绕 O_2z_2 转动 α ,然后绕 O_2y_2 转动 β ,最后 O_2x_2 转动 γ ,从 $O_2x_2y_2z_2$ 到固定坐标系 $O_1x_1y_1z_1$ 变换矩阵可表示为:

$$T = \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\beta & \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma - \sin\alpha\cos\gamma & \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma + \sin\alpha\sin\gamma & 0 \\ \sin\alpha\cos\beta & \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma + \cos\alpha\cos\gamma & \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma - \cos\alpha\sin\gamma & 0 \\ -\sin\beta & \cos\beta\cos\gamma & \cos\beta\sin\gamma & L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

由于限制大运动平台绕 O_1z_1 的旋转, $\alpha=0$ 带入式中得:

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta\cos\gamma & \sin\beta\sin\gamma & 0 \\ 0 & \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ -\sin\beta & \cos\beta\cos\gamma & \cos\beta\sin\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

3根气动人工肌肉 PMA_1 、 PMA_2 、 PMA_3 向量可以表示为: $L_{PMA_i} = {}^1_2TP_{Bi} - P_{Ai}$ ($i=0,1,2,3$)

气动人工肌肉 PMA_1 、 PMA_2 、 PMA_3 长度 L_1 、 L_2 、 L_3 可以表示为:

$$L_i = |{}^1_2TP_{Bi} - P_{Ai}| \quad (i=0,1,2,3) \quad (3)$$

设 B_4 、 B_5 所在平面到 O_2 的距离为 l ,则 B_4 、 B_5 在小平台运动坐标系 $O_2x_2y_2z_2$ 中的坐标为: $P_{B4} = (0 \ -R_B \ l \ 1)^T$, $P_{B5} = (0 \ R_B \ l \ 1)^T$

设 θ 为 O_2c_1 和 O_2y_2 所夹锐角, m 为 C_1 、 C_2 所在平面与 O_2 的距离, C_1 、 C_2 在小运动平台坐标系 $O_2x_2y_2z_2$ 中的坐标为: $P_{C1} = (R_C\sin\theta \ R_C\cos\theta \ m \ 1)^T$, $P_{C2} = (-R_C\sin\theta \ -R_C\cos\theta \ m \ 1)^T$ 。其中: θ_0 为 O_2C_1 和 O_2y_2 所夹初始角度, θ 与 θ_0 和 α 之间满足如下关系: $\theta = \theta_0 - \alpha$ 。

所以,气动人工肌肉 PMA_4 和 PMA_5 的长度可以表示为:

$$l_i = |P_{Bi} - P_{Ci}| \quad (i=1,2) \quad (4)$$

1.3 力矩分析

可以求得控制大平台运动的3根气动人工肌肉的单位向量分别为:

$$l_{PMA_i} = \frac{L_{PMA_i}}{|L_{PMA_i}|} \quad (i=1,2,3) \quad (5)$$

根据3根气动人工肌肉的收缩力模型,可知各气动人工肌肉的收缩力向量为:

$$F_{PMA_i} = f_{PMA_i} l_{PMA_i} \quad (i=1,2,3) \quad (6)$$

其中: f_{PMA_i} ($i=1,2,3$)分别表示气动人工肌肉的收缩力大小, F_{PMA_i} 分别表示3根气动人工肌肉收缩力在固定坐标系中的向量。

将向量 O_2B_1 、 O_2B_2 、 O_2B_3 计为 $L_{O_2B_1}$ 、 $L_{O_2B_2}$ 、 $L_{O_2B_3}$,可以通过坐标变换求得:

$$L_{O_2B_i} = {}^1_2TP_{B_i} - P_{O_2} \quad (i=1,2,3) \quad (7)$$

其中: P_{O_2} 为 O_2 在固定坐标系 $O_1x_1y_1z_1$ 坐标, $P_{O_2} = (0 \ 0 \ L)^T$ 。由式(6)和式(7)可求得3根气动人工肌肉绕 O_2 点产生的力矩:

$$T_{PMA_i} = F_{PMA_i} \times L_{O_2B_i} \quad (8)$$

$$\text{若令: } \begin{cases} F_{PMA_1} = (F_{1x} & F_{1y} & F_{1z})^T \\ L_{O_2B_1} = (L_{1x} & L_{1y} & L_{1z})^T \end{cases}$$

则 T_{PMA_1} 可以表示为:

$$T_{PMA_1} = \{ (T_{PMA_1})_x \quad (T_{PMA_1})_y \quad (T_{PMA_1})_z \}^T = \left\{ \begin{array}{c} \left| \begin{array}{cc} F_{1y} & F_{1z} \\ L_{1x} & L_{1z} \end{array} \right| \quad \left| \begin{array}{cc} F_{1x} & F_{1z} \\ L_{1x} & L_{1z} \end{array} \right| \quad \left| \begin{array}{cc} F_{1x} & F_{1y} \\ L_{1x} & L_{1y} \end{array} \right| \end{array} \right\}^T =$$

$$(F_{1y}L_{1z} - F_{1z}L_{1y} \quad F_{1z}L_{1x} - F_{1x}L_{1z} \quad F_{1x}L_{1y} - F_{1y}L_{1x})^T$$

同理, T_{PMA_2} 和 T_{PMA_3} 可以通过该式计算出来。

2 肩关节的工作空间优化

为了便于直观地表达并联机构的机构参数对姿态空间的影响,把一定步长内搜索到的符合要求的姿态空间点数 N 作为其机构工作空间的评价指标^[7]。点数 N 越多,说明机构所能达到的姿态角度越大,即工作空间越大。

根据并联机构的驱动特性,气动人工肌肉的收缩率是影响姿态角大小的关键约束。由试验可知,气动人工肌肉

的伸缩率最大可达 25%。设 L_i 表示 B_i 与 A_i 之间的距离 ($i=1,2,3$), l_i 表示 B_i 与 C_i 之间距离 ($i=1,2$), 考虑气动人工肌肉两端长度和球铰安装长度, 所以气动人工肌肉驱动长度 L_i 和 l_i 满足如下关系:

$$\begin{aligned} L_{\min} &\leq L_i \leq L_{\max} \quad (i=1,2,3) \\ l_{\min} &\leq l_i \leq l_{\max} \quad (i=1,2) \end{aligned} \quad (9)$$

由机构构型可知, 为避免人工肌肉与小运动平台干涉并使人工肌肉能发挥最大伸缩量, 小运动平台的半径 R_C 和固定平台半径 R_A 与大运动平台的半径 R_B 满足如下关系:

$$R_A < R_B, R_C < R_B \quad (10)$$

在运动过程中, 大运动平台、末端执行器和负载的重力对机构有一负载力矩, 为克服此力矩, 存在气动人工肌肉驱动的最小输出力矩:

$$\begin{aligned} \mathbf{g}(L \ l \ R_A \ R_B \ R_C \ m \ \theta_0) = \\ \begin{bmatrix} (T_{PMA1})_x + (T_{PMA2})_x + (T_{PMA3})_x - M_x \\ (T_{PMA1})_y + (T_{PMA2})_y + (T_{PMA3})_y - M_y \\ (T_{PMA1})_z + (T_{PMA2})_z + (T_{PMA3})_z - M_z \end{bmatrix} > 0 \end{aligned} \quad (11)$$

根据前述机构的构型分析, 确定 3 自由度转动并联机构待优化结构参数初值如下:

$$\mathbf{X} = (L \ l \ R_A \ R_B \ R_C \ m \ \theta_0)^T = (59 \ 89 \ 23 \ 128 \ 17 \ 40 \ 31.5)^T$$

图 2 分别为 3 自由度转动并联机构姿态工作空间内部点集数量 N 随 $L, l, R_A, R_B, R_C, m, \theta_0$ 的变化图, 可以发现并联机构的结构参数对工作空间有很大的影响, 所以有必要对机构参数进行优化。

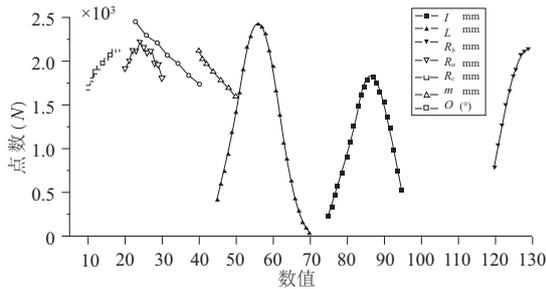


图 2 各参数对姿态空间的影响曲线图

确定 3 自由度转动并联机构待优化结构参数变化范围如下:

$$\begin{cases} 40 \leq L \leq 100, & 80 \leq l \leq 150 \\ 20 \leq R_A \leq 50, & 100 \leq R_B \leq 200 \\ 10 \leq R_C \leq 50, & 40 \leq m \leq 120, & 10^\circ \leq \theta_0 \leq 90^\circ \end{cases}$$

以机构的姿态空间最大化为优化目标, 利用 Matlab 编写程序, 经过 114 代的迭代计算得到遗传算法的寻优性能跟踪图如图 3 所示, 相应的机构参数优化值如表 1 所示。

对应于优化前后, 分别计算出 3 自由度转动并联机构姿态工作空间内点数 (N) 及工作空间绕固定轴 O_1x_1 、 O_1y_1 、 O_1z_1 的转角 γ, β, α 的大小。姿态工作空间内的点数 N 由优化前的 21 150 个增加到 70 824 个, γ 范围由 $-15^\circ \sim 15^\circ$ 扩大到 $-21^\circ \sim 21^\circ$, β 由 $-11^\circ \sim 15^\circ$ 扩大至 $-18^\circ \sim 18^\circ$, α 由 $-52^\circ \sim 0^\circ$ 扩大至 $-91^\circ \sim 0^\circ$ 。由此可见, 姿态工作空间点数增加了 234.9%, 工作空间明显增大。优化前后的姿态

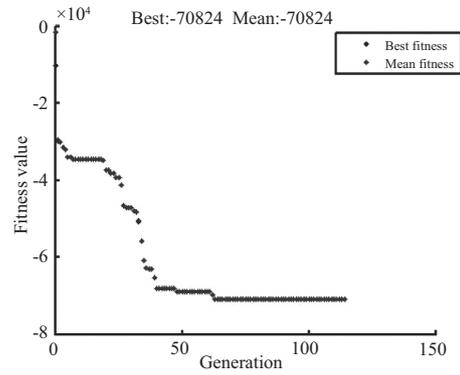


图 3 遗传算法寻优性能跟踪图

空间如图 4、图 5 所示。

绘制并联机构优化前后 $\gamma-\beta$ 平面、 $\beta-\alpha$ 平面、 $\gamma-\beta-\alpha$ 空间三维点图, 通过图 4 和图 5 的对比, 可以直观看出姿态工作空间明显增大, 并联机构的运动性能达到较大提高, 得到满意优化效果。

表 1 仿生肩关节机构参数优化值

参数	优化值
O_2 与固定平台之间距离(L)/mm	40.172
O_2 与操纵器之间距离(l)/mm	103.743
固定平台上虎克铰所在半径(R_A)/mm	20.142
大运动平台上虎克铰所在半径(R_B)/mm	128.261
小运动平台上虎克铰所在半径(R_C)/mm	10.911
C_1, C_2 所在平面与 O_2 的距离(m)/mm	43.411
O_2C_1 和 O_2y_2 所夹初始角度(θ_0)/(°)	11.6

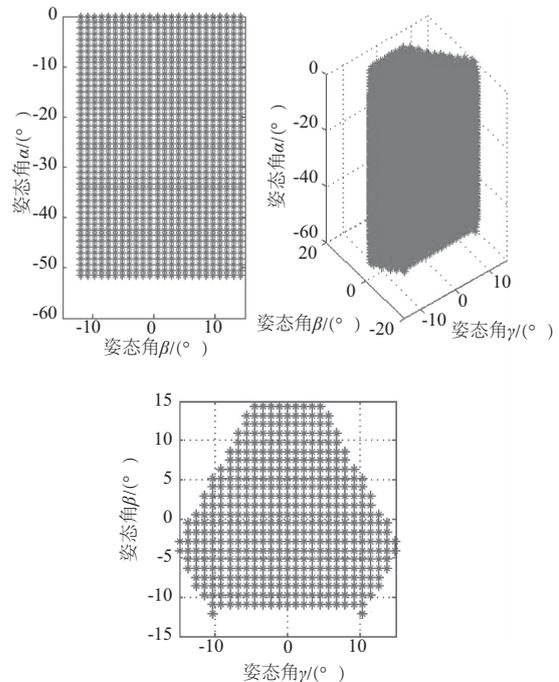


图 4 优化前姿态工作空间

(下转第 146 页)