

文章编号:1671-6833(2005) 04-0081-04

气动人工肌肉驱动的类人关节研究

赵怀林^{1,2}, 李 果², 余达太²

(1. 郑州大学物理工程学院, 河南 郑州 450052; 2. 北京科技大学信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: McKibben 气动人工肌肉是一种由气压激励的运动引擎, 它可以输出足够的拉力, 并具有一定的柔顺性. 建立了一个新的机器人肘关节, 关节结构由人类肘关节演变而来, 由两条对抗设置的 McKibben 气动人工肌肉驱动, 肌肉对的伸缩运动导致关节旋转; 分析和计算了关节角度和人工肌肉收缩长度间的关系, 以及最大旋转角的几种可能情形, 推导出最大可能旋转角度, 讨论了关节结构参数对最大旋转角度的影响, 并把该机器人关节和人类关节进行了比较.

关键词: 气动人工肌肉; 类人关节; 关节角度

中图分类号: TH 138. 5 **文献标识码:** A

0 引言

最近若干年, McKibben 型气动人工肌肉在机器人领域的应用已经展开^[1~4]. McKibben 气动人工肌肉由内层气囊和外层织物构成, 当内层封闭气囊受压膨胀, 织物外层跟着膨胀, 拉拽两端缩短人工肌肉, 有点像人或动物的肌肉收缩一样. 它可以产生足够的力, 同时还具有适当的柔顺性^[3, 4], 由它作为驱动器时天生地会产生像动物一样的动作, 所以它可以作为机器人的驱动器并可能使机器人去执行一些“环境友好”的任务, 例如病人护理工作等. McKibben 气动人工肌肉只能产生单向力——拉力, 即在受压时收缩同时输出拉力, 所以一般要成对使用, 进行对抗设置.

McKibben 人工肌肉在机器人领域的应用主要是将其作为动作驱动器, 用于机器人的手臂或行走机器人的下肢等关节, 例如 Shadow Robot 公司的双足机器人 Illinois 大学的柔臂机器人. 在所有被用作机器人驱动器的例子当中, 均是使用两个同样尺寸的气动人工肌肉通过旋转轮对抗设置, 二肌肉的物理位置也对称, 旋转轮即为关节, 二肌肉驱动旋转轮旋转, 如图 1 所示. 二气动肌肉的初始气压均为 P_0 , 为使关节旋转, 其中的气动肌肉之一增加气压 ΔP , 同时另一气动肌肉气压减少 ΔP .

我们构建了一个类人尺寸的机器人, 并用 McKibben 型气动人工肌肉来驱动关节. 课题的主要目标之一, 即是为开发病人、老年人或残疾人上下肢体障碍恢复或保健用品做前期研究, 例如人工助力衣服的开发, 使用滑轮是不可能的. 本课题创建了类似人体骨肉解剖结构的双足机器人, 创建了类人的关节结构, 它将呈现许多新的特点. 本论文重点针对机器人肘关节进行分析讨论.

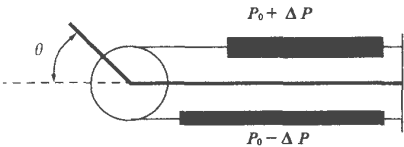


图 1 两相同尺寸气动肌肉互连驱动旋转轮
Fig. 1 Two same length pneumatic musdes connect with each other to actuate the pulley

1 类人肘关节

根据人肘解剖原理, 有多条肌肉与肘关节相连, 但主要由两条肌肉控制关节旋转, 它们是肱二头肌和肱三头肌. 肱二头肌在肘关节内侧, 肱三头肌在肘关节外侧. 肱二头肌收缩时关节弯曲, 肱三头肌收缩时关节平伸, 肱二头肌和肱三头肌也可同时收缩以保持关节稳定性^[5, 9].

收稿日期: 2005-06-06; 修订日期: 2005-08-25
基金项目: 国家自然科学基金项目(60174018)
作者简介: 赵怀林 (1964-), 男, 河南巩义人, 郑州大学副教授, 北京科技大学在读博士研究生, 主要从事机器人建模和控制方面的研究.

使用两条 McKibben 气动人工肌肉对抗设置, 分别模仿肱二头肌和肱三头肌来驱动人工肘关节, 两气动肌肉的激励气压分别调节, 它们的协调伸缩将决定关节的主要运动特征. 图 2 即为创建的机器人关节(括号中的符号代表相应长度).

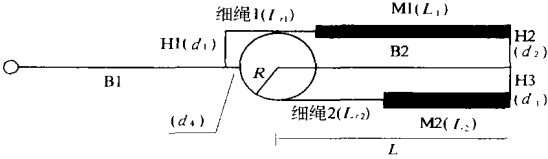


图 2 由一对气动人工肌肉驱动的类人关节侧面图
Fig. 2 A humanoid joint actuated by a pair of pneumatic artificial muscle

如图 2 示, 刚件 B1、B2 分别代表大臂骨和小臂骨, 与肘关节相连, 圆柱形的旋转体是 B1 的一端, 气动肌肉 M1 代表肱二头肌, 气动肌肉 M2 代表肱三头肌. M1 一端通过细绳 1 和刚件 H1 与 B1 连结, M2 一端通过细绳 2 与旋转柱面相连, M1 和 M2 的另一端分别通过刚件 H2 和 H3 与 B2 相连, 刚件 H2 和 H3 位于 B2 的相同位置处, 这样设置是为了简化结构. 关节可以伸直和向一侧弯曲. 由于实际上人的臂骨都有一定的粗细而不是一根细线, 用刚件 H1、H2、H3 及长度参数 d_1, d_2, d_3, d_4 来代表它们. R 为圆柱体半径, L 为从圆柱旋转轴到 H1 和 H2 与 B2 连结点的距离. 为简化结构, 设 $d_2=d_1, d_3=R$, 所以当关节伸直且 M1 和 M2 拉紧时, M1、M2 和 B2 是平行的.

当关节伸直时(定义这时的关节角为 $X=0$), M1 正好处在其自由长度(L_{10}), 这样的话它可能产生最大的收缩, M2 处在其最大收缩、即最短长度状态, 这样它可能有最大的伸展. 设置 $d_1=R$, $L_{10} \leq L-R$, 这样 M1 不会触及旋转柱体, 以保证结构精确, 对于 M2, 设置其自由长度与 M1 的相等, 所以 M2 也不可能触及旋转柱体.

对于关节结构, 所有可调整的参数为 R, d_4, L 和 L_0 , 并有下列关系:

$$d_1=d_2=d_3=R \tag{1}$$

$$L_{10}=L_{20}=L_0 \leq L-R \tag{2}$$

$$L_0+L_{r1}=L+R+d_4 \tag{3}$$

我们用 R_c 表示收缩率($R_c=(L_0-L_{\min})/L_0$), 应有以下关系成立:

$$L_{\min}=(1-R_c)L_0 \tag{4}$$

$$L_{2\min}=(1-R_c)L_0 \tag{5}$$

该关节除了可用作机器人肘关节外, 还可用于其膝关节, 因为膝关节与肘关节是相似的, 都属于一维旋转关节^[5,9].

2 关节角度和肌肉长度间的关系

为了控制关节角, 必须控制 M1 和 M2 的长度. 为此需要分析每条肌肉当前长度与关节角的关系:

$$L_i=F_i(X) \quad (i=1,2) \tag{6}$$

式中: L_i 表示 M1 或 M2 的长度; X 为关节角; F_i 表示 L_i 和 X 的函数关系.

首先来讨论 M2. 请参考图 3. 由于连接 M2 的绳子仅绕柱体圆周旋转, 容易得到以下关系:

$$L_2=RX+L_{2\min} \tag{7}$$

所以 L_2 与关节角之间的关系是线性的.

其次讨论 M1. 尽管 M1 的活动端也是绕着一个圆周旋转, 但 M1 的情况和 M2 的绝不相同, 在关节旋转过程中, 整个 M1 除了其固定端外都有上下位移, 所以 L_1 和 X 之间的关系将相对复杂.

图 3 可被用来作为参考, 建立 L_1 和关节角 X 之间的关系.

$$L_1=(L_{1b}^2+L_{1h}^2)^{1/2}-L_{r1} \tag{8}$$

$$L_{1b}=d \cos X+(R+d_4) \sin X-d_2 \tag{9}$$

$$L_{1h}=(R+d_4) \cos X-d \sin X+L \tag{10}$$

所以,

$$L_1=\{[d \cos X+(R+d_4) \sin X-d_2]^2+[(R+d_4) \cos X-d \sin X+L]^2\}^{1/2}-L_{r1} \tag{11}$$

结合式(1),

$$L_1=\{4[L(R+d_4)-R^2] \cos X-2R(L+R+d_4) \sin X+(R+d_4)^2+2R^2+L^2\}^{1/2}-L_{r1} \tag{12}$$

可以看出, L_1 和 X 的关系是非线性的.

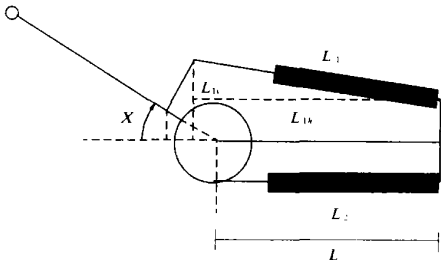


图 3 关节的屈曲
Fig. 3 Bending of the joint

3 最大旋转角

一个关节究竟能旋转多大程度是关节的一个重要指标, 应当分析和计算它.

旋转角的最大值有三种可能:其一是当 $M1$ 收缩并达到其最短长度时,记这个最大值为 X_{\max}' . 其二是当 $M1$ 收缩到一定程度且对旋转轴的力矩为 0 的时候 (见图 4), 这时关节角不能继续增大, 记这时的关节角为 X_{\max}'' . 第三种可能是当 $M2$ 首先伸展至其长度最大值时, 这时关节角也不能继续增大, 记相应的最大值为 X_{\max}''' . 所以, 实际的最大关节角为

$$X_{\max} = \min(X_{\max}', X_{\max}'', X_{\max}''') \quad (13)$$

第一种可能是当 $M1$ 达其最短长度时 (参考图 3), $L_1 = L_{\min} = (1 - R_c)L_0$, 根据式 (12), 有 $(1 - R_c)L_0 = \{ \sqrt{L(R + d_4)^2 - R^2 \cos^2 X_{\max}'} - 2R(L + R + d_4) \sin X_{\max}' + (R + d_4)^2 + 2R^2 + L^2} \}^{1/2} - L_{r1}$, 移 L_{r1} 到左边, 并同时两边平方, 整理后得:

$$\sqrt{L(R + d_4)^2 - R^2 \cos^2 X_{\max}'} - 2R(L + R + d_4) \sin X_{\max}' = ((1 - R_c)L_0 + L_{r1})^2 - (R + d_4)^2 - 2R^2 - L^2.$$

这是一个较复杂的方程, 一般得不到其解析解, 其实可以直接由图 3 并利用三角关系得到:

$$X_{\max}' = \pi - (\tan^{-1}(d_1/(R + d_4)) + \cos^{-1}(((d_{12} + (R + d_4)^2) + (L_2 + d_2^2) - (L_{r1} + L_{\min})^2) / (2d_1^2 + (R + d_4)^2)^{1/2} (L_2 + d_2^2)^{1/2})) + \tan^{-1}(d_2/L)) \quad (14)$$

结合式 (1),

$$X_{\max}' = \pi - (\tan^{-1}(R/(R + d_4)) + \cos^{-1}((2R^2 + (R + d_4)^2 + L_2 - (L_{r1} + L_{\min})^2) / (2(R^2 + (R + d_4)^2)^{1/2} (L_2 + R^2)^{1/2})) + \tan^{-1}(R/L)) \quad (15)$$

第二种可能性, 最大值 X_{\max}'' 的计算可参考图 4, 这时 $M1$ 对旋转轴的力矩为 0. 由图 4 可得:

$$X_{\max}'' = \pi - (\tan^{-1}(d_1/(R + d_4)) + \tan^{-1}(d_2/L)) \quad (16)$$

结合式 (1),

$$X_{\max}'' = \pi - (\tan^{-1}(R/(R + d_4)) + \tan^{-1}(R/L)) \quad (17)$$

上述两种可能性都是基于这样的前提, 即 $M2$ 可以伸展到一个很大的长度. 实际上由于收缩率的限制, 它从最短只能伸展一定的长度, 在关节弯曲过程中, 它可能首先伸展到其极限并阻止关节继续弯曲. X_{\max}''' 的计算较简单:

$$RX_{\max}''' = L_{2\max} - L_{2\min} = R_c L_0,$$

$$X_{\max}''' = \frac{R_c L_0}{R} \quad (18)$$

至此, 3 种可能的最大值都已求出, 注意比较

X_{\max}' 和 X_{\max}'' , 发现肯定有 $X_{\max}' \leq X_{\max}''$, 这意味着 X_{\max}'' 是由 $M1$ 产生的最大可能旋转角. 所以由式 (13) 可得

$$X_{\max} = \min(X_{\max}', X_{\max}''') \quad (19)$$

式中, X_{\max}' 和 X_{\max}''' 可分别用式 (15) 和式 (18) 来计算.

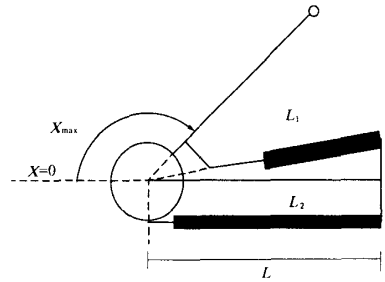


图 4 $M1$ 对旋转轴的力矩为 0 的时候
Fig. 4 When the moment of $M1$ is zero

4 讨论

4.1 参数变化对关节角度的影响

基于以上分析, 最大关节旋转角与结构参数 R, d_4, L 和两肌肉长度有关. 那么有问: 这些参数是如何影响最大关节旋转角的? 如何调节这些参数以满足所需的最大关节旋转角? 下面通过特例来讨论.

这里特例设定 $L_{r1} = 2R + d_4$, 所以式 (19) 将变成:

$$X_{\max} = \min(X_{\max}', X_{\max}''') = \min\{\pi - (\tan^{-1}(R/(R + d_4)) + \cos^{-1}(((R^2 + (R + d_4)^2) + (L^2 + R^2) - (2R + d_4 + (1 - R_c L_0))^2) / (2(R^2 + (R + d_4)^2)^{1/2} (L^2 + R^2)^{1/2})) + \tan^{-1}(R/L)), R_c L_0 / R\}.$$

用该公式计算不同参数值时的 X_{\max} 并制成表 1. 表 1 同时还指出了限制最大旋转角的支配因素.

从表 1 中可清楚地看出, 较小的 R 和较大的 L 将导致较大的旋转角最大值, 较小的 d_4 也会导致较大的旋转角最大值. 另外, 气动肌肉收缩率对旋转角最大值影响很大, 收缩率越大, 旋转角也会越大. 表 1 还显示, 所有限制旋转角最大值的支配因素均来自于 $M1$, 由关节结构分析可知, $M2$ 长度的变化可以全部贡献给关节角, 所以 $M2$ 可以导致更大的旋转角最大值, 这就是为什么所有的支配因素均来自于 $M1$ 而不是 $M2$. 总之, 较小的 R 、较小的 d_4 、较长的肌肉以及较大的收缩率将导致较大的旋转角.

表 1 不同参数值时的最大旋转角
Tab.1 The maximums of the joint angle with
different parameter values

| 结构参数/cm | | | $X_{\max} (^{\circ})$, 支配因素 | | |
|---------|-------|-----|------------------------------|-----------|-----------|
| R | d_1 | L | $R_e=0.2$ | $R_e=0.3$ | $R_e=0.4$ |
| 2 | 0 | 20 | 74.8, * | 129.3, ** | 129.3, ** |
| 2 | 0 | 10 | 37.5, * | 53.8, * | 70.5, * |
| 2 | 2 | 20 | 60.2, * | 83.5, * | 109.8, * |
| 2 | 2 | 10 | 33.1, * | 45.5, * | 56.8, * |
| 3 | 0 | 20 | 50.9, * | 74.9, * | 110.0, * |
| 3 | 0 | 10 | 23.4, * | 33.6, * | 43.32, * |
| 3 | 3 | 20 | 42.8, * | 58.5, * | 73.2, * |
| 3 | 3 | 10 | 21.8, * | 30.5, * | 38.4, * |

说明:1. * 表示 L_1 已缩至极限不能再短;2. ** 表示 M1 对旋转轴没有力矩输出.

4.2 与人类关节的比较

人有男女之分、肤色之别,这里仅比较关节角.由文献[7],成人肘关节最大可弯曲 $135^{\circ} \sim 150^{\circ}$,充分伸展时为小于 10° ,成人膝关节最大可弯曲 $120 \sim 154^{\circ}$,充分伸展时小于等于 10° .表 1 数据显示,少数与人接近的情况是在 L/R 较大且收缩率较大的条件下得到的.

分析造成差异的原因,笔者认为除了 L/R 的比值外,主要在于收缩率的差异,人类肌肉可以收缩至其自由长度的 60%,但 McKibben 气动肌肉的收缩率通常小于或接近 30%[4].

5 结论

文中创建了一种新的机器人关节,有一对 McKibben 肌肉驱动.详细分析和计算了关节角与

肌肉长度间的关系.对抗设置驱动机器人关节时,关节结构及气动肌肉的长度和伸缩率都会对关节性能产生较大影响,例如对最大旋转角的影响,较大的肌肉长度—旋转柱体半径比和较大的肌肉收缩率将导致较大的关节旋转角.按照前面对收缩率的定义,实际的 McKibben 气动人工肌肉收缩率一般小于或接近 30%,基于该人工关节结构,只有在 L/R 为 10 左右时,其关节角活动范围才可能与人的同类关节接近.对于实际的机器人, L 是有限制的,所以应使 R 足够小,以满足对关节角的要求.

参考文献:

[1] JOHN. Artificial pneumatic muscle[J]. Poptronics, 2000, 12(6):49~65.
[2] GRAHAM R D. Power dressing[J]. New Scientist, 2002, 74(5):68~71.
[3] BJORN V, FRANK D. Heated pneumatic artificial muscles for robotics applications[A]. BPOM L. Proceedings of 1st Flanders Engineering PhD Symposium about Industry-Ready Innovative Research[C]. Brussels: Costerman press, 2003.
[4] FRANK D, DIRK L. Pneumatic artificial muscles: actuators for robotics and automation[J]. European Journal of Mechanical and Environmental Engineering, 2002, 47(1):10~21.
[5] HUJI T A. Primary Human Body Anatomy[M]. 4th edition. Tokyo: Yamawumedou Press, 2000.
[6] YUASAKA G. Muscles[M]. Tokyo: Yamawumedou Press, 2003.
[7] NAKAMURA R. Basic Kinematics[M]. 5th edition. Tokyo: Medical Tooth Medicine Press, 2000.

A Humanoid Joint Actuated by Pneumatic Artificial Muscles

ZHAO Huai -lin^{1,2}, LI Guo², YU Da -tai²

(¹.School of Physics Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China; ².School of Information Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: McKibben pneumatic artificial muscles are a kind of motion engines actuated by gas pressure. It can output enough pulling force, and has definite compliance. This paper establishes a new robot elbow joint. The joint structure evolves from the human joint. Two pieces of antagonistic McKibben pneumatic artificial muscles are used to actuate the joint. The contraction and extension of the two muscles make the joint bend. The relationship between the muscle length and the joint angle is analyzed and calculated. A few possible situations about the maximum of the joint rotation angle are analyzed. And the maximums are formulated. The influence of the structure parameters on the maximum of the joint angle is discussed. At last, the comparison between the artificial joint and human joints is conducted.

Key words: mckibben pneumatic artificial muscles; humanoid joint; joint angle.