

机械式仿骨骼肌变刚度机构原理及设计

王 颜, 房立金

(东北大学, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 随着物理性人机交互的增加, 人机安全性等问题引起关注. 应用于机器人关节中的机械式仿骨骼肌变刚度机构因其能够模仿骨骼肌的变刚度特性, 故可以解决人机安全性和未知环境适应性问题. 通过对国外机器人变刚度关节结构设计的研究, 总结了机械式仿骨骼肌变刚度机构的非线性变刚度原理, 将其结构设计实现方法分为 5 类, 并分析了这 5 类结构设计实现的优缺点, 为设计安全性高、适应性强的机器人提供参考和依据.

关键词: 仿骨骼肌机构; 机器人关节; 变刚度特性; 非线性

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2015)-04-0506-07

Principle and Design of Mechanically Musculoskeletal Variable-Stiffness Mechanism

WANG Yan, FANG Lijin

(Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: With the growth of physical human-robot interface, the security of human-robot interface has attracted attention recently. Mechanically musculoskeletal variable-stiffness mechanisms applied to robot joints can solve the problems about human-robot security and unknown environmental adaptability by imitating the variable stiffness property of skeletal muscle. Many mechanism designs of variable stiffness joints of overseas robots are studied. The nonlinear variable stiffness principle of mechanically musculoskeletal variable-stiffness mechanisms is summarized. Mechanism design methods are classified into five categories, and their advantages and disadvantages are analyzed. The analysis results might provide references for designs of highly-safe and well-adapted robots.

Keywords: mechanically musculoskeletal mechanism; robotic joint; variable stiffness property; nonlinearity

1 引言 (Introduction)

近年来, 机器人技术日益成熟, 穿戴式机器人、康复机器人、假肢、行走机器人等以人为中心的机器人应用领域越来越多, 使用者与机器人本体接触的物理性人机交互也随之增加^[1]. 传统机器人能够实现精确定位及轨迹跟踪, 但也受到固定的工作空间和工作模式的限制, 并且其高刚度特性可能会使使用者受到伤害, 人机安全性和环境适应性已经受到了广泛关注. 从运动生物力学角度看, 肌肉是人体运动系统的动力来源, 通过肌肉收缩产生的力量来维持或完成动作. 骨骼肌有两种收缩形式, 收缩过程中肌肉张力不变, 长度改变, 引起关节活动, 即等张收缩; 相对的, 在收缩过程中肌肉长度不变, 不产生关节运动, 但肌肉的张力增加, 即等长收缩. 以人体手臂为例, 解剖示意图如图 1 所示, 肱二头肌和肱三头肌是一对既拮抗又协调的

屈肌和伸肌^[2], 当肘关节作屈肘运动时, 肱二头肌收缩, 肱三头肌放松; 当关节位置不变时, 肌肉张力增加, 即关节的刚度增加, 且刚度具有非线性特性. 通过模仿骨骼肌的功能, 机器人关节在控制位置的同时, 具有良好的柔顺变刚度特性, 这样能够满足人机安全性和环境适应性的要求.

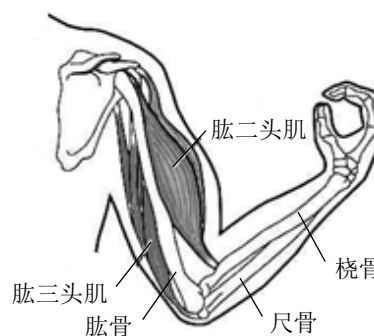


图 1 人体手臂解剖示意图

Fig.1 Anatomical diagram of a human arm

目前, 已经有许多仿骨骼肌实现方式. 电致聚合物类人工肌肉在仿制生物肌肉时表现出高韧性、高传动应变和内在减震能力, 但价格昂贵, 输出力较小, 无法广泛应用; 形状记忆合金与骨骼肌力学行为极为相似, 却有形变较小、力/质量比较小、响应速度不够快等缺点; 气动人工肌肉结构简单、价格低廉、重量轻, 但其行程较小, 精确控制困难^[3]. 除了以上 3 种人工肌肉, 机械式变刚度机构也常被应用在仿生关节中, 因其输出力大、结构多样、设计灵活、易于制造等优点而被许多学者关注.

应用于机器人关节中的机械式仿骨骼肌变刚度机构通常使用弹性元件来实现刚度变化, 这种关节能够实现刚度与平衡位置的独立控制. 根据刚度和位置的控制方式, 机器人关节可分为串联结构和并联结构^[4]. 在串联结构中, 使用两个电机分别独立地控制关节位置和刚度, 该结构的功能明确, 设计思维简便, 缺点是最大转矩受最小电机限制. 并联结构采用类似骨骼肌的拮抗式驱动方式, 关节输出是由 2 个电机共同协作完成, 关节转矩是 2 个电机转矩的代数和, 输出转矩大, 缺点是控制算法相对复杂^[4-5]. 本文着重介绍机械式仿骨骼肌变刚度机构, 从变刚度原理、实现方式及应用方面回顾这类机器人仿生关节的研究工作及进展.

2 变刚度机构 (Variable stiffness mechanisms)

2.1 变刚度机构原理

变刚度机构是仿生关节的关键组成部分, 是区别于传统刚性驱动器的重要部件, 能够直接影响关节的变刚度性能. 变刚度机构与生物系统中骨骼肌的功能相近, 对肌肉的功能仿生研究为变刚度机构的设计提供了一定的理论参考依据, 变刚度机构应该具有类似肌肉的非线性变刚度特性. 根据胡克定律, 线性弹簧的刚度是固定的, 不随长度变化, 其数学定义如下^[1]:

$$k = \frac{F}{\Delta x} = \text{常数} \quad (1)$$

式中: F 表示作用在弹性元件上的外力, Δx 表示弹性元件相对于平衡位置的变化量. 然而变刚度机构的刚度不是常数, 随着位置的变化而变化, 力一位移关系为非线性的, 数学表达如下:

$$k(x) = \frac{dF}{dx} \neq \text{常数} \quad (2)$$

由式 (2) 可以推导出变刚度机构受到外力矩 τ 作用, 产生偏角 θ 的情况下的刚度表达式:

$$k(x) = \frac{d\tau}{d\theta} \neq \text{常数} \quad (3)$$

如何产生非线性变刚度特性成为变刚度机构的设计重点. 我们知道非线性弹簧自身就具有变刚度特性, 例如图 2 所示的几种变刚度螺旋弹簧, 通过变节距、变中径、变簧丝直径中的一个或几个参数来实现变刚度特性^[6], 但这种弹簧受到工艺、设计等方面的限制, 应用范围并不广泛.

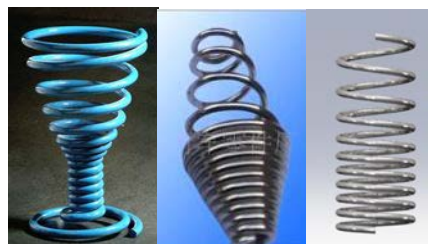


图 2 几种变刚度螺旋弹簧

Fig.2 Several variable-stiffness coil springs

与非线性变刚度弹簧相比, 等刚度弹簧的制造更简单, 价格低廉, 品种多, 规格齐全, 因此研究人员更多地选用了等刚度弹簧, 也有些人选用具有相同优点的板簧. 等刚度弹簧与机构配合产生非线性变刚度特性, 这就是变刚度机构. 变刚度机构产生非线性变刚度特性的基本原理主要就是基于几何学关系, 即, 变刚度机构使线性弹簧变形方向与所受外力的方向形成一定角度, 并且该角度随着力的改变而改变, 根据三角函数, 可以形成非线性的特性.

2.2 变刚度机构原理的实现方法

2.2.1 三角形结构变刚度机构

日本东京大学的 Osada 等人为线驱动肌肉骨骼仿人机器人 Kojiro 研制了非线性弹性拉力部件 NST (nonlinear spring tension unit)^[7], 变刚度原理如图 3(a) 所示, 2 个定滑轮中间是 1 个动滑轮, 通过绳子连接构成了等腰三角形, 绳长的改变使动滑轮移动, 此时弹簧的拉伸方向和绳的拉力方向形成了三角形. 应用于肘关节时, 采用并联结构, 相同的 2 个电机各控制 1 个变刚度单元, 当电机等速同向旋转时, 关节转动, 刚度不变, 当电机等速反向旋转时, 关节位置不变, 刚度改变. 该关节具有以下 3 个优点: 较好地适应目标, 吸收外部冲击以及快速释放弹簧能量. 为了缩小体积, 对 NST 进行改进, 设计出使用压缩弹簧的附加非线性弹性部件 (add-on nonlinear spring unit)^[7] 和使用乳胶弹簧的紧凑式非线性弹性部件 (compact nonlinear spring unit using natural rubber latex)^[8]. 弹性对抗弹簧机构 FAS (flexible antagonistic spring)^[9] 的工

作原理图如图 3(b) 所示, 与弹簧相连的弹簧滑轮总是绕着定滑轮转动, 并在绳的拉力作用下拉伸弹簧, 弹簧力与绳拉力之间不再像图 3(a) 那样一直保持等腰三角形的几何形状, 而是随着拉力变化而改变三角形的形状.

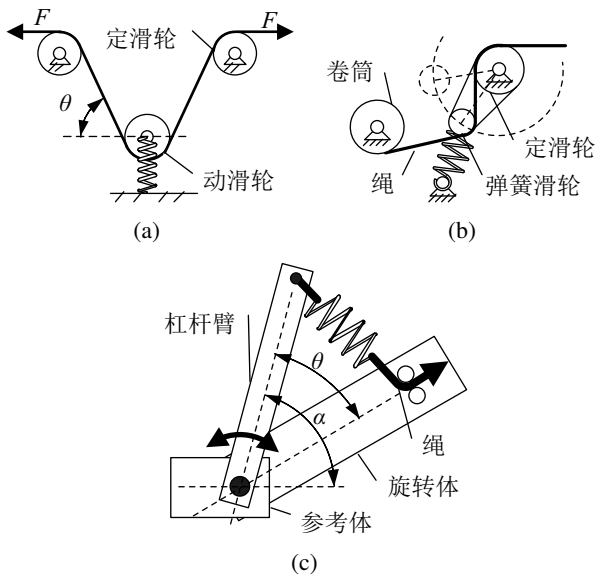


图 3 三角形结构变刚度机构

Fig.3 Triangular variable stiffness mechanisms

除了使用滑轮—绳索机构构建三角形结构外, Ham 等人采用杆—绳索机构设计出机械式可调柔顺性及可控平衡位置驱动器 MACCEPA (mechanically adjustable compliance and controllable equilibrium position actuator) [10], 工作原理如图 3(c) 所示, 为串联结构, 参考体、杠杆臂和旋转体绕轴旋转, 参考体可视为固定不动, 杠杆臂的另一端和旋转体上的固定点间用绳连接弹簧, 绳的另一端连接着用来调节弹簧预紧力的刚度电机, 关节电机调整杠杆臂来改变旋转体的位置, 也就是控制杠杆臂和参考体之间的夹角 α , 而杠杆臂和旋转体的夹角 θ 为 0 时, 关节处于平衡位置, θ 不为 0 时, 弹簧拉伸, 就会产生使关节恢复平衡的力矩.

2.2.2 四杆结构变刚度机构

Huang 等人设计的连续状态耦合弹性驱动器 CCEA (continuous-state coupled elastic actuator) [11] 的变刚度原理如图 4(a) 所示, 采用四杆结构, 外力 F 挤压滑块, 使弹簧拉伸. CCEA 使用一对这样的四杆变刚度机构, 刚度电机通过双螺纹螺杆同时调整滑块的位置来改变刚度. CCEA 应用在肘部康复骨骼服, 可以实现近零机械刚度, 并且, 提出的最短距离控制可以简单控制变刚度机构. Yeo 等人设计的绳驱动机械手 CDM (cable-driven manipulator)

中的变刚度装置 VSD (variable stiffness device) [12] 使用了扭簧, 原理如图 4(b) 所示, 拉伸两端绳子, 扭簧绕其轴旋转, 刚度改变.

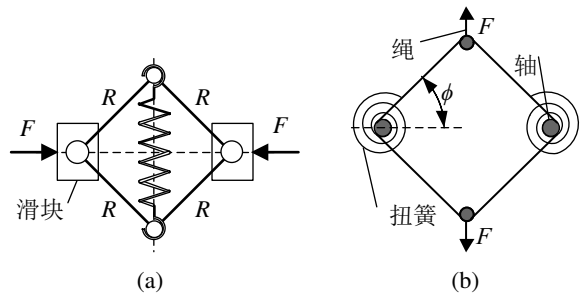


图 4 四杆结构变刚度机构

Fig.4 Four-bar variable stiffness mechanisms

2.2.3 杠杆结构变刚度机构

杠杆也是一种应用广泛的结构, 原理如图 5(a) ~ (c) 所示, 分别通过移动弹簧位置、外力作用位置、杠杆支点位置来调节刚度. 可调刚度驱动器 AwAS (actuator with adjustable stiffness) [13] 的变刚度原理如图 5(a) 所示, 杠杆支点位置和外力作用点位置不变, 两个弹簧对抗地连接在杠杆两侧, 并沿着杠杆向着或远离支点位置移动, 从而改变杠杆有效力臂长度, 弹簧距离支点越远, 有效力臂越长, 刚度越高, 相反, 有效力臂越短, 刚度越低, 根据式 (3), AwAS 的刚度表达式如下:

$$k = \frac{d\tau}{d\theta} = 2k_s R^2 \cos(2\theta) \quad (4)$$

式中: τ 为外力 F 的等效外力矩, θ 为杠杆受外力产生的偏角, R 为有效力臂, 即弹簧与支点的距离, k_s 为弹簧的弹性系数. 由于改变刚度的位移垂直于弹簧力, 所以这种设计减小了调节刚度的能量.

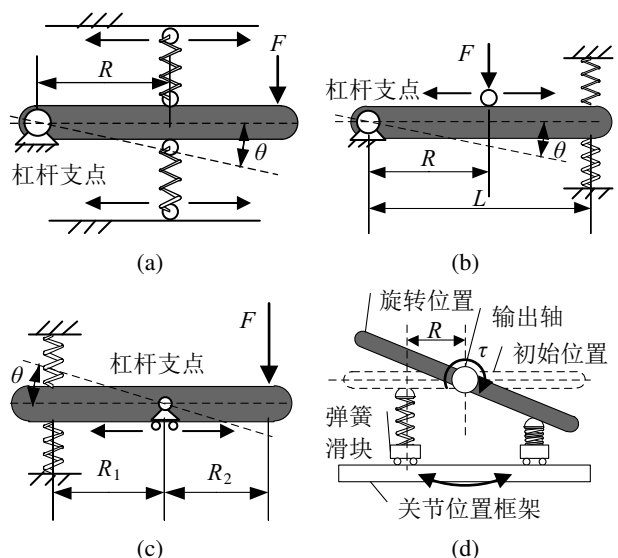


图 5 杠杆结构变刚度机构

Fig.5 Lever structural variable stiffness mechanisms

Kim 等人在混合变刚度驱动器 HVSA (hybrid variable stiffness actuator) [14] 中设计的可调力臂机构, 原理如图 5(d) 所示, 是对图 5(a) 杠杆变刚度方法的变形. HVSA 使用了相对旋转中心对称的一对弹簧, 2 个弹簧滑块分别与齿条相连, 而 2 个齿条又分别与行星齿轮系中的 2 个行星齿轮构成了 2 组齿轮齿条机构, 行星架连接到关节框架, 一个电机控制齿圈, 另一个电机控制行星架. 当行星架不转动, 只齿圈转动时, 行星齿轮自转, 齿条移动, 弹簧滑块移动, 只有杠杆力臂改变, 从而改变刚度; 当行星架和齿圈同方向同角度转动时, 滑块位置不变, 关节转动, 刚度不变.

Carloni 等人设计的一种节能型变刚度驱动器 (energy-efficient variable stiffness actuator) [15] 采用了图 5(b) 的变刚度原理, 支点和弹簧固定不动, 并且只用一个弹簧, 不使用对抗弹簧, 通过移动外力作用点位置来改变杠杆有效力臂, 外力作用点距离支点越近, 刚度越大, 相反则刚度越小, 刚度表达式如下:

$$k = \frac{d\tau}{d\theta} = \left(\frac{L}{R}\right)^2 k_s \quad (5)$$

式中: R 为有效力臂, 即外力作用点与支点的距离; L 为弹簧与支点的距离.

紧凑型变刚度驱动器 CompAct-VSA (CompAct-variable stiffness actuator) [16]、UT-II 型变刚度驱动器 vsaUT-II (variable stiffness actuator UT-II) [17]、小型变刚度驱动器 mVSA-UT (miniaturized variable stiffness actuator-UT) [18] 和 AwAS-II [19] 都是采用图 5(c) 所示的变刚度原理, 2 个弹簧对抗固定在杠杆一端, 外力作用点在另一端, 并且位置不变, 通过移动支点位置来改变杠杆力臂的比值, 当支点向弹簧一端移动时刚度变小, 而向外力方向移动时刚度变大. AwAS-II 的刚度表达式如下:

$$k = \frac{d\tau}{d\theta} = 2k_s \alpha^2 (R_1 + R_2) \cos \theta \quad (6)$$

式中: R_1 为支点到弹簧的距离, R_2 为支点到外力作用点的距离, α 为杠杆力臂的比值, 即 $\alpha = R_1/R_2$. 相比于 AwAS, AwAS-II 的力臂更短, 结构更紧凑, 调节刚度所需的时间也就更短, 刚度范围更大, 性能优于 AwAS.

特殊地, 板簧作为常用的弹性元件由于其自身特性, 无法像线性螺旋弹簧那样通过几何结构来实现非线性变刚度特性, 但是能够通过改变其有效工作长度来实现变刚度的目的, 常用的变刚度原理如图 6 所示, 与图 5(c) 原理相似, 通过移动支点位置

来改变板簧的有效长度 L . 根据悬臂梁的挠曲线方程, 刚度表达式如下:

$$k = \frac{3EI}{L^3} \quad (7)$$

由上式可以看出, 有效长度 L 越小, 刚度越大. 图 6(a) 为主动变刚度弹性驱动器 AVSEA (active variable stiffness elastic actuator) [20] 的变刚度原理示意图, 板簧不受外力的一端固定, 仅通过刚度电机移动作为支点的滚子来调节刚度. Choi 等人设计的变刚度关节 VSJ (variable stiffness joint) [21] 的变刚度原理如图 6(b) 所示, 板簧连接到中心轴上, 相同的电机 1、2 通过曲柄滑块机构共同控制力臂长度 L , 整个关节使用 4 组图中的机构平均分布在中心轴周围, 当电机控制的曲柄以相同速度同向旋转时, 刚度不变, 关节旋转, 当曲柄反向旋转时, 移动支点在板簧上移动, 刚度改变.

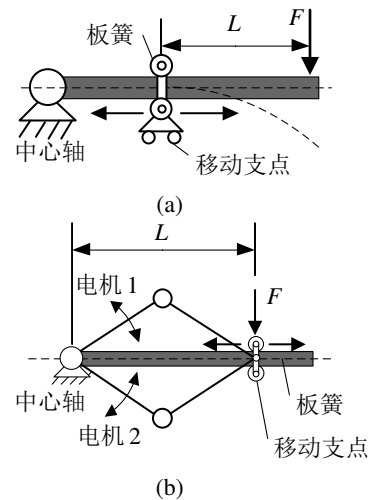


图 6 使用板簧的变刚度机构
Fig.6 Variable stiffness mechanisms with leaf springs

2.2.4 具有特殊曲面/斜面零件的变刚度机构

利用凸轮等零件的弧形曲面可以产生非线性变刚度特性, Migliore 等人设计的非线性弹性驱动器 (nonlinear elastic actuator) [22] 采用并联结构, 其非线性弹簧装置原理如图 7(a) 所示, 两个滚子之间连接着弹簧, 施加外力时, 绳子向相反方向拉动外框架和滚子导轨, 滚子沿着非线性轮廓移动, 弹簧被拉伸, 拉力 F 与弹簧力 F_s 的比值为 $\tan \phi$. 这种对抗二次弹簧设计方法能够模仿动物的关节结构, 提高机器人运动性能. 在 MACCEPA2.0 [23] 中, 使用心形轮廓圆盘的弧形曲面来产生非线性变刚度特性, 如图 7(b) 所示, 弹簧置于旋转体上, 其工作原理与 MACCEPA 相似, 但是 2.0 版的转矩和刚度范围更大.

同样, 利用具有一定斜率的斜面零件也可以获得非线性特性. Song 等人提出的并联变刚度驱动器 PVSA (parallel-type variable stiffness actuator) [24] 中的双凸轮-滚子机构如图 7(c) 所示, 弹簧位于输出杆中间, 一端固定, 另一端连着滚子, 利用两个凸轮的斜面共同挤压滚子来压缩弹簧, 产生非线性变刚度特性. 当两个凸轮反向旋转相同角度时, 滚子移动, 只改变刚度, 而输出杆不动; 当两个凸轮同向旋转相同角度时, 滚子不受挤压, 刚度不变, 输出杆转动.

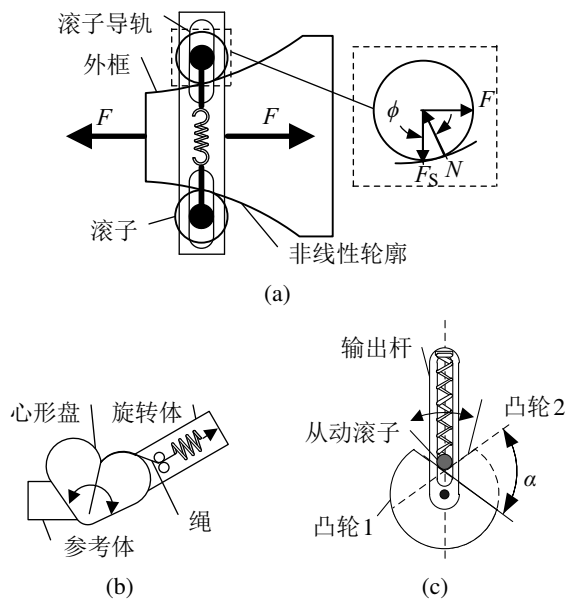


图 7 具有特殊曲面/斜面零件的变刚度机构

Fig.7 Variable stiffness mechanisms with special curved or inclined surfaces

2.2.5 S 型旋转结构变刚度机构

日本东京大学的 Osada 等人又为仿人机器人 Kenzoh 设计出一种旋转式非线性弹性部件 (rotary nonlinear spring unit) [25], 原理如图 8 所示, 部件分为上下两层, 绳子缠绕在上层圆筒的轴上, 呈 S 型, 拉动绳子使上层圆筒转动, 从而压缩下层的弹簧, 绳拉直时的刚度为绳自身材料的最大刚度. 旋转结构缩小了体积, 并能够适应更大的冲击, 产生的力大概是 NST 的 7 倍, 且使用的旋转电位计价格更低.

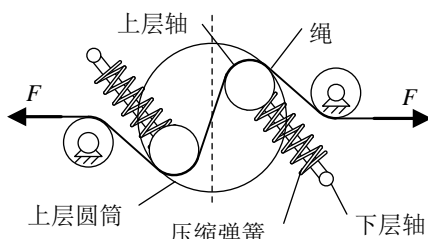


图 8 S 型旋转结构变刚度机构

Fig.8 S-type rotary variable stiffness mechanism

2.3 变刚度机构的位置布局

基于驱动方式、变刚度机构的结构等因素, 变刚度机构一般分布于机器人关节的关节处或关节两侧. 变刚度机构位于关节位置, 即机构与关节集成在一起的位置布局, 优点是机构的结构紧凑, 集成性高, 安装简便, 缺点是关节体积较大, 多数的串联结构会选择这种布局, 比如 AwAS, 但是 PVSA、VSJ 这些采用并联结构的关节也会集成在关节处. 变刚度机构位于关节两侧, 即机构与关节分离的布局, 变刚度机构往往可以独立用作一个变刚度驱动部件, 通常采用滑轮-绳驱动方式连接变刚度机构与关节轮, 优点是关节的结构简化, 体积减小, 总体布局的灵活性高, 缺点是集成性低, 安装时需要考虑变刚度机构的位置安排, 并联结构常采用这种布局, 比如 Kojiro 的肘关节.

3 结论 (Conclusion)

3.1 对比

为了能够直观地对比变刚度机构的性能, 将前文提到的部分变刚度机构的性能参数分别列于表 1、表 2 中 (部分参数未在参考文献中提及). 表 1 中的变刚度机构集成度高, 可直接作为仿生关节使用. 表 2 中的变刚度机构作为人工肌肉部件, 通过绳索安装于关节两侧, 构成拮抗式驱动系统, 应用范围广泛且灵活, 可用于旋转关节.

在分析研究各种变刚度机构的结构后, 对上述 5 类变刚度机构在设计实现过程中存在的优缺点进行总结:

(1) 三角形结构和四杆结构的原理相对容易理解, 设计实现也较容易, 通常采用预紧弹簧的方式调整刚度, 位于平衡位置时, 也需要能量来调整刚度, 而且受到物理结构的限制, 刚度范围会受影响;

(2) 杠杆结构不需要预紧弹簧来改变刚度, 即, 平衡位置时不需要能量来改变刚度, 刚度变化只与力臂长度有关, 调整力臂的方法很多, 实现形式多样, 但是通常采用一对弹簧, 且机构设计会略显复杂;

(3) 具有特殊曲面/斜面的零件需要实现二次弹簧的功能, 因此对零件轮廓的设计要求较高, 而且刚度也受到轮廓的物理长度的限制;

(4) S 型的旋转机制能够有效减小摩擦力, 缩小体积, 但是设计实现复杂.

5 类变刚度机构的结构实现各有优缺点, 设计时应根据实际应用需求, 选择合适的结构类型, 扬长避短地进行机构设计.

表 1 变刚度关节的性能参数概览
Tab.1 An overview of some parameters of several variable stiffness joints

名称	变刚度机构类型	示意图序号及文献编号	刚度范围 /($N \cdot m/rad$)	运动范围 /($^{\circ}$)	最大力矩 /($N \cdot m$)	质量 /kg	弹簧数量	应用
MACCEPA	三角形结构	图 3(c), [10]	28.65 ~ 42.97	0 ~ 120	70	2.4	1	肘、膝关节
AwAS	杠杆结构	图 5(a), [13]	30 ~ 1500	± 120	80	1.8	2	膝关节
HVSA	杠杆结构	图 5(d), [14]	4.01 ~ 126.05	0 ~ 120	8.5	1.8	2	肘关节
CompAct-VSA	杠杆结构	图 5(c), [16]	0 ~ ∞	/	117	2	2	旋转关节
vsaUT- II	杠杆结构	图 5(c), [17]	0.7 ~ 948	± 28.6	60	2.5	2	旋转关节
AwAS- II	杠杆结构	图 5(c), [19]	0 ~ ∞	± 150	80	1.1	2	膝关节
AVSEA	杠杆结构	图 6(a), [20]	4.87 ~ ∞	± 150	29	2.2	2	肘关节
VSJ	杠杆结构	图 6(b), [21]	252 ~ 3648	/	30	4.95	4	旋转关节
非线性特性驱动器	具有特殊曲面零件	图 7(a), [22]	630 ~ 46237	± 90	0.05	0.11	2	旋转关节
MACCEPA2.0	具有特殊曲面零件	图 7(b), [23]	0 ~ 114.59	0 ~ 120	60	0.7	1	膝关节
PVSA	具有斜面零件	图 7(c), [24]	0 ~ 51.57	/	9	0.98	4	旋转关节

表 2 变刚度人工肌肉部件的性能参数概览
Tab.2 An overview of some parameters of several variable-stiffness artificial muscular units

名称	变刚度机构类型	示意图序号及文献编号	刚度范围 /(N/m)	伸长量 /m	最大拉力 /N	长度 /m	弹簧数量	应用
NST	三角形结构	图 3(a), [7]	0 ~ ∞	0~0.025	30	0.06	1	旋转关节
紧凑型非线性弹性部件	三角形结构	图 3(a), [8]	$1 \times 10^3 \sim \infty$	0~0.025	150	0.03	2	旋转关节
VSD	四杆结构	图 4(b), [12]	$100 \sim 4 \times 10^4$	0~0.02	80	0.03	2	旋转关节
旋转式非线性弹性部件	S 型结构	图 8, [25]	0 ~ ∞	0~0.025	200	0.05	1	旋转关节

由于各仿生变刚度机构的体积、材料、弹性元件刚度系数等设计参数选择不一, 因此变刚度机构的总体性能参数也存在较大差异. 虽然这些不同用途的变刚度机构能够模拟肌肉的非线性变刚度特性, 但是与人体关节性能相比, 仍存在一定差距. 人体关节的部分性能参数范围如表 3 所示 [26-29], 将列举的变刚度机构与人体关节参数对比, 可得出以下结论:

表 3 人体关节部分参数
Tab.3 Some parameters of human joints

关节	运动范围 /($^{\circ}$)	最大力矩范围 /($N \cdot m$)	刚度范围 /($N \cdot m/rad$)
肘关节	0 ~ 146	50.03 ± 8.16	1 ~ 300
膝关节	0 ~ 140	180.14 ± 40.22	25 ~ 300

(1) 变刚度机构应用于肘关节时, 大多数情况下可以满足 1 项人体肘关节参数, 个别可以满足 2 项, 但是尚不能同时满足 3 项人体肘关节参数;

(2) 变刚度机构应用于膝关节时, 多数能够满足人体膝关节的运动范围和刚度范围, 但是所有变刚度关节的最大力矩都远低于人体膝关节;

(3) 变刚度人工肌肉部件的刚度范围极大, 但最大拉力偏小. 应用于肘或膝关节时, 容易实现人

体关节的运动范围. 但是, 当仿生关节的尺寸与人体关节相当时, 仿生关节力矩与人体关节力矩相比则存在明显差距.

3.2 结论

本文对应用于机器人关节中的机械式仿骨骼肌变刚度机构的非线性变刚度原理及其设计实现方法进行总结分类, 重点介绍了三角形结构、四杆结构、杠杆结构、具有特殊曲面/斜面零件及 S 型结构这 5 类变刚度机构的结构实现方法, 总结了几种仿生关节的变刚度机构性能参数, 最后, 总结出了 5 类变刚度机构在设计实现过程中存在的优缺点, 以及与人体关节性能的对比结果.

机械式仿骨骼肌变刚度机构能够满足人机安全性和未知动态环境适应性的要求, 并在人机交互中得到越来越多的应用. 虽然目前已经有许多驱动器的设计, 但为了获得具有较大可调刚度范围、结构紧凑、质量轻、能量效率高和易于控制等优点的变刚度机构还应该继续探索, 笔者希望本文的分析整理结果能够为研究者在未来的设计中提供参考.

参考文献 (References)

[1] van Ham R, Sugar T G, Vanderborght B, et al. Compliant actuator designs: Review of actuators with passive adjustable com-

- pliance/controllable stiffness for robotic applications[J]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2009, 16(3): 81-94.
- [2] 余慧杰. 具有生理学特性的高精度人体肌肉疲劳建模及其在手臂屈伸运动中的应用研究[D]. 上海: 复旦大学, 2008.
- Yu H J. Development of a high-fidelity human muscle fatigue model with physiological characteristics for use in the modeling of the elbow flexor-extensor motion[D]. Shanghai: Fudan University, 2008.
- [3] 臧克江. 编织型气动人工肌肉工作机理及设计理论研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
- Zang K J. Mechanism and design theory research of braided type pneumatic artificial muscle[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012.
- [4] Tagliamonte N L, Sergi F, Accoto D, et al. Double actuation architectures for rendering variable impedance in compliant robots: A review[J]. *Mechatronics*, 2012, 22(8): 1187-1203.
- [5] Vanderborght B, Albu-Schaeffer A, Bicchi A, et al. Variable impedance actuators: A review[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2013, 61(12): 1601-1614.
- [6] 祁宏钟, 雷雨成, 冯晋祥. 变刚度螺旋弹簧的设计方法和精确建模初探[J]. *中国机械工程*, 2002, 13(13): 1100-1102.
- Qi H Z, Lei Y C, Feng J X. Preliminary study on design method of nonlinear spring and precise modeling[J]. *China Mechanical Engineering*, 2002, 13(13): 1100-1102.
- [7] Osada M, Ito N, Nakanishi Y, et al. Realization of flexible motion by musculoskeletal humanoid "Kojiro" with add-on nonlinear spring units[C]//IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots. Piscataway, USA: IEEE, 2010: 174-179.
- [8] Nakanishi Y, Ito N, Shirai T, et al. Design of powerful and flexible musculoskeletal arm by using nonlinear spring unit and electromagnetic clutch opening mechanism[C]//IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots. Piscataway, USA: IEEE, 2011: 377-382.
- [9] Friedl W, Chalon M, Reinecke J, et al. FAS a flexible antagonistic spring element for a high performance over actuated hand[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2011: 1366-1372.
- [10] van Ham R, Vanderborght B, van Damme M, et al. MACCEPA, the mechanically adjustable compliance and controllable equilibrium position actuator: Design and implementation in a biped robot[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2007, 55(10): 761-768.
- [11] Huang T H, Huang H P, Kuan J Y. Mechanism and control of continuous-state coupled elastic actuation[J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2014, 74(3/4): 571-587.
- [12] Yeo S H, Yang G, Lim W B. Design and analysis of cable-driven manipulators with variable stiffness[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2013, 69: 230-244.
- [13] Jafari A, Tsagarakis N G, Caldwell D G. A novel intrinsically energy efficient actuator with adjustable stiffness (AwAS)[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, 18(1): 355-365.
- [14] Kim B S, Song J B. Design and control of a variable stiffness actuator based on adjustable moment arm[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2012, 28(5): 1145-1151.
- [15] Visser L C, Carloni R, Stramigioli S. Energy-efficient variable stiffness actuators[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, 27(5): 865-875.
- [16] Tsagarakis N G, Sardellitti I, Caldwell D G. A new variable stiffness actuator (CompAct-VSA): Design and modelling[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2011: 378-383.
- [17] Groothuis S S, Rusticelli G, Zucchelli A, et al. The variable stiffness actuator vsaUT-II: Mechanical design, modeling, and identification[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(2): 589-597.
- [18] Fumagalli M, Barrett E, Stramigioli S, et al. The mVSA-UT: A miniaturized differential mechanism for a continuous rotational variable stiffness actuator[C]//IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics. Piscataway, USA: IEEE, 2012: 1943-1948.
- [19] Jafari A, Tsagarakis N G, Sardellitti I, et al. A new actuator with adjustable stiffness based on a variable ratio lever mechanism [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(1): 55-63.
- [20] Wang R J, Huang H P. Active variable stiffness elastic actuator: Design and application for safe physical human-robot interaction[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, USA: IEEE, 2010: 1417-1422.
- [21] Choi J, Hong S, Lee W, et al. A robot joint with variable stiffness using leaf springs[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, 27(2): 229-238.
- [22] Migliore S A, Brown E A, DeWeerth S P. Novel nonlinear elastic actuators for passively controlling robotic joint compliance[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2007, 129(4): 406-412.
- [23] Vanderborght B, Tsagarakis N G, Ham R V, et al. MACCEPA 2.0: Compliant actuator used for energy efficient hopping robot Chobino1D[J]. *Autonomous Robots*, 2011, 31(1): 55-65.
- [24] Nam K H, Kim B S, Song J B. Compliant actuation of parallel-type variable stiffness actuator based on antagonistic actuation[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2010, 24(11): 2315-2321.
- [25] Osada M, Ito N, Nakanishi Y, et al. Stiffness readout in musculo-skeletal humanoid robot by using rotary potentiometer[C]//IEEE Sensors Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2010: 2329-2333.
- [26] Nordin M, Frankel V H. Basic biomechanics of the musculoskeletal system[M]. Philadelphia, USA: Lippincott Williams & Wilkins, 2011.
- [27] 徐红旗, 张欣, 冉令华, 等. 应用等张模式测定人体单关节肌群功率发展与保持能力的方法学研究[J]. *人类工效学*, 2011, 17(4): 13-18.
- Xu H Q, Zhang X, Ran L H, et al. Methodology research on evaluating the developmental and retentive capacity level of human single-joint muscular power in mode of isotonic test[J]. *Chinese Journal of Ergonomics*, 2011, 17(4): 13-18.
- [28] Abul-Haj C, Hogan N. An emulator system for developing improved elbow-prosthesis designs[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 1987, 34(9): 724-737.
- [29] Zhang L Q, Nuber G, Butler J, et al. In vivo human knee joint dynamic properties as functions of muscle contraction and joint position[J]. *Journal of Biomechanics*, 1998, 31(1): 71-76.

作者简介:

- 王 颜 (1986-), 女, 博士生. 研究领域: 仿生结构设计.
- 房立金 (1965-), 男, 博士, 教授. 研究领域: 机器人及自动化控制系统.