DOI: 10.3901/JME.2020.23.058

单自由度八杆仿生机构构型与尺度同步设计方法^{*}

张自强 廖金秣 赵京 王伦
(北京工业大学材料与制造学部 北京 100124)

摘要: 单自由度八杆仿生机构杆长参数较多, 是仿生机器人领域研究的难点之一。为提高设计效率, 提出一种构型与尺度同步设计方法。在选定的运动链和机架的基础上, 以不等式形式分步给出运动可行性及外形约束条件, 使得上一步的杆长可作为下一步求解的已知值。通过该过程, 在得到八杆仿生机构构型的同时, 快速得到所有杆长的初步可行域。循环上述过程, 逐步缩小约束条件的范围, 可使得八杆机构的杆长快速接近目标值。在此基础上, 分类讨论了连杆搭接顺序、约束条件及基本运动链的差异对求解难度及构型结果的影响。利用所提出的单自由度八杆仿生机构的设计方法, 在对初始条件进行合理选取的前提下, 可在初步得到构型的同时将杆长限定在较小范围内, 实现了构型与尺度的同步设计。该方法还可应用于其他单自由度机构的设计当中, 具有较好的借鉴意义。

关键词: 仿生机构; 单自由度; 八杆机构; 构型与尺度一体化; 设计方法

中图分类号: TH112

Integration Design Method of Configuration and Dimension for One DOF Eight-bar Bio-inspired Mechanism

ZHANG Ziqiang LIAO Jinnong ZHAO Jing WANG Lun
(Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

Abstract: The one DOF eight-bar bio-inspired mechanism has many link length parameters and is difficult to design, which is the difficulty of research in the field of bio-inspired robots. In order to improve the design efficiency, an integration design method of configuration and dimension is proposed. On the basis of the selected kinematic chain and frame, the movement feasibility and shape constraint conditions are given step by step in the form of inequalities, so that the link lengths of the previous step can be used as the known value of the next step. Through this process, while obtaining the configuration of the eight-bar bio-inspired mechanism, the initial feasible region of all link lengths can be quickly obtained. The above-mentioned process is cycled to gradually reduce the range of constraint conditions, so that the link lengths of the eight-bar mechanism can quickly approach the target values. Then the effect of links adding sequence, constraint conditions and the difference of basic kinematic chain on solving difficulty and configuration results is analyzed. By using the design method of the one DOF eight-bar mechanism, on the premise of reasonable selection of initial conditions, the initial configurations can be obtained and the lengths of the links can be limited in a small range, so that the integration design of the configuration and the dimension can be realized. This method can also be applied to the design of other one DOF mechanisms and has a good reference significance.

Key words: bio-inspired mechanism; one DOF; eight-bar mechanism; integration of configuration and dimension; design method

0 前言

仿生机器人通过模拟生物的运动规律及外形特征, 具有了在各种复杂环境下运动的能力, 是机器

人领域重要的研究方向之一^[1-3]。特别地, 由于单自由度机构控制简便, 常被应用于仿生机构的设计当中^[4]。其中, 单自由度四杆和六杆机构在仿生机器人腿部机构设计当中应用较为广泛^[5-9]。与四杆和六杆机构相比, 单自由度八杆机构的构型更加丰富, 可实现更加复杂的运动形式, 成为了仿生机构研究的热点。最具代表性的是 HALDANE 等^[10-11]设计的仿夜猴跳跃机器人“Salto”。该机器人可实现稳定的

^{*} 国家自然科学基金(51805010)和中国博士后科学基金特别资助项目(2019T120030)。20200518 收到初稿, 20200915 收到修改稿

竖直跳跃, 跳跃敏捷性提高到 78%。

单自由度八杆机构的构型种类及杆长参数较多, 如何合理设计出可行构型并确定尺度参数, 使得机构满足设计目标是研究的重点之一。国内外学者对于平面八杆机构运动链构型综合方法的研究较多^[12-13], 在此基础上, 为满足机器人特定性能要求, 进一步对八杆机构的设计方法开展研究。

在国外, 加州大学伯克利分校 PLECNİK 等^[14]以末端轨迹直线引导为约束条件, 通过在六杆机构上添加连杆完成八杆机构设计, 在保证运动轨迹要求的前提下, 使得仿生跳跃机器人在起跳过程中角动量近似为零, 实现稳定的跳跃。新加坡理工大学 SOH 等^[15]在给定 5 个轨迹位置点的前提下, 以 PRR-3R 闭环为基础, 通过运动学逆解及 RR 连杆的叠加, 设计出满足要求的八杆滑块机构, 并通过设计一种多功能轮椅机构证明了该方法的可行性。SONAWALE 等^[16]也采用了在闭环中进行连杆叠加的方法, 通过在 6R 闭环中叠加 RR 连杆, 使得目标点连续通过 5 个给定位置。在国内, 上海交通大学段旭洋等^[17]将粒子群算法应用于平面机构尺度综合与构型优选当中, 结合提出的嵌套粒子群算法, 解决了平面机构的尺度综合、机架位姿优化和构型优选问题。北京航空航天大学桂顺^[18]通过将 Stephenson 六杆机构与 3R 串联支链组合, 提出了八杆机构的设计方法, 并结合运动学模型及遗传算法确定了杆长参数, 以此降低八杆机构的设计难度。特别地, 为了提高单自由度机构的设计效率, 部分学者对构型和尺度一体化综合方法进行研究, 以得到所有可行构型及杆长尺寸。SHEN 等^[19-20]在该方面取得了具有代表性的研究成果。

上述方法大多以末端轨迹引导为设计目标。对于仿生机构而言, 其不仅需要能够使得目标点满足特定轨迹要求, 还需要在运动过程中满足仿生外形要求, 同时考虑到八杆机构的连杆及铰链点较多, 且与被模仿对象之间的异构特点, 约束条件更为复杂, 这就增加了求解的难度。为此, 本文以八杆仿生犰狳机构为例, 提出一种构型与尺度同步的设计方法, 在初步得到机构构型的同时将杆长限定在较小范围内, 以提高设计效率。

1 机构设计方法

1.1 设计方法概述

为了实现单自由度八杆机构的构型与尺度同步设计, 在选定机架的基础上, 分层搭建相邻连杆并

给出约束条件, 直到得到满足要求的构型。设计过程如下。

(1) 选取适当的运动链及机架, 并建立固定坐标系, 同时选取合适的末端点。

(2) 在选定机架的基础上, 搭建相邻连杆, 并以不等式的形式给出运动可行性或外形约束条件, 所得到的杆长条件可作为下一步分析的已知值。

(3) 当形成第一个闭环后, 对该闭环进行运动学分析, 在将目标点或目标连杆的位姿用驱动转角进行表示的基础上, 进一步给出约束条件。该约束条件与上一步约束条件可能涉及同一杆长, 可取约束条件的交集作为已知值进行分析。若无交集, 则可根据优化算法取近似满足上述约束条件的值作为参考。

(4) 逐步搭建连杆直到得到最终构型及所有连杆的杆长。循环上述过程以得到杆长可行域。

(5) 重复上述过程并逐步缩小约束条件的范围, 使得结果接近目标值。

通过上述方法, 可在得到单自由度八杆机构构型的同时将杆长限定在较小范围内, 实现构型与尺度的同步设计。特别地, 不同的连杆搭建顺序、不同的约束条件及运动链和机架选取的差异均会影响最终结果, 还需要根据实际情况进行判断。

1.2 机构设计过程

以仿生犰狳机构为例进行分析。犰狳身体外部覆盖有骨甲。当其处于危险中时, 它的骨甲可从中间向两边弯曲直到形成类似球形, 通过滚动实现逃逸, 同时保护易受伤害的四肢和腹部。其折叠过程如图 1 所示。设计一种能在爬行和滚动两种运动之间切换的机器人, 以实现高效运动和快速逃逸, 具有重要意义。仿生犰狳机构的设计原则如下: ① 从运动可行性的角度, 在给定的驱动转角范围内, 末端点应满足弧形轨迹要求, 并能够保证运动连续性; ② 从外形特征的角度, 机构应能够在初始状态下具有细长的特征, 并在结束状态下近似满足半圆弧的形状。

图 1 犰狳骨甲折叠过程

(1) 运动链及机架的选取。八杆机构共有 16 种基本运动链, 选取如图 2a 所示运动链为例进行分析。针对该运动链, 可选择任意连杆作为机架, 在后续分析中, 以三副杆 ABC 为机架, 铰链 C 为末端点(末端点的选择应结合外形要求)。令固定坐标系原点位于 AB 中心处, y 轴方向与 AB 重合, 如图 2b 所示。此时, 约束条件可表示为

图2 八杆仿生机构连杆搭接过程

$$\begin{cases} \theta_{a1} \leq \theta_1 \leq \theta_{b1} \\ (x_{Hi} - x_{Hfi})^2 + (y_{Hi} - y_{Hfi})^2 \leq r_H^2 \quad i=1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2)$$

式中, θ_{a1} 和 θ_{b1} 分别为驱动转角的上下限, 其可初步给定一个较大范围。 (x_{Hi}, y_{Hi}) 为 H 点在八杆机构处于不同位置时的坐标, (x_{Hfi}, y_{Hfi}) 为对应的参考点坐标, 即将图 1 中模拟狢猴骨甲折叠过程时曲线对应点的测量值作为已知值。 r_H 为约束范围, 即八杆机构实际坐标点与参考点差值的允许范围。式(2)中, 第一个不等式为运动可行性约束条件, 即驱动转角在给定范围内机构可实现连续运动。第二个不等式为外形约束条件, 可限制机构在运动过程中的外形特征。其中, 八杆机构 H 点的坐标可表示为

$$\begin{cases} x_H = -l_4 \cdot \sin(\alpha_2 + \theta_1) \\ y_H = -l_4 \cdot \cos(\alpha_2 + \theta_1) - \frac{1}{2} \cdot l_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中, α_2 为三副杆 ABC 中 AB 与 BC 的夹角, l_4 为连杆 BH 的长度。通过式(2)中所示约束条件可初步确定 l_4 的一个可行解。

在此基础上, 依次搭接相邻连杆 CD 和 DH , 形成第一个闭环四杆机构 $BHDC$, 如图 2c 所示。此时, 可给定约束条件如下

$$(x_{Hi} - x_{Di})^2 + (y_{Hi} - y_{Di})^2 \leq r_{H-D}^2 \quad i=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$a_{li} \leq l_i \leq b_{li} \quad i=1, 2, 3 \quad (1)$$

式中, $l_i (i=1, 2, 3)$ 为三副杆 ABC 各边长度。由此初步给定机架尺寸。

(2) 形成第一个闭环。在机架上搭接第一个连杆 BH , 如图 2c 所示, 并令 BC 与 BH 的夹角 θ_1 为驱动转角。此时, 可给定约束条件如下

式中, (x_{Di}, y_{Di}) 为八杆机构 D 点在机构处于不同位置时的坐标点, r_{H-D} 为约束范围, 即八杆机构 D 点坐标与 H 点坐标差值的允许范围。式(4)通过约束 D 点与 H 点之间的距离, 使得外形满足设计要求。 D 点的坐标可表示为

$$\begin{cases} x_D = l_2 \cdot \sin(\alpha_1) - l_6 \cdot \sin(\alpha_1 + \alpha_3 + \theta_2) \\ y_D = -l_2 \cdot \cos(\alpha_1) + l_6 \cdot \cos(\alpha_1 + \alpha_3 + \theta_2) + \frac{1}{2} l_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中, l_6 为连杆 CD 的长度, $\alpha_i (i=1, 3)$ 为三副杆 ABC 的内角, 如图 2b 所示。 θ_2 为连杆 BC 和 CD 的夹角, 其可通过求解式(6)所示矢量方程, 表示为驱动转角 θ_1 的函数。

$$BC + CD + DE + EB = 0 \quad (6)$$

通过式(4)中所示约束条件, 便可确定 l_5 和 l_6 的一组可行解(l_5 为连杆 DH 的长度, 其包含于式(6)中)。

特别地, 式(4)中的约束条件还可通过杆长直接进行约束, 即

$$\begin{cases} a_{l5} \leq l_5 \leq b_{l5} \\ a_{l6} \leq l_6 \leq b_{l6} \end{cases} \quad (7)$$

式中, a_{li} 和 $b_{li} (i=1, 2)$ 分别为给定的杆长上下限, 可通过分步给定的方式逐步缩小范围。

(3) 形成第二个/第三个三副杆。在连杆 CD 的基础上, 添加连杆 CE 和 DE , 形成三副杆 CDE , 如图 2d 所示, 约束条件可表示为

$$(x_{Hi} - x_{Ei})^2 + (y_{Hi} - y_{Ei})^2 \leq r_{H-E}^2 \quad i=1, 2, \dots, n \quad (8)$$

式中, r_{H-E} 为约束范围, 即八杆机构 D 点坐标与 H 点坐标差值的允许范围。 (x_{Ei}, y_{Ei}) 为八杆机构 E 点在机构处于不同位置时的坐标, 可表示为

$$\begin{cases} x_E = l_2 \cdot \sin \alpha_1 - l_7 \cdot \sin(\alpha_1 + \alpha_3 + \alpha_4 + \theta_2) \\ y_E = -l_2 \cdot \cos \alpha_1 + l_7 \cdot \cos(\alpha_1 + \alpha_3 + \alpha_4 + \theta_2) + \frac{1}{2} l_1 \end{cases} \quad (9)$$

式中, l_7 为连杆 CE 的长度, α_4 为 CE 与 CD 的夹角。通过式(8)中所示约束条件, 便可确定 l_7 和 l_8 长度的可行域(l_8 为连杆 DE 的长度, 其包含于三副杆内角的求解过程中)。式(7)同样为外形约束条件, 其也可以通过杆长进行约束

$$\begin{cases} a_{i7} \leq l_7 \leq b_{i7} \\ a_{i8} \leq l_8 \leq b_{i8} \end{cases} \quad (10)$$

式中, a_{li} 和 b_{li} ($i=7, 8$) 分别为给定的杆长上下限。在连杆 DH 的基础上, 添加连杆 DI 和 HI , 形成三副杆 DHI , 如图 2d 所示, 末端点 I 的约束条件可表示为

$$(x_{Hi} - x_{Ii})^2 + (y_{Hi} - y_{Ii})^2 \leq r_{Hi}^2 \quad i=1, 2, \dots, m \quad (11)$$

式中, (x_{Ii}, y_{Ii}) 为末端点 I 的坐标, 可表示为

$$\begin{cases} x_I = -l_4 \cdot \sin(\alpha_2 - \theta_1) - l_{14} \cdot \sin(\alpha_2 - \alpha_5 - \theta_3) \\ y_I = -l_4 \cdot \cos(\alpha_2 - \theta_1) - l_{14} \cdot \cos(\alpha_2 - \alpha_5 - \theta_3) - \frac{1}{2} l_1 \end{cases} \quad (12)$$

式中, l_{14} 为连杆 HI 的长度, α_5 为 HD 与 HI 的夹角。 θ_3 为连杆 BH 和 HD 的夹角, 可通过求解式(6)表示为驱动转角的函数。 (x_{Ii}, y_{Ii}) 为参考点坐标, 即模拟狢狢骨甲折叠过程时的测量值。通过约束 m 个离散的末端点与参考点之间的距离, 可以使得机构末端满足弧形的运动轨迹, 该条件为运动可行性约束条件。通过式(11)中所示约束条件, 便可确定 l_{11} 和 l_{14} 的一组可行解(l_{11} 为连杆 DI 的长度, 其包含于三副杆内角的求解过程中)。

(4) 形成第二个闭环。进一步搭接连杆 EG 和 GI , 可得到第二个四杆机构 $DEGI$, 如图 2e 所示。同样地, 约束条件可表示为

$$(x_{Gi} - x_{Ii})^2 + (y_{Gi} - y_{Ii})^2 \leq r_{G-I}^2 \quad i=1, 2, \dots, m \quad (13)$$

式中, (x_{Gi}, y_{Gi}) 为八杆机构 G 点在机构处于不同位置时的坐标, 可表示为

$$\begin{cases} x_G = l_2 \cdot \sin \alpha_1 - l_7 \cdot \sin Q_1 + l_9 \cdot \sin Q_2 \\ y_G = -l_2 \cdot \cos \alpha_1 + l_7 \cdot \cos Q_1 - l_9 \cdot \cos Q_2 + \frac{1}{2} l_1 \end{cases} \quad (14)$$

式中, $Q_1 = \alpha_1 + \alpha_3 + \alpha_4 + \theta_2$, $Q_2 = Q_1 + \alpha_6 + \theta_4$ 。 α_6 为 CH 与 HD 的夹角, l_9 为连杆 EG 的长度。 θ_4 为 DE 与 EG 的夹角, 可通过求解如下矢量方程, 表示为驱动转角 θ_1 的函数。

$$DE + EG + GI + ID = 0 \quad (15)$$

由此便可确定 l_9 和 l_{10} 的一组可行解(l_{10} 为连杆 GI 的长度, 其包含于式(15)中)。其也可以通过杆长直接进行约束。

在此基础上, 添加连杆 EF 和 GF , 形成最后一个三副杆 EFG 。 F 点的约束条件可表示为

$$(x_{Fi} - x_{Ii})^2 + (y_{Fi} - y_{Ii})^2 \leq r_{F-I}^2 \quad i=1, 2, \dots, m \quad (16)$$

式中, (x_{Fi}, y_{Fi}) 为八杆机构 F 点在机构处于不同位置时的坐标, 可表示为

$$\begin{cases} x_F = l_2 \cdot \sin \alpha_1 - l_7 \cdot \sin Q_1 + l_{12} \cdot \sin Q_3 \\ y_F = -l_2 \cdot \cos \alpha_1 + l_7 \cdot \cos Q_1 - l_{12} \cdot \cos Q_3 + \frac{1}{2} l_1 \end{cases} \quad (17)$$

式中, $Q_3 = \alpha_1 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_6 + \alpha_7 + \theta_2 + \theta_4$ 。 α_7 为 GE 与 EF 的夹角, l_{12} 为连杆 EF 的长度。由此便可确定 l_{12} 和 l_{13} 的一组可行解(l_{13} 为连杆 GF 的长度, 其包含于三副杆内角的求解过程中)。其也可以通过杆长直接进行约束。

(5) 形成第三个闭环。进一步搭接连杆 AJ 和 JF , 可得到五杆机构 $ACEFJ$, 如图 2(f)所示。约束条件可表示为

$$(x_{Hi} - x_{Ji})^2 + (y_{Hi} - y_{Ji})^2 \leq r_{H-J}^2 \quad i=1, 2, \dots, n \quad (18)$$

式中, (x_{Ji}, y_{Ji}) 为八杆机构 J 点的坐标, r_{H-J} 为约束范围, 即八杆机构 J 点坐标与 H 点坐标差值的允许范围。式(18)通过约束 J 点与 H 点之间的距离, 使得外形满足设计要求。 J 点的坐标可表示为

$$\begin{cases} x_J = l_{15} \cdot \sin(\alpha_1 + \theta_5) \\ y_J = -l_{15} \cdot \cos(\alpha_1 + \theta_5) + \frac{1}{2} l_1 \end{cases} \quad (19)$$

式中, l_{15} 为连杆 AJ 的长度, θ_5 为 AC 与 AJ 的夹角, 通过求解如下矢量方程, 可表示为驱动转角 θ_1 的函数。

$$AC + CE + EF + FJ + JA = 0 \quad (20)$$

由此便可确定 l_{15} 和 l_{16} 的一组可行解(l_{16} 为连杆 FJ 的长度, 其包含于式(20)中)。

循环上述过程, 便可在初步得到所需要的仿生狢狢机构构型的同时, 初步得到连杆长度的可行域。

由于每次连杆搭接后确定的一组杆长可作为下一步求解的已知条件,设计效率得到了提高。

(6) 目标值的接近过程。由于上述求解过程最终得到的是杆长范围,因此可通过约束范围(r_H 、 r_{H-D} 、 r_{G-I} 、 r_{G-F} 、 r_{H-E} 、 r_{H-J} 、 r_I)的逐层设定,使得杆长结果快速逼近目标值。在第一次循环过程中,约束范围可取较大值,由此可初步得到连杆长度可行域。缩小约束范围,以上一步求得的连杆长度可行域作为输入条件进行下一次循环,可进一步缩小连杆长度的可行域。通过上述过程,可最终将杆长限定在较小范围内,为最终优化提供参考。

单自由度八杆仿生犭狢机构的设计流程如图3所示。其中,其他约束条件是指当无法依次将所有目标值通过驱动转角进行表示时所需要附加的约束条件,该内容在第3节进行详细说明。

图3 仿生机构设计流程示意图

2 机构设计结果分析

(1) 构型与尺度的初步设计。首先,在给定约束范围条件下,求得构型与尺度的同步设计结果。初始参数如表1所示,为了减少主观因素对结果的影响,将初始杆长范围设定为三个区间,其中 l_2 、 l_3 、 l_5 、 l_8 、 l_{10} 、 l_{13} 的区间为[5 mm, 25 mm], l_7 、 l_9 、 l_{12} 、 l_{16} 的区间为[25 mm, 45 mm], l_4 、 l_6 、 l_{11} 、 l_{14} 、 l_{15} 的区间为[45 mm, 65 mm]。 AB 长度设定为10 mm,驱动转角的转动范围设定为[102°; 170°]。在给定范围内,采用随机搜索的方法进行求解。所用计算机

参数为8核8 GB内存。求得500组解,得到每组解的平均时间约为30.3 s。

表1 机构设计初始参数

						mm
r_H	r_{H-D}	r_{G-I}	r_{G-F}	r_{H-E}	r_{H-J}	r_I
16	16	16	16	16	16	10
I_1	I_2	I_3	H_1	H_2	H_3	
(95, -10)	(70, -62)	(0, -83)	(50, 6)	(45, -15)	(35, -40)	

(2) 目标值的逼近过程。约束范围设定如表2所示,约束范围的给定目标为使得机构的外形更满足犭狢的骨甲外形特征(较大的长度/宽度比)。初始杆长范围不变,每次循环求得的连杆长度可行域作为下一步求解的初始范围。每步分别求得500组解,平均运行时间分别为30.3 s、89.2 s和104.9 s。连杆长度可行域的变化如图4所示。图中,对于每一个连杆,从左到右分别表示初始范围、第一步循环求得的范围和第二步循环求得的范围。从图中可以看出,大部分杆长的范围相对于初始给定的范围有较为明显的减小,最终被限定在一个较小的范围内。

表2 约束范围分步设定参数

	第一步	第二步	第三步
$r_H, r_{H-D}, r_{G-F}, r_{H-E}, r_{H-J}/\text{mm}$	16	12	8
r_I/mm	10	6	2
分步运行时间/s	30.3	89.2	104.91
一次运行时间/h		>12

图4 连杆范围变化示意图

求解结束后 H 点和 I 点的约束结果如图 5 所示。在式(2)和式(11)所述约束条件中, 上述两个点通过固定参考点进行约束。从图 5 中可以看出, H 点和 I 点的实际坐标点在参考点较小的约束范围内(圆形区域), 运动轨迹也满足设计要求, 证明了计算结果的正确性。

图 5 约束结果示意图

在第一步和第三步求得的结果中任取一组解, 所对应的构型如图 6 所示。其中, 第三步求得构型所对应的杆长如表 3 所示。从图 6 中可以明显看出, 在满足运动可行性的条件下, 第三步所对应的仿生机构的构型在外形上具有更大的长宽比, 更符合设计要求。

图 6 一组可行构型示意图

表 3 一组可行解的杆长参数(对应第三步结果) mm

l_2	l_3	l_4	l_5	l_6
8.85	5.41	51.29	7.34	49.24
l_7	l_8	l_9	l_{10}	l_{11}
44.31	5.35	37.66	13.87	45.62
l_{12}	l_{13}	l_{14}	l_{15}	l_{16}
32.98	5.20	52.03	53.93	32.89

特别地, 若直接将约束范围设定在较小区域内(表 2 中第三步), 而初始杆长范围仍以第一组杆长范围作为输入, 求得每组解平均时间大于 12 h。运行所需时间与分步求解过程相比大幅增加。这说明

本文所提出的方法的可行性。从结果上来看, 由于一次运行的约束条件与分步运行时最后一步的约束条件相同, 因此构型在结果上相差不大, 均能够满足设计要求。

3 条件选取对设计结果的影响分析

3.1 连杆搭接顺序的影响

对于八杆仿生机构, 当连杆的搭接顺序发生变化时, 约束条件可能也会相应变化, 从而影响最终结果。例如, 图 2 所示连杆搭接顺序为先形成两个四杆闭环机构, 最后形成五杆闭环机构。若在图 2d 所示的构型基础上, 先搭接连杆 EF 和 FJ , 则形成五杆闭环机构 $ACEFJ$, 如图 7a 所示, 这与图 2e 所示的连杆搭接过程存在较大差异。从约束条件上来看, 式(18)所示约束条件不发生变化, 但式(16)所示约束条件需改为

$$(x_{li} - x_{Fi})^2 + (y_{li} - y_{Fi})^2 \leq r_{I-F}^2 \quad i=1, 2, \dots, m \quad (21)$$

即 F 点坐标改为以 I 点为参考点。在图 2 所示搭接顺序中, 五杆机构 $ACEFJ$ 的 θ_6 (AC 与 CE 的夹角)和 θ_7 (CE 与 EF 的夹角)已知, J 点和 F 点的坐标可直接表示为驱动转角 θ_1 的函数。当先搭接连杆 EF 和 FJ 时, θ_7 未知, 铰链 J 点和 F 点的坐标无法直接由驱动转角进行表示, 这会导致无法直接确定相关连杆长度, 从而影响可行域的求解。

(a) 第二个生成闭环为五杆闭环机构

(b) 第一个生成闭环为五杆闭环机构

图 7 连杆搭接顺序变化示意图

为此, 可初步设定 θ_7 的范围, 在此基础上进行求解。在图 7a 基础上, 进一步增加连杆 HG 、 GI 和 GF , 形成最终构型。对于最后形成的四杆机构 $EDIG$, 存在 $\angle CDH$ 和 $\angle DEG$ 两个输入角度, 任选其中一个角度为输入, 在此基础上, 对四杆机构进

行求解,并通过给定的约束条件进行分析。当所有连杆搭接结束后, θ_7 可由驱动转角进行表示

$$\theta_7 = f(\theta_1) \quad (22)$$

将求得的校对范围 θ_7 与初始给定的范围进行比较,当两个范围具有较大交集时,可认为结果满足要求。

此外,也可能在连杆搭接过程中首先形成闭环五杆机构,如图 7b 所示,可采用相同方法进行分析。上述过程会影响求解的难度,但对最终结果影响不大(均满足约束条件)。因此,连杆搭接顺序应以求解简便为目标。

3.2 约束条件选取的影响

在上述分析过程中,外形约束条件的给定方式并不唯一。例如,在第 2 节分析中, D 点、 E 点和 J 点的位置约束均以 H 点为参考,因此,在机构处于结束状态时,上述四个点均集中于圆弧的中点处。为了使得机构在结束位置更接近于半圆形状,分别将 E 点、 H 点和 J 点的参考点均布于半圆弧上,如图 8 所示。在此条件下,通过本文所提出的设计方法求得的机构构型如图 8 所示,所对应的杆长如表 4 所示。从图中可以看出,与图 6 相比, E 点、 H 点和 J 点通过均匀分布,使得机构在结束状态下的外轮廓线更接近于圆弧。

图 8 可行构型示意图(E 、 H 、 J 参考点坐标改变)

表 4 一组可行解的杆长参数(E 、 H 、 J 参考点坐标改变)

mm				
l_2	l_3	l_4	l_5	l_6
9.01	6.11	52.81	11.87	44.23
l_7	l_8	l_9	l_{10}	l_{11}
20.16	28.63	57.94	19.21	48.65
l_{12}	l_{13}	l_{14}	l_{15}	l_{16}
59.14	6.73	56.04	71.84	21.29

除了对外形起关键作用的参考点外,其他铰链点的约束条件也并不唯一。例如,考虑到 F 点为非保证外形特征的关键点,可将式(16)所示约束条件改为 F 点到连杆 DI 的距离

$$\frac{|Ax_F + By_F + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \leq l_F \quad (23)$$

$$A = y_D - y_I \quad B = -(x_D - x_I)$$

$$C = -x_I(y_D - y_I) + y_I(x_D - x_I)$$

l_F 为参考值。式(23)通过将 F 点限制在连杆 DI 附近而确保构型的外形特征。

此外,还可增加其他约束条件。例如,为了保证机构外表面的光滑性,可设定约束条件为

$$\begin{cases} \beta_{a1} \leq \beta_1 \leq \beta_{b1} \\ \beta_{a2} \leq \beta_2 \leq \beta_{b2} \end{cases} \quad (24)$$

式中, β_1 为连杆 AJ 和 JF 的夹角, β_2 为连杆 BH 和 HI 的夹角,分别如图 2f 所示。 β_{a1} 和 β_{b1} 分别为机构初始状态时的上下限,可取较小值。式(24)表示连杆 JF 和 BH 分别相对连杆 AJ 和连杆 CH 顺时针转动一个较小角度。

3.3 运动链选取的影响

八杆机构有 16 种不同的基本运动链,选取不同的运动链,所得到的构型也存在较大差别。例如,根据本文所提出的设计方法,分别选取不同的运动链,得到的可能构型如图 9 所示。从图 9 中可以看出,机构基本满足设计要求。

特别地,本文所提出的设计方法不仅可用于设计仿生抓钩机构,还可设计其他仿生机构。例如,为模仿部分昆虫翅膀的收展过程,可设计仿生翅膀机构。约束条件包括:① 从外形上能够在收起状态近似两杆折叠,在伸开状态近似一条直线;② 为了节省运动空间,末端近似为直线运动。利用本文所提出的方法,设计得到的一种可行构型如图 10 所示。

图 9 可行构型示意图(改变运动链)

图 10 八杆仿生翅膀机构示意图

与现有研究所提出的连杆机构构型与尺度同步设计方法相比^[19], 本研究考虑到八杆机构的连杆及铰链点较多, 且与被模仿对象之间的异构增加了设计难度这一问题, 依据仿生机构的运动及外形特征, 分类给出了运动可行性及外形约束条件, 设计依据更加明确。同时, 本文通过逐步缩小约束条件的方式将杆长限定在较小范围内, 代替了较为复杂的优化算法, 通过多步迭代提高了设计效率。此外, 本文较为详细地讨论了初始条件的选取对八杆仿生机构设计结果的影响, 为不同类型仿生机构的设计提供了一定的参考。

4 结论

为了提高单自由度八杆仿生机构的设计效率, 提出了一种构型与尺度同步设计方法。

(1) 在选定运动链和机架的基础上, 分层搭接连杆并以不等式的形式给出运动可行性与外形约束条件, 这使得上一步的杆长可作为下一步分析的已知值。循环上述过程, 在初步得到构型的同时, 可得到所有杆长的可行域, 实现了构型与尺度的一体化设计。

(2) 为了快速逼近目标值, 可逐步缩小约束条件的范围, 并以上一循环得到的杆长可行域作为下一循环的初始参数。与直接给定较小约束范围相比, 该可提高设计效率, 快速将杆长限定在较小范围内, 为后续的优化研究提供了有益的参考。

(3) 连杆搭接顺序、约束条件及基本运动链的选取并不唯一。其中, 搭接顺序主要影响求解难度,

对构型结果影响较小; 约束条件及基本运动链的差异会导致得到不同的构型及尺度参数。在仿生机构设计过程中, 可根据设计难度、限制因素等相关条件进行选取, 以设计出满足要求的仿生机构。

参 考 文 献

- [1] 王国彪, 陈殿生, 陈科位, 等. 仿生机器人研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2015, 51(13): 27-44.
WANG Guobiao, CHEN Diansheng, CHEN Kewei, et al. The current research status and development strategy on biomimetic robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(13): 27-44.
- [2] LEI J, YU H, WANG T. Dynamic bending of bionic flexible body driven by pneumatic artificial muscles (PAMs) for spinning gait of quadruped robot[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(1): 11-20.
- [3] XU K, ZI P, DING X. Gait analysis of quadruped robot using the equivalent mechanism concept based on metamorphosis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32(1): 31-41.
- [4] ZHANG Z, ZHAO J, CHEN H, et al. A survey of bioinspired jumping robot: Takeoff, air posture adjustment, and landing buffer[J]. Applied Bionics and Biomechanics, 2017(1): 4780160.
- [5] NOH M, KIM S W, AN S, et al. Flea-inspired catapult mechanism for miniature jumping robots[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2012, 28(5): 1007-1018.
- [6] MO X, GE W, WANG S, et al. Mechanical design and dynamics simulation of locust-inspired straight line four-bar jumping mechanism[J]. Mechanism and Machine Science, 2017, 408: 429-442.
- [7] ZHANG Z, YANG Q, GUI S, et al. Mechanism design for locust-inspired robot with one-DOF leg based on jumping stability[J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 133: 584-605.
- [8] ZHANG Z, YANG Q, ZHAO J, et al. Kinematic synthesis method for the one-degree-of-freedom jumping leg mechanism of a locust-inspired robot[J]. Science China-Technological Sciences, 2020, 63(3): 472-487.
- [9] 严佳, 何广平. 仿青蛙变体移动机器人设计与分析[J]. 北方工业大学学报, 2017, 29(2): 69-75.
YAN Jia, HE Guangping. Design and analysis of frog-inspired biomimetic variant robot[J]. Journal of North China University of Technology, 2017, 29(2): 69-75.

- [10] HALDANE D W, PLECNIK M M, YIM J K, et al. Robotic vertical jumping agility via series-elastic power modulation[J]. *Science Robotics*, 2016, 1(1): eaag2048.
- [11] HALDANE D W, YIM J K, FEARING R S. Repetitive extreme-acceleration (14-g) spatial jumping with Salto-1P[C]// *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2017: 3345-3351.
- [12] 黄鹏. 平面多环耦合机构构型综合理论与技术的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
- HUANG Peng. Research on the structural synthesis theory and Technology of the planar multi-loop coupled mechanisms[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016.
- [13] LEE H J, YOON Y S. Automatic method for enumeration of complete set of kinematic chains[J]. *JSME International Journal Series C-Dynamics Control Robotics Design and Manufacturing*, 1994, 37(4): 812-818.
- [14] PLECNIK M M, HALDANE D W, YIM J K, et al. Design exploration and kinematic tuning of a power modulating jumping monopod[J]. *Journal of Mechanisms & Robotics*, 2017, 9(1): 011009.
- [15] SOH G S, YING F T. Motion generation of planar six- and eight-bar slider mechanisms as constrained robotic systems[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2015, 7(3): 031018.
- [16] SONAWALE K H, MCCARTHY J M. Synthesis of eight-bar linkages by constraining a 6R loop[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2016, 105: 337-351.
- [17] 段旭洋, 王皓, 赵勇, 等. 基于嵌套粒子群算法的平面机构尺度综合与构型优选[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(13): 32-39.
- DUAN Xuyang, WANG Hao, ZHAO Yong, et al. Dimensional synthesis and optimal type selection of planar mechanisms based on nested particle swarm optimization[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(13): 32-39.
- [18] GUI S. Identification design of one-DOF eight-bar based on limb movements[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, 142: 103592.
- [19] SHEN Z F, ALLISON G, CUI L. An integrated type and dimensional synthesis method to design one degree-of-freedom planar linkages with only revolute joints for exoskeletons[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2018, 140(9): 092302.
- [20] FUNKE L W, SCHMIEDELER J P. Simultaneous topological and dimensional synthesis of planar morphing mechanisms[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2017, 9(2): 021009.

作者简介: 张自强, 男, 1987年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为仿生机器人、机器人机构学。

E-mail: zhangzhiqiang@bjut.edu.cn

赵京(通信作者), 男, 1961年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为冗余度机器人、机器人机构学。

E-mail: zhaojing@bjut.edu.cn