基于压电振动驱动的快速旋转软体驱动器

徐聪¹, 闫英博², 刘思雨², 诸骏¹, 刘益伦^{2*}, 吴化平^{1*}

1. 浙江工业大学机械工程学院, 杭州 310014;

2. 西安交通大学航天航空学院, 西安 710049

* 联系人, E-mail: yilunliu@mail.xjtu.edu.cn; wuhuaping@gmail.com

2020-07-03 收稿, 2020-07-20 修回, 2020-07-22 接受, 2020-07-23 网络版发表

国家自然科学基金(11972323)、浙江省自然科学基金(LR20A020002)和浙江省省属高校基本科研业务费专项资金(RF-B2019004)资助

摘要 软体驱动器由于具有可实现大变形、柔性接触、人体友好等特性, 在机器人、生物医学器件、驱动器件等领域具有重要的应用价值. 然而, 目前的软体驱动器大多基于弯曲、伸缩、扭转等变形形式, 无法实现连续旋转运动. 本文从无肢动物获得灵感, 提出一种基于压电振动驱动的新型可旋转软体驱动器, 通过圆形压电双晶片为硅胶软体结构提供激励力, 诱导软体结构底部倾斜触角阵列与地面摩擦产生圆周方向的转矩, 驱动该软体结构实现快速旋转运动. 结合理论和有限元模拟分析旋转软体驱动器在激励作用下的受力及运动机理, 并通过实验研究频率和电压对其旋转性能的影响. 结果显示, 在压电双晶片产生的激励力作用下, 该驱动器可实现连续旋转运动, 最高旋转速度可达到118.3 r/min, 高于目前报道的软体驱动器的旋转速度, 有望应用于驱动机械手和移动机器人等.

关键词 软体驱动器, 压电双晶片, 振动, 旋转, 运动机制

软体驱动器是一种柔软、可实现大变形的驱动系统, 区别于一般由电机、轴承、齿轮、铰链等刚性构件组成的传统刚性驱动器. 软体驱动器通常由软材料制作而成, 理论上具有无限自由度、承受大变形、连续变形、柔顺接触等优点^[1,2]. 因此, 软体驱动器在易碎物体的抓取及搬运、复杂非结构化环境下运动等方面具有明显的优势^[3].

目前, 软体驱动器的基本运动形式主要有伸缩^[4-8]、弯曲^[9-14]、扭转^[15,16]以及旋转^[17]. 其中, 旋转软体驱动器在机械手、移动机器人等领域具有重要应用前景, 吸引了越来越多研究人员的关注. 目前, 对于旋转软体驱动器的研究往往通过扭转变形实现. Jiao等人^[15]开发了一种单腔扭转驱动器, 通过多个单腔扭转驱动器的组合, 可以实现在平面内、管道内爬行以及驱动小车运动. Yang等人^[16]提出了一种由弹性聚合物制作的中空扭转结构, 当该结构受到气压均匀压缩时,

可以发生可逆的扭转变形, 进而用来驱动机械手、小车以及船桨. 虽然扭转变形可实现旋转驱动, 但无法实现连续的旋转运动, 限制了其应用范围. Gong等人^[17]利用3D打印材料和柔性材料结合, 提出了一种气动驱动的旋转软体驱动器, 其通过顺序驱动圆周布置的可膨胀转子实现旋转运动, 可用于软体车轮. 虽然气动可以驱动该软体驱动器连续旋转, 但速度较慢, 无法满足实际应用, 故亟须设计一款能够实现快速旋转的软体驱动器.

自然界中许多无肢动物(如蛇、蠕虫等)通过身体表面的刚毛与环境产生非对称摩擦力, 能够实现往一个方向运动. 由此获得灵感, 许多刚毛机器人得以开发. 振动驱动的刚毛机器人可通过驱动表面刚毛结构振动实现定向运动. Majewski等人^[18]提出了一种压电振动驱动的微型刚毛机器人, 可以实现平面内的直线运动. Hua等人^[19]将刚毛结构布置在圆柱外表面, 其在

引用格式: 徐聪, 闫英博, 刘思雨, 等. 基于压电振动驱动的快速旋转软体驱动器. 科学通报, 2020, 65: 3585–3592

Xu C, Yan Y B, Liu S Y, et al. A fast rotary soft actuator driven by piezoelectric vibration (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 3585–3592, doi: 10.1360/TB-2020-0826

激励力的作用下可以实现在管道内的直线运动. 本文从无肢动物获得灵感, 提出一种基于压电振动驱动的新型可旋转软体驱动器, 通过理论和有限元模拟分析了该驱动器在激励力作用下的受力及运动机理, 研究了施加激励力的幅值与角频率对驱动旋转性能的影响, 并通过实验验证了有限元仿真结果.

1 旋转软体驱动器设计及制作

如图1(a)所示, 该旋转软体驱动器由两部分组成: 振动源及软体刚毛结构. 合理的振动源可以为该驱动器提供适宜的激励力. 本文需要一种可以产生高频振动的振动源, 且需具有一定的驱动力. 目前, 可以产生振动的驱动源主要有气压^[20]、振动电机^[21]、压电陶瓷^[22,23]、介电弹性体^[24]. 气压驱动具有变形大、驱动力大等优点, 但通常需要外接气压泵或液压泵, 故较适合于非无线的场景, 比如助力康复手套^[25]. 介电高弹体具有大变形、响应速度快、质量轻的特点, 但介电高弹体驱动需要几千伏的高压驱动, 对设备安全性要

求较高^[26]. 相对于振动电机, 压电材料能够实现高频振动, 且具有质量轻、成本低等优点, 故采用压电双晶片作为旋转软体驱动器的振动源.

振动驱动的刚毛机器人通过压电双晶片产生的振动驱动刚毛上下运动, 由于刚毛倾斜排列, 上下振动过程中会与地面产生非对称摩擦力(向前摩擦力大于向后摩擦力), 驱动机器人朝一个方向推进. 本文中将阵列倾斜刚毛沿圆周方向布置, 当旋转软体结构的圆端面受到均匀分布的周期性激励力时, 该结构会沿着刚毛倾斜方向产生摩擦力, 从而可以提供旋转的驱动力.

旋转软体驱动器的刚毛结构采用注模法获得. 先将液态硅胶倒入3D打印模具中, 该模具如图1(b)中I所示, 硅胶材料是美国Smooth-On的Dragon Skin30; 然后将其放入60°C烘箱中, 固化20 min后, 将模具从烘箱取出, 揭下固化后的硅胶即为软体结构, 其实物图如图1(b)中II所示. 最后用双面胶将软体结构与压电双晶片黏接在一起, 得到旋转软体驱动器. 图1(b)中III和IV分别展示了压电双晶片(直径5 cm、厚0.92 mm)和旋转软体驱动器的实物图, 压电双晶片重9 g, 旋转软体驱动器总重约13.3 g.

图1 (网络版彩色)旋转软体驱动器三维模型示意图(a)及实物(b)
Figure 1 (Color online) 3D model (a) and entity (b) of the rotary soft actuator

2 旋转软体驱动器运动建模及分析

2.1 旋转软体驱动器建模

旋转软体驱动器可以看作由质量为 m 的主体与 n 个不计质量的刚毛构成, 刚毛的扭簧刚度为 k . 图2(a)展示了该驱动器的刚毛截面图, 刚毛的长度为 l , θ_0 为驱动器的刚毛未发生变形时的初始倾斜角, θ 为变形后的倾斜角. 压电双晶片可为旋转软体结构提供周期性的激励力, 假设激励力 $F = F_0 \cos \omega t$ 作用在驱动器上端面. F' 是

图2 (网络版彩色)旋转软体驱动器的刚毛截面受力示意图(a)及力学建模(b)

Figure 2 (Color online) Schematic diagram of bristle cross-section force (a) and mechanical modeling (b) of the rotary soft actuator

激励力 F 作用在单个触角上的力, f 为地面对驱动器的摩擦力, N 为地面对驱动器的正压力。

假设驱动器与地面的摩擦为滑动摩擦, 由图2(b)知:

$$z = l \sin \theta, \dot{z} = l \dot{\theta} \cos \theta, \ddot{z} = l \ddot{\theta} \cos \theta - l \dot{\theta}^2 \sin \theta. \quad (1)$$

对整个驱动器, 在竖直方向有

$$m \ddot{z} + F_0 \cos \omega t - N = 0. \quad (2)$$

由单个刚毛的力矩平衡可知:

$$k(\theta - \theta_0) + fl \sin \theta - N' l \cos \theta = 0, \quad (3)$$

其中, N' 为单个刚毛受到地面的正压力, 可表示为

$$N' = \frac{N}{n} = \iint_A \sigma_z dS, \quad (4)$$

其中, A 为单个刚毛与地面的接触面积。

摩擦力 f 可由式(5)得到:

$$f = \iint_A \tau_a dS = \mu N' \operatorname{sgn}(r \dot{\alpha} + l \dot{\theta} \sin \theta), \quad (5)$$

其中, μ 为刚毛与地面之间的滑动摩擦系数, $r \dot{\alpha}$ 为驱动器的旋转速度, $l \dot{\theta} \sin \theta$ 为刚毛绕 O_1 的转动速度在水平面的投影。

旋转软体驱动器受到的摩擦力扭矩为

$$M = J \dot{\omega} = \iint_D \mathbf{r} \times \tau_a dS, \quad (6)$$

其中, J 为该驱动器的转动惯量, D 为所有刚毛与地面的接触面积, $\mathbf{r}$ 为 τ_a 至圆心 O 的矢径。

本文给出了该旋转软体驱动器处于滑动摩擦下的控制方程。由于驱动器的刚毛由软材料制作而成, 实际驱动器刚毛受到地面的接触压力和摩擦力并不均匀, 很难通过理论分析驱动器的变形过程和摩擦力分布情况, 因此后续通过有限元对驱动器进行分析。

2.2 旋转软体驱动器有限元分析

采用ABAQUS有限元软件对旋转软体驱动器的运动和受力情况进行分析。旋转软体结构材料的密度设置为 1200 kg/m^3 , 杨氏模量为 0.56 MPa , 泊松比为 0.49 。在该结构的圆端面中心参考点施加周期性的激励力 $F = 0.1 \cos(500t)$ 。由于整个分析过程中, 与驱动器接触的地面处于静止状态, 故将地面设置为刚体。驱动器和地面之间设为摩擦接触, 摩擦系数为 0.5 。驱动器的刚毛和圆端面分别采用六面体单元和四面体单元进行网

格划分。图3(a)是施加在旋转软体驱动器上的激励力和地面对驱动器的接触力随时间的变化曲线。可以看到, 当时间大于 22.2 ms 后, 接触力具有明显的周期规律。

取其中一个周期($I \sim V$)进行分析。结合图3(a)~(c)可知, 在 $22.2 \sim 24 \text{ ms}$ 内, 随着激励力增大, 驱动器向下运动, 倾斜的刚毛受力产生弯曲变形, 刚毛与地面接触点有向后运动趋势, 但没有滑动, 产生沿径向分布的向前摩擦力, 此时与旋转方向同向的静摩擦力引起的扭矩是该旋转软体驱动器的驱动力来源。在此阶段, 驱动器刚毛接触面上一点的速度为 0 , 且受地面接触压力不断增加, 同时摩擦力引起的扭矩也不断增加, 其方向与旋转方向相同(图3(c))。在 24 ms 时, 驱动器的接触力最大, 对应的摩擦应力也处于最大值, 摩擦剪应力分布如图4(b)所示。在 $24 \sim 26.4 \text{ ms}$ 内, 激励力继续增大, 当增大到足够克服最大静摩擦的作用后, 刚毛存在一个向前的微小滑移, 表现为运动速度急剧上升, 此时摩擦力由静摩擦变为滑动摩擦, 故接触压力急剧下降, 且摩擦力矩也随之减小, 方向由顺时针变为逆时针。在 $26.4 \sim 27 \text{ ms}$ 内, 由于激励力减小, 驱动器向下振动速度减小, 直至速度为 0 , 此时旋转软体驱动器滑动摩擦变为静摩擦, 接触压力和摩擦力矩增大。该阶段由于摩擦力引起的扭矩变化不大, 故在图4对应阶段表现出的摩擦剪应力分布相似。在 $27 \sim 34.8 \text{ ms}$ 内, 驱动器被压弯的刚毛恢复未变形时的状态, 存在明显的向前滑移。如图4(e)所示, 此时摩擦剪应力沿顺时针方向, 表现为摩擦扭矩阻碍驱动器运动。

由于驱动器的刚毛由软材料制作而成, 因此在激励力作用下其受地面的接触力并不均匀, 该驱动器的接触压强分布云图如图5(a)所示。图5(b)展示了该旋转软体驱动器的旋转速度与施加激励力频率关系的有限元结果。可以看到, 驱动器的旋转速度随施加激励力频率的增加先增加, 后逐渐减小。当驱动器的结构参数为 $\theta=60^\circ$ 、 $l=7 \text{ mm}$ 、 $d=1.6 \text{ mm}$, 施加力幅值为 0.1 N , 角频率为 10^3 rad/s 时, 驱动器的转速可达到 55 r/min 。从图5(c)可以看出, 该软体驱动器的转速随施加激励力幅值的增加先增加, 后下降。当驱动器的结构参数为 $\theta=60^\circ$ 、 $l=7 \text{ mm}$ 、 $d=1.6 \text{ mm}$, 施加幅值力为 0.36 N , 角频率为 10^3 rad/s 时, 驱动器的转速可达到 113.5 r/min 。从模拟结果看, 其性能较好, 故选取该结构参数的驱动器进行后续实验研究。

3 旋转软体驱动器实验

实验平台由信号发生器(AFG 31000, Tektronix有

图3 (网络版彩色)旋转软体驱动器的运动特性。(a) 激励力和接触力随时间的变化曲线; (b) 速度和摩擦力矩随时间的变化曲线; (c) 一个振动周期内旋转软体驱动器接触应力云图和刚毛变形示意图

Figure 3 (Color online) Moving characteristics of the rotary soft actuator. (a) The curves of excitation force and contact normal force with time; (b) the curves of velocity and friction moment with time; (c) contours of contact stress and bristle's deformation of the rotary soft actuator in one vibration cycle

限公司)、电压放大器(ATA-2042, 西安安泰电子科技有限公司)、数码摄像机(EOS 80D, Canon有限公司)、坐标纸、二维升降台组成。电压放大器先将信号发生器发出的激励信号进行放大, 然后将激励信号施加在驱动器上。为了测量驱动器的旋转角度, 在驱动器上标明箭头, 并将其置于坐标纸上, 该坐标纸的每小格夹角为 15° 。使用数码相机同步拍摄驱动器的运动过程, 然后根据驱动器转过一周所需时间计算驱动器的旋转

速度。

图6为旋转软体驱动器在施加电压峰值 V_{p-p} 为400 V、频率为1400 Hz时驱动器转过一周的动态图。可以看到, 驱动器能够较为准确地绕着固定轴转动, 箭头方向表示不同时刻对应的角度。

为了探究电压和频率对驱动器旋转性能的影响, 根据模拟结果, 用刚毛参数为 $\theta=60^\circ$ 、 $l=7$ mm、 $d=1.6$ mm的旋转软体驱动器进行实验, 测量其在不同

图4 (网络版彩色)旋转软体驱动器摩擦剪应力分布。(a) 22.2 ms; (b) 24 ms; (c) 26.4 ms; (d) 27 ms; (e) 34.8 ms

Figure 4 (Color online) Friction shear stress distribution of the rotary soft actuator. (a) 22.2 ms; (b) 24 ms; (c) 26.4 ms; (d) 27 ms; (e) 34.8 ms

频率和电压下的转速,如图7所示。可以看到,当施加频率超过700 Hz后,该旋转软体驱动器的旋转速度存在明显的规律,即其呈现先增大后减小的趋势。造成这种现象的可能原因是,当外加电压接近驱动器的共

振频率时,旋转软体驱动器有较大的转速。当电压 V_{p-p} 为400 V、频率为1400 Hz时,该驱动器最大转速可达到118.3 r/min,与激励力角频率 10^3 rad/s、幅值0.36 N下有限元模拟得到的驱动器转速113.5 r/min相

图 5 (网络版彩色)旋转软体驱动器的接触应力云图及角频率和力幅值对转速的影响。(a) 旋转软体驱动器的接触应力分布;(b) 0.1 N 激励力作用下转速随角频率变化曲线;(c) 10^3 rad/s 激励力作用下转速随载荷的变化曲线

Figure 5 (Color online) Contours of the rotary soft actuator's contact stress and the effects of angular frequency and force amplitude on rotation speed. (a) Contact stress distribution of the rotary soft actuator; (b) curves of rotation speed with angular frequency under 0.1 N excitation force; (c) curves of rotation speed with load under 10^3 rad/s excitation force

图 6 (网络版彩色)旋转软体驱动器不同时刻的位置。(a) 0 s; (b) 0.11 s; (c) 0.23 s; (d) 0.35 s; (e) 0.46 s

Figure 6 (Color online) Positions of the rotary soft actuator at different time. (a) 0 s; (b) 0.11 s; (c) 0.23 s; (d) 0.35 s; (e) 0.46 s

图 7 (网络版彩色)旋转软体驱动器转速随频率和电压的变化曲线

Figure 7 (Color online) Curves of rotation speed of the rotary soft actuator with frequency and voltage

近, 验证了数值分析结果。相对于现有的扭转驱动器^[15,16]、旋转软体驱动器^[17]以及刚性旋转驱动器^[27,28], 本文基于压电振动驱动的旋转软体驱动器具有较高转速。

4 结论

本文设计了一种基于压电振动驱动的快速旋转软体驱动器。通过运动建模和数值模拟对旋转软体驱动

器进行了运动机理分析, 并通过实验对其旋转性能进行了研究. 该驱动器通过压电双晶片产生振动驱动旋转软体结构的刚毛周期性下弯和上弹运动, 在刚毛向下弯曲运动过程中产生的静摩擦力大于刚毛向上弹起运动过程中产生的滑动摩擦力, 从而产生了净驱动力,

进一步在高频激励力作用下实现快速旋转. 当旋转软体驱动器施加电压 $V_{p,p}$ 为400V、频率为1400 Hz时, 其旋转速度可达到118.3 r/min. 此类旋转软体驱动器有望在高性能移动机器人、机械手及人工关节等设计开发中有所应用.

参考文献

- Li T F, Li G R, Liang Y M, et al. Review of materials and structure in soft robotics (in Chinese). *Chin J Theor Appl Mech*, 2016, 48: 756–766 [李铁风, 李国瑞, 梁艺鸣, 等. 软体机器人结构机理与驱动材料研究综述. *力学学报*, 2016, 48: 756–766]
- Rus D, Tolley M T. Design, fabrication and control of soft robots. *Nature*, 2015, 521: 467–475
- Wang T M, Hao Y F, Yang X B, et al. Soft robotics: Structure, actuation, sensing and control (in Chinese). *J Mech Eng*, 2017, 53: 1–13 [王田苗, 郝雨飞, 杨兴帮, 等. 软体机器人: 结构、驱动、传感与控制. *机械工程学报*, 2017, 53: 1–13]
- Li S, Vogt D M, Rus D, et al. Fluid-driven origami-inspired artificial muscles. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2017, 114: 13132–13137
- Rafsanjani A, Zhang Y, Liu B, et al. Kirigami skins make a simple soft actuator crawl. *Sci Robot*, 2018, 3: UNSPeaar7555
- Seok S, Onal C D, Cho K J, et al. Meshworm: A peristaltic soft robot with antagonistic nickel titanium coil actuators. *IEEE-ASME Trans Mechatron*, 2012, 18: 1485–1497
- Verma M S, Ainla A, Yang D, et al. A soft tube-climbing robot. *Soft Robot*, 2018, 5: 133–137
- Rogoz M, Dradrach K, Xuan C, et al. A millimeter-scale snail robot based on a light-powered liquid crystal elastomer continuous actuator. *Macromol Rapid Commun*, 2019, 40: 1900279
- Arazoe H, Miyajima D, Akaike K, et al. An autonomous actuator driven by fluctuations in ambient humidity. *Nat Mater*, 2016, 15: 1084–1089
- Mao S, Dong E, Jin H, et al. Gait study and pattern generation of a starfish-like soft robot with flexible rays actuated by SMAs. *J Bionic Eng*, 2014, 11: 400–411
- Tang Y, Zhang Q, Lin G, et al. Switchable adhesion actuator for amphibious climbing soft robot. *Sci Robot*, 2018, 5: 592–600
- Shepherd R F, Ilievski F, Choi W, et al. Multigait soft robot. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108: 20400–20403
- Wang Z P, He B, Liu X H, Development of soft manipulator based on ionogel (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 2637–2646 [王志鹏, 何斌, 刘新华, 等. 离子液凝胶软体驱动器操作手. *科学通报*, 2016, 61: 2637–2646]
- Wei S J, Wang T Y, Gu G Y. Design of a soft pneumatic robotic gripper based on fiber-reinforced actuator (in Chinese). *J Mech Eng*, 2017, 53: 29–38 [魏树军, 王天宇, 谷国迎. 基于纤维增强型驱动器的气动软体抓手设计. *机械工程学报*, 2017, 53: 29–38]
- Jiao Z, Ji C, Zou J, et al. Vacuum-powered soft pneumatic twisting actuators to empower new capabilities for soft robots. *Adv Mater Technol*, 2019, 4: 1800429
- Yang D, Mosadegh B, Ainla A, et al. Buckling of elastomeric beams enables actuation of soft machines. *Adv Mater*, 2015, 27: 6323–6327
- Gong X, Yang K, Xie J, et al. Rotary actuators based on pneumatically driven elastomeric structures. *Adv Mater*, 2016, 28: 7533–7538
- Majewski T, Szwedowicz D, Majewski M. Locomotion of a mini bristle robot with inertial excitation. *J Mech Robot*, 2017, 9: 061008
- Hua Y, Konyo M, Tadokoro S. Design and analysis of a pneumatic high-impact force drive mechanism for in-pipe inspection robots. *Adv Robot*, 2016, 30: 1260–1272
- Kim D W, Kim J I, Park Y L. A simple tripod mobile robot using soft membrane vibration actuators. *IEEE Robot Autom Lett*, 2019, 4: 2289–2295
- Bai S, Xu Q, Qin Y. Vibration driven vehicle inspired from grass spike. *Sci Rep*, 2013, 3: 367–385
- Ma G, Xu M, Zhang S, et al. Active vibration control of an axially moving cantilever structure using PZT actuator. *J Aerosp Eng*, 2018, 31: 04018049
- Kim D G, Hao Z, Ueda J, et al. A 5 mg micro-bristle-bot fabricated by two-photon lithography. *J Micromech Microeng*, 2019, 29: 105006
- Kajiwa I, Kitabatake S, Hosoya N, et al. Design of dielectric elastomer actuators for vibration control at high frequencies. *Int J Mech Sci*, 2019, 157–158: 849–857
- Polygerinos P, Wang Z, Galloway K C, et al. Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation. *Robot Auton Sys*, 2015, 73: 135–143
- Lin Y Q. Research on key technology of fluid driven modular soft robot (in Chinese). Doctor Dissertation. Hangzhou: Zhejiang University, 2019 [林杨乔. 流体驱动的模块化软体机器人的关键技术的研究. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2019]
- Zhao H W, Wu B D, Liu G S, et al. New type piezoelectric stepping rotary actuator (in Chinese). *J Jilin Univ (Technol Ed)*, 2006, 36: 898–902 [赵宏伟, 吴博达, 刘国嵩, 等. 新型压电步进旋转驱动器. *吉林大学学报(工学版)*, 2006, 36: 898–902]
- Liu J F, Yang Z G, Zhao H W, et al. Novel piezoelectric precision step rotary actuator (in Chinese). *J Jilin Univ (Technol Ed)*, 2006, 36: 673–677 [刘建芳, 杨志刚, 赵宏伟, 等. 新型压电精密步进旋转驱动器. *吉林大学学报(工学版)*, 2006, 36: 673–677]

Summary for “基于压电振动驱动的快速旋转软体驱动器”

A fast rotary soft actuator driven by piezoelectric vibration

Cong Xu¹, Yingbo Yan², Siyu Liu², Jun Zhu¹, Yilun Liu^{2*} & Huaping Wu^{1*}¹ College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;² School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China* Corresponding authors, E-mail: yilunliu@mail.xjtu.edu.cn; wuhuaping@gmail.com

The soft actuator is a soft driving device exhibiting large-deformation ability, which is significantly different from the traditional rigid actuator usually composed of rigid components such as motors, bearings, gears, hinges and so on. Soft actuators are usually made of soft materials; theoretically, they have the advantages of infinite motion freedom, continuous deformation, and compliant contact. Therefore, the soft actuator shows remarkable advantages in grasping and handling of fragile objects or motion in complex unstructured environments. However, most of the previous soft actuators are usually made of the forms of bending, stretching, and twisting deformation, for which it is hard to achieve continuous rotation.

Some limbless creatures, such as snakes and worms, have bristles arranged periodically at a certain angle in nature. When sliding between the bristles and ground caused by vibration of the bristles or deformation of the soft body, the asymmetrical friction force is generated which can drive their forward motion. Based on this idea, an initiative rotating soft actuator, comprised of a piezoelectric bimorph and a soft rotating structure, which is driven by piezoelectric vibration is proposed in this paper. This actuator is composed of a piezoelectric bimorph and a soft rotary structure. The soft rotary structure is an array of inclined bristles arranged uniformly along the circumferential direction, fabricated by 3D printing and injection molding technology. By analyzing the friction force of a single bristle during vibration, the formula of the rotation moment is given. In addition, through finite element analysis of the deformation of the bristles, the contact force and friction force of the actuator in one vibration period are obtained. It shows that the static friction force generated during the downward motion of the bristles is larger than the sliding friction generated during the upward motion of the bristles, so that a net driving rotation moment is gotten. Besides, the effects of the actuation amplitude and frequency of the applied actuation force on the rotation speed of the actuator are studied by finite element analysis, based on which an optimized bristle geometry of $\theta=60^\circ$, $l=7$ mm, and $d=1.6$ mm is selected for subsequent experiments. The effects of voltage and frequency on the rotation performance of the rotary soft actuator are analyzed through experiments, which show that the rotation speed increases first and then decreases with the increasing of actuation frequency when the applied frequency exceeds 700 Hz. Furthermore, when the applied voltage V_{p-p} is 400 V and frequency is 1400 Hz, the rotation speed can reach 118.3 r/min, which is larger than the rotation speed of the soft actuator reported so far.

soft actuator, piezoelectric bimorph, vibration, rotation, movement mechanismdoi: [10.1360/TB-2020-0826](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0826)