

· 研究论文 ·

光诱导运动可控的马兰戈尼微机器人

袁亮¹ 金博闻¹ 孟晓¹ 叶春洪^{1,2,3*}(上海科技大学¹物质科学与技术学院²先进医用材料与医疗器械国家重点实验室 上海 201210)(³上海临床医学中心 上海 201210)

摘要 水面行走是自然界中一种独特的运动形式,然而,构建速度和方向可控的水生软体机器人仍然极具挑战.本研究以疏水性液晶薄膜作为仿生机器人主体,结合响应性液晶弹性体(LCE)作为驱动臂,通过在LCE中负载光热转化剂,在其表面吸附樟脑作为马兰戈尼效应的驱动燃料,构建了一种光驱动的水面行走仿生微机器人.在光驱动下,LCE驱动臂在展开与折叠状态之间切换,从而改变其与液面的距离,进而引起自升华燃料分子在水面的吸附变化.当驱动臂展开靠近液面,吸附增加,区域性表面张力降低,产生马兰戈尼效应,推动微机器人向前运动.相应地,LCE恢复折叠状态,远离水面,驱动燃料分子在水面吸附减少,表面张力梯度减弱,运动停止,实现了光诱导的启停功能.进一步,基于多折叠臂微机器人结构设计,实现了光诱导下运动方向和速度的多自由度可控驱动行为.本研究克服了传统马兰戈尼驱动机器人在运动启停和方向调控方面可控性低的问题,为设计复杂水环境中具有时空可控驱动行为的无绳软机器人提供了新策略.

关键词 仿生驱动器;液晶弹性体;光响应;马兰戈尼效应;可控驱动

引用: 袁亮,金博闻,孟晓,叶春洪.光诱导运动可控的马兰戈尼微机器人.高分子学报,2026,57(10),2268–2281.

Citation: Yuan, L.; Jin, B. W.; Meng, X.; Ye, C. H. Light-triggered marangoni robot with programmable locomotion. *Acta Polymerica Sinica* (in Chinese), 2026, 57(10), 2268–2281.

在众多水生及半水生生物中,水龟凭借其独特的体表结构与运动机制,能够在水面自由站立、快速滑行甚至完成跳跃动作^[1–5].受此仿生启发,研究者开发出多种仿水龟水面行走机器人,并积极探索其在环境适配、监测巡检等领域的应用^[6–9].目前构筑水面行走机器人的核心策略主要分为2类:一类是基于可逆形变材料产生液体反向推力,另一类是基于表面张力梯度引发马兰戈尼效应作为驱动力^[10,11].其中,马兰戈尼效应由水–空气界面的表面张力梯度引起,能够在流体表面产生切向的力^[12–15].马兰戈尼驱动器可以用

简单的界面梯度调控,实现高效、快速的流体控制,拥有响应快、低能耗、自发驱动的优势^[16,17].例如,Cui等^[18]利用溶质马兰戈尼效应,引入聚乙烯醇(PVA)作为燃料,实现了可编程、多部件的水上游泳微机器人的制备,其运动速度可以达到 $18.8\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$.但由于其流动的复杂性,微机器人的运动轨迹很难控制.因此,马兰戈尼水上行走机器人中化学物质的可控释放与运动精准操控,仍是当前该领域面临的核心挑战之一^[19].

近期,研究者们尝试将刺激响应材料引入游

仿生与智能高分子专辑;2026-04-16收稿,2026-05-23录用,2026-07-10网络出版.

基金项目:国家自然科学基金(基金号22375129,22505159,21975160)、上海科技大学“双一流”基金.

* 通信联系人, E-mail: yechh@shanghaitech.edu.cn

本文附有电子支持信息,与正文一并刊登在本刊网站(www.gfzxb.org).

doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.26103; CSTR: 32057.14.GFZXB.2026.7621

泳机器人, 通过电场、磁场、温度等外部调控手段控制化学物质的释放过程, 进而实现运动调控^[19-22]. 其中在各类智能材料中, 液晶弹性体 (LCE) 因兼具液晶材料的各向异性有序特征与高分子弹性体的可逆伸缩能力, 成为构筑新一代响应型软机器人的理想候选材料^[23-26]. LCE 通常由液晶基元与交联网络聚合物组成, 其响应行为来源于液晶有序结构与弹性体之间的相互作用, 即在外界刺激下, 液晶基元可以发生向列相-各向同性的转变, 导致分子有序度下降, 并进一步诱导材料产生可逆的宏观形变^[27-30]. 在此基础上, 将光热染料掺入 LCE 基质中是实现高效光驱动的策略, 该方法将光能转化为热能, 局部触发 LCE 的相转变, 从而实现快速、可控的可逆驱动^[31,32]. 受益于非接触、无线操纵和快速响应等优势, 光热响应 LCE 在水面软体机器人领域展现出重要应用潜力^[33-36]. 因此, 开发兼具快速光响应和高驱动性能的 LCE 基软体驱动器, 对于研发轻量化、无燃料依赖、运动可控的水面行走软体机器人具有至关重要的意义.

本研究设计并制备了一种折叠型 LCE, 通过共混光热染料, 实现了折叠 LCE 在 520 nm 光照下的快速展开 (图 1(a) 和 1(b)). 随后利用 LCE 自身疏水结构赋予的水面漂浮特性和光响应性作为软机器人手臂, 光照下展开后的 LCE 臂通过升华作用释放樟脑并扩散至水面, 降低周围水的表面张力, 表面张力梯度进而为水面机器人提供前进动力, 使其在水面行走 (图 1(c)). 此外, 通过调节光功率密度, 可精准控制 LCE 折叠臂的展开角度, 进而调控释放的樟脑与水面的距离, 最终实现机器人运动速度的灵活调节. 不仅如此, 借助光控的操作自由度, 还实现了水面行走机器人的多向运动与灵活启停. 与已有光控或热控 Marangoni 驱动体系相比, 本研究将光响应 LCE 的可逆形变、樟脑分子的界面动态释放/扩散以及微结构的可设计加工相结合, 实现了从材料响应、界面分子调控到宏观运动行为的多层级功能整合. 该设计不仅赋予传统 Marangoni 驱动体系可远程调控的启停和调速能力, 也为构建具有可编程运动行为的软体界面机器人提供了新的策略.

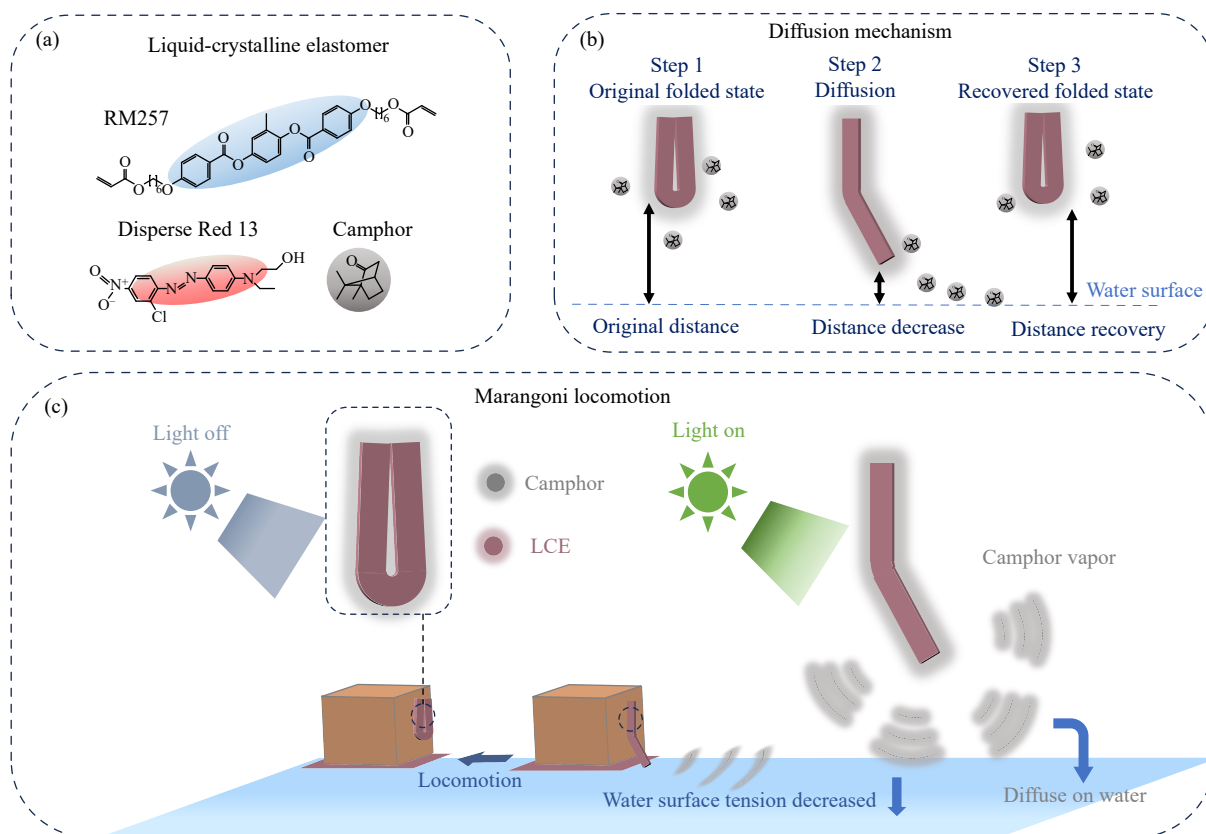


Fig. 1 Schematic illustration of Marangoni effect aquatic surface robot and locomotion of the Marangoni effect propelled LCE robot. (a) Main chemical components of liquid crystal elastomers; (b) The mechanism of camphor released from the LCE, and diffused onto the water surface; (c) The locomotion of Marangoni effect propelled LCE soft robot.

1 实验部分

1.1 主要原料与试剂

1,4-双(4-(3-丙烯酰氧基丁氧基)苯甲酰氧基)-2-甲基苯(RM257, 纯度98%), 购自上海皓鸿生物医药科技有限公司. 3,6-二氧杂-1,8-辛二硫醇(DODT, 纯度97%)和三苯基膦(TPA, 纯度98%), 购自上海泰坦科技股份有限公司. 四(3-巯基丙酸酯)季戊四醇(PETMP, 纯度95%)和分散红13 (DR-13), 购自上海阿拉丁生化科技有限公司. D(+)-樟脑购自中国沃凯生物技术有限公司. 乙醇和二氯甲烷, 均为分析纯, 购自国药集团化学试剂有限公司. 所有化学试剂均直接使用, 未作进一步纯化.

1.2 折叠液晶驱动臂的合成

折叠LCE驱动臂的制备流程: 将RM257 (0.334 mmol)、DODT (0.2 mmol)、PETMP (0.067 mmol)和分散红-13 (DR-13, 2 wt%)混合, 溶解于2 mL二氯甲烷中. 超声分散5 min后, 向上述混合溶液中加入2 wt%的TPA. 随后将该溶液倒入聚四氟乙烯模具(长5.0 cm × 宽5.0 cm × 深1.0 mm)中. 脱气后, 使混合溶液在室温下反应2 h, 得到预交联的LCE薄膜, 将其从模具中取出, 并切割成预设长度和宽度的带状物. 将预交联的LCE薄膜以对折的方式进行折叠, 得到折叠态LCE薄膜, 随后保持其折叠形状在室温下进一步固化48 h, 完成完全交联. 固化过程中, 在内部放置称量纸, 以分隔LCE薄膜不同折叠部分的接触面. 完全交联后, 即可获得目标折叠型LCE驱动臂.

1.3 制备负载樟脑的LCE驱动臂

配制所需浓度的樟脑乙醇溶液. 将LCE薄膜裁剪为合适的形状, 并将其浸没于樟脑乙醇溶液中, 待达到预设的浸没时间后, 在室温(25 °C, 相对湿度40%)条件下, 用镊子夹取LCE边角于空气中干燥2 min直至乙醇完全挥发, 此时, LCE薄膜表面覆盖一层白色的樟脑晶体.

1.4 水上行走机器人的轨迹图绘制

机器人运动的视频及照片通过iPhone 13 pro max拍摄获得. 单向和双向运动的运动轨迹通过animal-tracker软件进行处理和绘制, 相机水平对准运动的软机器人, 统计X轴方向的运动位移;

四向运动的轨迹通过animal-tracker软件进行处理和绘制, 相机以30°俯视角度拍摄, 并统计X轴和Y轴方向的运动位移. 将Y轴位移除以 $\cos 30^\circ$, 得到完整的Y轴位移.

1.5 表征和测试

示差扫描量热(DSC)测试采用配备机械冷却器(RCS 90)的DSC 250型示差扫描量热仪(TA Instruments公司, 德国)进行. 所有样品均装载于密封铝锅中. 所有升降温速率设定为 $10\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, 在氮气氛围下进行3个循环测试, 温度范围为 $-50\sim 200\text{ }^\circ\text{C}$, 所示数据均取自第二个加热循环; 力学性能测试采用INSTRON 5966型万能测试系统进行, 测试速率为 $10\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, 测试方向沿样品长轴方向(样品尺寸为 $40\text{ mm}\times 5\text{ mm}$, 单层); LCE的光热驱动通过波长为520 nm的功率可调激光器(MDL-D-520型, 长春新产业光电技术有限公司)实现; 分散红-13 (DR-13)的吸收光谱通过Nanodrop分光光度计(赛默飞世尔科技公司)测定, 波长范围为300~800 nm, 波长间隔为0.5 nm; 样品的傅里叶变换红外(FTIR)光谱使用VERTEX 70型傅里叶变换红外光谱仪(布鲁克公司)采集, 所有LCE样品的FTIR光谱均采用衰减全反射(ATR)技术测定. 测试在中红外区域($600\sim 4500\text{ cm}^{-1}$)进行, 分辨率为 4 cm^{-1} , 扫描次数为32次; 水的表面张力采用SL200KS型张力计(Kino公司)测定, 通过悬滴法结合杨-拉普拉斯方程拟合计算得到水的表面张力. 水滴体积为20 μL , LCE薄膜裁剪为 $1\text{ cm}\times 1\text{ cm}$ 大小; 光热性能测试以长春新产业光电技术有限公司MDL-D-520型激光器作为光源, 波长调至520 nm, 采用Fluke TiS45型红外热像仪测定薄膜温度. 功率-温度关系测试中, 持续记录温度直至温度达到稳定状态.

2 结果与讨论

2.1 光响应液晶弹性体驱动手臂的可控折叠与展开行为

折叠液晶驱动器通过硫醇-迈克尔加成反应预交联, 形成轻度交联网络, 使前驱液转变为可剥离、可折叠的柔性薄膜, 并掺杂DR-13作为光热转化剂. 之后继续进行硫醇-迈克尔加成反应, 形成高密度三维网络, 固定折叠结构与液晶取

向, 获得稳定的液晶弹性体. 预聚合阶段可提高体系黏度并形成初步网络结构, 有利于薄膜成型、取向调控和后续结构加工; 进一步固化则可提高交联程度, 固定液晶取向和宏观形状, 从而

赋予LCE薄膜稳定的力学性能和可重复的光热响应形变能力. 其详细制备流程如图2(a)所示. 当预交联的LCE薄膜进行折叠时, 会使得LCE的折痕处发生一定程度的拉伸作用, 如图2(i)所

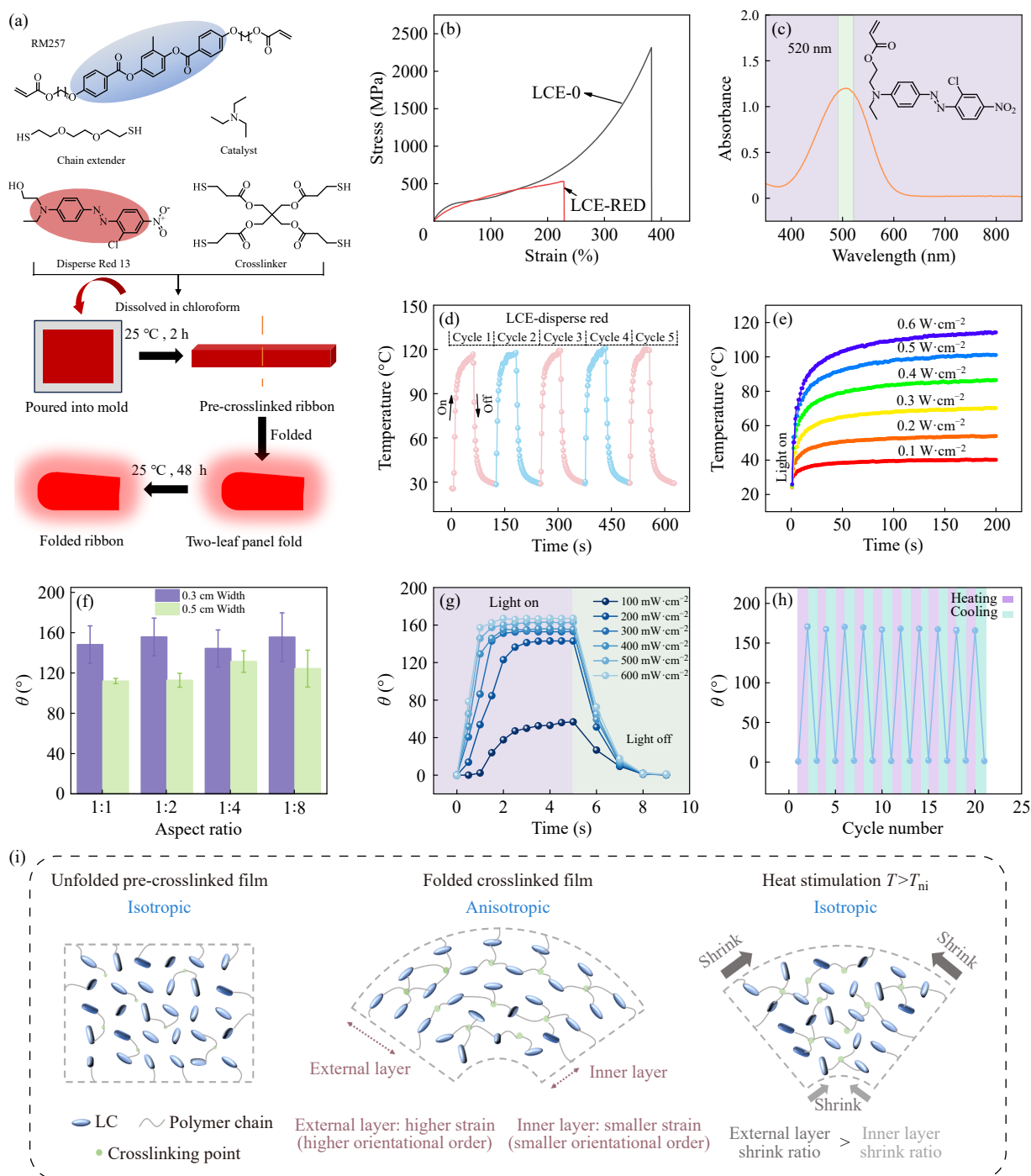


Fig. 2 The properties of LCE actuator. (a) Chemical components and fabrication protocol; (b) Quasi-static stress-strain curves of LCE mixed with DR-13 (LCE-RED) and without DR-13 (LCE-0); (c) Absorption spectra of DR-13 and (d) thermal cycling properties ($0.6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$); (e) Photothermal temperature evolution of the film at varying power densities; (f) Unfolding angle θ of LCE with different aspect ratios (width: length) and widths (LCE thickness is 0.25 mm); (g) Time evolution of unfolding angle θ of LCE films under different light power densities; (h) Photo-thermal cycling performance of LCE; (i) Scheme of the mechanism of responsive LCE under light stimuli.

示, 在发生折叠弯曲时, 外侧的LCE受到更强的拉伸作用, 而位于内侧的LCE几乎没有拉伸, 因此, 在折叠处, 外层的液晶分子受到拉伸后取向程度比内侧液晶分子的取向程度更高, 导致在液晶弹性体薄膜的厚度方向上产生的取向梯度, 这是实现其光致形变的必要条件.

折叠LCE表现出优异的力学性能, 在DR-13的引入后, LCE的弹性模量无显著影响(图2(b)). 傅里叶变换红外光谱(FTIR)测试显示, 代表反应性基团C=C伸缩振动峰与=C-H弯曲振动峰完全消失, 证实了LCE薄膜已实现完全交联(电子支持信息图S3). 示差扫描量热(DSC)测试结果进一步表明, 所制备LCE的清亮点转变温度(T_m)约为50 °C (电子支持信息图S1). 掺杂DR-13后的LCE在紫外可见光光谱中出现了520 nm左右吸收峰, 后续实验将选择520 nm光照来实现光致形变.

在520 nm光的循环照射下, 掺杂DR-13的LCE展现出卓越的光热循环性能, 在0.6 W·cm⁻²的5次光热循环下, 其依然能保持稳定的光热转化效率(图2(c)和2(d)). 此外, LCE的温度可通过调节光功率密度来实现调控, 光功率密度越高, 薄膜达到的温度越高(图2(e)及电子支持信息Movie S1). 当光功率密度为0.3 W·cm⁻²时, 薄膜温度可升至70 °C以上, 可以满足液晶相转变的温度需求.

由于折叠后LCE在厚度上存在取向度的差异(图2(i)), 光照后LCE温度升高, 当温度达到清亮点温度以上时, 液晶基元由有序取向相转变为各向同性相, 导致折叠处LCE沿着取向方向收缩、垂直方向膨胀, 从而释放折叠时存储的弹性应力, 使得LCE展开. 当光照移除后, LCE温度逐渐降低至清亮点以下, 液晶基元的取向有序性恢复, 交联网络回到初始状态, 因此, LCE驱动臂由展开转变为折叠, 且这一过程是多次可逆. 为了研究折叠LCE结构对其形变能力的影响, 制备了不同长宽比、厚度和宽度的折叠LCE, 并加热至 T_m 以上观察其最大展开角度. 如图2(f)和电子支持信息图S13所示, 在厚度为0.25 mm的样品中, 其长宽比并不会显著影响其最大展开角度, 宽度为0.3 cm的LCE最大展开角度达到了150°左右; 然而, 当厚度增至0.4 mm时, 展开角度降至20°~30°, 这一结果说明厚度

是影响LCE展开的主要因素, 通过控制LCE薄膜厚度与宽度, 在0.25 mm厚度、0.3 cm宽、1 cm长的样品中, 热板加热下折叠LCE薄膜能够在4 s内快速展开, 其展开角 θ 从0°接近180°, 并且掺入分散红的LCE并不会影响其最大展开角度(电子支持信息图S2).

不同光功率密度照射可以控制LCE薄膜的温度, 进而影响液晶薄膜内部分子取向, 从而控制折叠LCE的展开角度大小. 在高光功率密度(600 mW·cm⁻²)下, 折叠LCE在1.0 s内展开至(156±4)°而在低光功率密度下, 需要在3.0 s展开至(138±5)°, 在3.0 s时关闭光源, 展开后的LCE重新恢复到折叠态, 恢复过程需要约3.0 s (图2(g)). 不同光功率密度下的最大展开角度表明, 温度升高, 最大展开角度增大, 同时, 温度升高, 展开速度更快. 光热形变循环测试进一步显示了LCE驱动器优异的循环性能与抗疲劳性能, 如图2(h)及电子支持信息Movie S2所示, 对LCE驱动器进行超过10次的光热形变测试, 其依旧拥有优异的可逆形变能力. 基于LCE驱动器优异的可逆形变的优异性能以及角度可调控的性能, 为后续作为水面行走机器人运动行为的调控提供了基础.

2.2 马兰戈尼驱动“燃料”的非接触式扩散改变液面张力

进一步选择樟脑作为马兰戈尼驱动的燃料, 樟脑分子扩散至水面可以显著降低水的表面张力, 产生溶质马兰戈尼效应推动物体前进^[37]. 基于此, 通过将LCE薄膜浸泡于樟脑的乙醇溶液中, 干燥后将樟脑负载于LCE薄膜的表面. 经过乙醇浸泡处理并不会影响LCE薄膜的机械性能(电子支持信息图S5).

首先, 将负载樟脑燃料的LCE薄膜直接放置于水面上, 由于浓度梯度, 其自发地扩散至水中, 产生马兰戈尼效应, 进行驱动. 进一步通过改变浸泡时间、浸泡浓度等, 并测试其稳定运动时的平均速率, 探究樟脑负载量对马兰戈尼运动速率的影响. 当浸泡时间达到120 s后, 其运动速率达到了190 mm·s⁻¹, 继续增加浸泡时间并不会再增加其运动速率; 而改变其浸泡浓度, 当浓度达到0.12 g·mL⁻¹后, 其平均速率不再改变, 说明该浓度下LCE表面负载的樟脑已达到饱和(电子支持信息图S6).

为了验证樟脑作为马兰戈尼驱动“燃料”可以进行轨迹可控的马兰戈尼运动, 将负载有樟脑的LCE薄膜裁成特定的形状, 并在薄膜尾部浸泡负载樟脑, 并将其放置于水面. 不同的形状可以形成不同的运动模式, 比如“顺时针运动、逆时针运动、直线运动、旋转运动”(电子支持信息图S7). 然而, 直接与水面接触的樟脑释放难以控制运动启停和速率, 负载樟脑的薄膜接触水面后会立即持续运动, 直至樟脑完全释放.

为了克服上述困难, 本研究提出了一种与水面非接触式的马兰戈尼驱动新策略: 通过在520 nm光照下使LCE薄膜升温, 负载的樟脑分

子升华并扩散至水面, 降低水表面张力, 在溶质马兰戈尼效应下进行驱动(图3(a)). 同时, LCE温度升高会使樟脑的升华速率提升, 因为升高温度增强了樟脑分子动能与饱和蒸气压, 促进其从固态升华为气体分子^[38].

首先探究了负载樟脑的LCE薄膜在不同温度下的升华性质, 其自身质量随时间的变化(图3(b)和3(c))表明, 在自然条件下樟脑的升华速度缓慢, 在约4000 s后樟脑升华完全, 相比之下, 在80 °C时, 负载樟脑的LCE在150 s后质量几乎不再下降, 即负载的樟脑完全升华, 而50 °C则需约500 s, 通过对其表面进行观察, 也

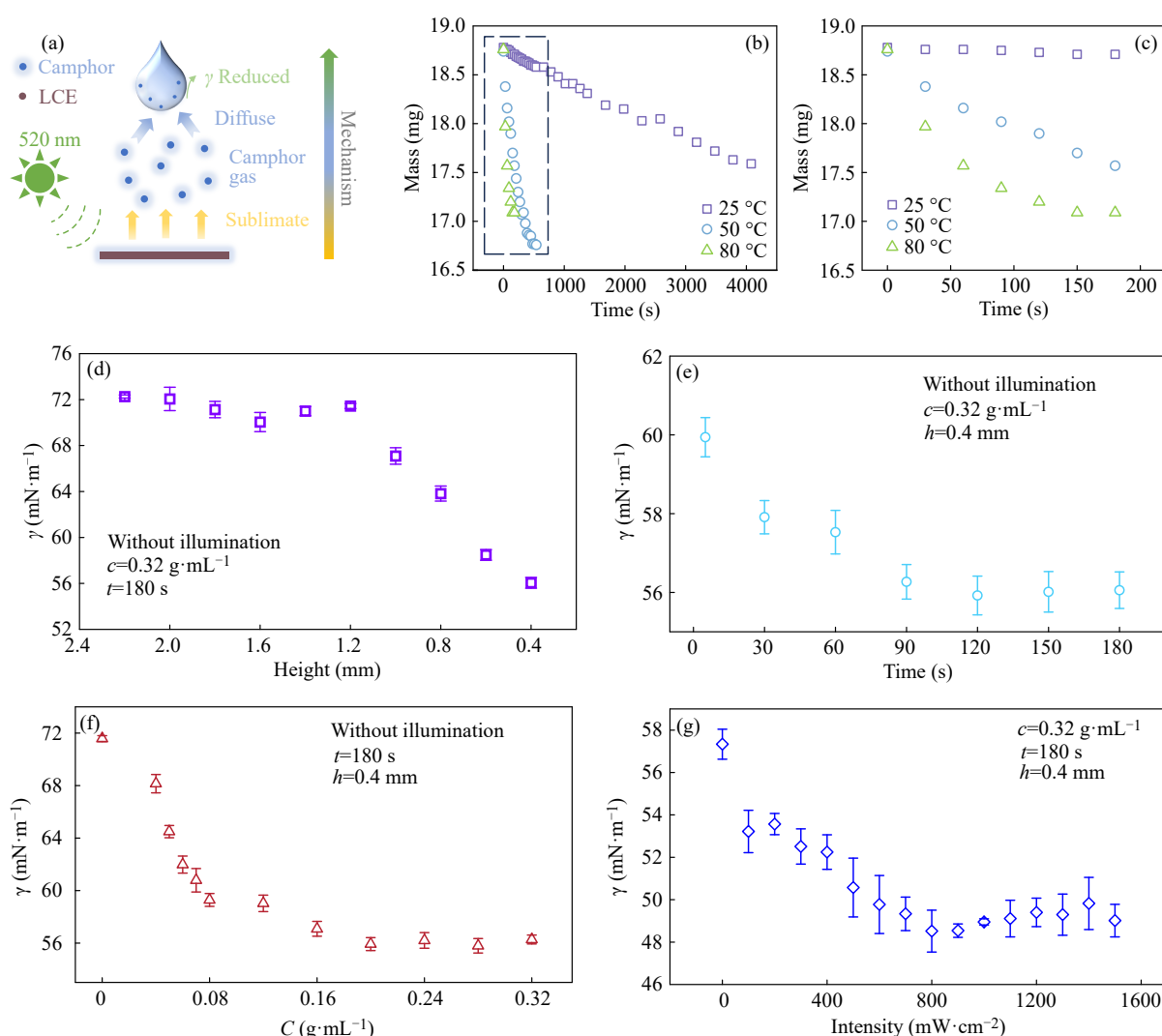


Fig. 3 Aquatic surface robot actuated by Marangoni effect. (a) Schematic illustration of the mechanism of light-driven camphor sublimation inducing surface tension gradient; (b) Mass change of camphor-loaded LCE as a function of time at 25, 50 and 80 °C, Panel (c) shows the zoom in view of the dashed area in (b); (d) Water surface tension as a function of height under non-illumination condition; (e) Interfacial surface tension as a function of time under non-illumination; (f) Interfacial surface tension as a function of camphor concentration under non-illumination; (g) Interfacial surface tension as a function of light power density under illumination.

能清楚地看到LCE表面白色樟脑晶体的升华变化(图电子支持信息S11)。

樟脑升华后的气体可以扩散至水面,从而降低附近水的表面张力,这与负载樟脑的量以及樟脑升华处与水的距离有关^[38,39]。为了研究樟脑负载量以及距离对水表面张力的影响,采用悬滴法及Young-Laplace方程拟合测试水的表面张力,并原位测试不同光强照射下对水表面张力的影响^[39]。首先采用浸泡浓度 $0.32\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 及浸泡时间 180 s 的条件对LCE薄膜负载樟脑,负载后的LCE薄膜置于接触角测量仪的台面中央,改变薄膜正上方水滴与薄膜之间的距离,研究表明当薄膜与液滴距离缩小到 1.2 mm 后,水表面张力开始下降,当距离达到 0.4 mm 后,水的表面张力降低至 $56\text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ (图3(d)),这说明樟脑升华扩散出来的樟脑气体对水表面张力的影响会受到距离的限制,当距离减小到一定值时,樟脑分子才开始扩散至水表面从而开始影响其表面张力;同时,我们还研究了不同樟脑浸泡浓度及时间对水表面的影响,与之前对马兰戈尼速率影响测试结果类似,当浸泡时间达到 120 s ,浓度达到 $0.16\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 后,樟脑负载量达到饱和,对水表面张力的影响也达到最大(图3(e)和3(f))。其中上述测试均在无光照射下进行,当用 520 nm 光照射LCE薄膜时,DR-13光热转换使负载樟脑的LCE升温,同时提升光功率密度可提高温度并加快樟脑升华,进而增强对水表面张力降低能力;在无光照时室温樟脑升华能使水表面张力降至约 $58\text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ 。当用 520 nm 光照后水表面张力会进一步降低,当光功率密度在 $800\text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时表面张力降至 $48\text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$,此后继续增加光功率密度表面张力不再变化(图3(g))。

2.3 光驱动液晶弹性体微机器人的水上运动行为

基于此,我们构建了非接触式的水上行走机器人,以普通LCE薄膜为微机器人主体,LCE薄膜的疏水特性(电子支持信息图S4)能确保装置漂浮于水面上,并减少与水面的阻力;将折叠LCE组装于主体上,作为响应性驱动臂。当使用 520 nm 激光照射时,折叠LCE臂由于负载光热染料,快速升温,达到清亮点后形变展开,使负载樟脑的LCE驱动臂接近水面。此时,受热升华的樟脑分子扩散至水面,降低水面的表面张力,

从而形成表面张力梯度,在马兰戈尼效应下实现驱动。

光热效应一方面促进樟脑升华和扩散,增强浓度梯度型Marangoni驱动;另一方面也产生一定的热Marangoni贡献。为进一步区分二者贡献,以相同光照条件下,未负载樟脑的LCE仿生机器人的位移作为对照实验。结果表明,未负载樟脑的微机器人在光照下可发生LCE驱动臂形变与展开,但整体微机器人未出现明显的水面运动,相关视频见支持信息中的电子支持信息Movie S3。该对照实验说明,仅由光照引起的LCE形变及局部热效应不足以产生显著推进,樟脑分子释放/扩散所建立的水面浓度梯度引起表面张力差,是驱动微机器人持续运动的主要因素。进一步我们通过改变LCE臂的厚度来调控最大展开角度,来调控机器人的运动速率(电子支持信息Movie S4)。我们将不同厚度的LCE臂固定于装置侧壁上,固定LCE臂下端与水面距离为 0.5 cm ,采用 $600\text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 光照射3种不同厚度的折叠LCE臂($0.25, 0.30, 0.40\text{ mm}$),其三者的最大展开角度(θ)分别大于、等于以及小于 90° ,从而通过角度对樟脑扩散进行调控(图4(a)和4(c))。三者的位移曲线表明,当 $\theta < 90^\circ$ 时,装置几乎无前进,此时升华的樟脑与水面距离过远,无法有效降低后方水的表面张力;当 $\theta = 90^\circ$ 时,LCE表面与水的表面开始接近,樟脑扩散至水面使水表面张力降低,形成表面张力梯度,实现速率约为 30 mm/s 的快速运动;当 $\theta > 90^\circ$ 时,LCE与水表面间距进一步减小,进一步增强马兰戈尼效应,速率提升至 $45\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (图4(b)和4(d))。

在前面的研究中,我们发现温度的升高能够加快樟脑的升华,从而进一步影响对水表面张力降低的能力。在樟脑升华过程中,樟脑的升华速率与其饱和蒸气压 P 成正比,而饱和蒸气压随温度遵循Clausius-Clapeyron方程^[40]:

$$V_{\text{sub}} = kP \quad (1)$$

$$\ln P = -\frac{\Delta H_{\text{sub}}}{RT} + C \quad (2)$$

其中, V_{sub} 为升华速率,单位为 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; P 为饱和蒸汽压,单位为 Pa ; k 为比例常数,单位为 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$; H_{sub} 为升华焓(樟脑为正,吸热过程),单位为 $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$; T 为热力学温度,单位为 K ; R 为气体常数,为 $8.314\text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

根据公式,当樟脑的温度越高时, $\ln P$ 越

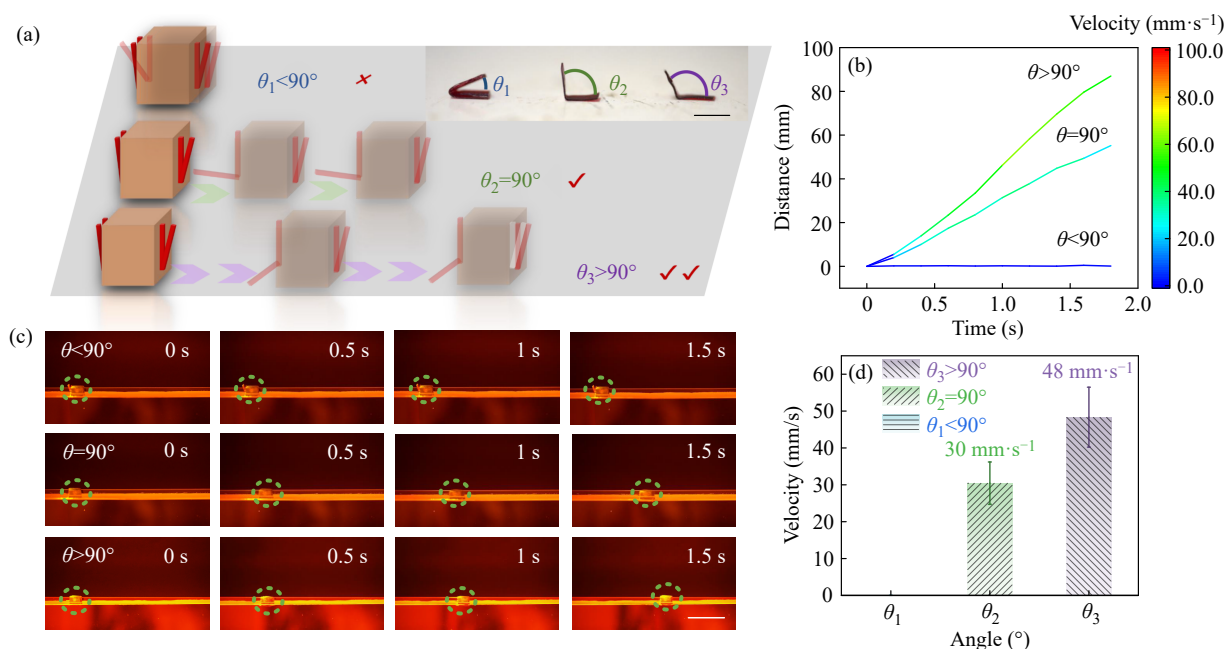


Fig. 4 The influence of LCE film expansion angle on Marangoni effect induced locomotion velocity. (a) Scheme of Marangoni effect propelled LCE robot locomotion at different angles of LCE arm (inset photo: scale bar=1 cm); (b) The movement distance as a function of time of Marangoni effect propelled LCE robot with different expansion angles of the LCE arm; (c) The photographs of the Marangoni effect robot moving process at different angle stage (scale bar=5 cm); (d) Average speed of Marangoni effect robot with different expansion angles LCE (All light power was 600 mW/cm^2 , LCE film was length $0.5 \text{ cm} \times$ wide 0.3 cm , the bottom of LCE is 0.5 cm from water surface).

大, 樟脑的饱和蒸气压越高, 其升华速率越快, 并且这种提升呈指数而非线性关系, 小幅升温即可显著增强其升华速率^[39].

对于相同的 LCE 驱动臂(最大展开角 $\theta > 90^\circ$), 我们使其在不同光功率密度照射下($400 \sim 800 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$)下进行光热驱动(图 5(a)), 并通过实时位移跟踪其运动状态(图 5(c)). 研究表明, 在无激光照射时驱动器始终停留在原点; 在 $400 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 光照射下, 驱动器以 $(7 \pm 4) \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速率缓慢前进, 而当光功率密度增至 $600 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, 升温使樟脑更快释放, 装置运动速度可提升约一个数量级至 $(60 \pm 8) \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 而在 $800 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时装置可以以 $(140 \pm 8) \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 弹射式快速前进(图 5(d)). 实时位移曲线也清楚表明了随着光功率密度的增加, 装置的运动速率不断增加(图 5(b)). 通过光功率密度的调控可实现水上行走机器人的速率的控制, 其控制机制源于可逆形变的 LCE 臂与樟脑的温度依赖性升华释放(电子支持信息 Movie S5). 这种无线、速率可控的水上机器人的速度动态调控范围超过了 20 倍 ($7 \sim 140 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$), 其在可编程货物运输与复杂轨迹执行中可以展现出巨大潜力. 除此之外, LCE

具备复杂形变以及可编程的能力, 能通过预设、图案化设计以及交联密度调控等方式实现更为复杂的可编程形变, 因此, 借助 LCE 复杂形变能力的优势, 未来能进一步拓展微机器人在水面行走的运动模式, 实现在环境更加复杂水域的区域探索、运载方面的应用^[23,24].

2.4 多自由度可控运动的水上驱动行为

为了进一步展现水上机器人的多自由度运动, 以 LCE 驱动器为水上行走机器人的“引擎”、光为“引擎的激活开关”、光功率密度为“油门”, 设计了一种水上混合推进系统装置. 该系统实现了水上机器人的运动方向、速率的双可控推进. 我们将两个负载樟脑的 LCE 驱动臂以相同高度对称安装于漂浮装置的两侧, 当左侧 LCE 驱动臂经 $600 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的光照触发形变展开后释放樟脑时, 将在左侧水界面形成表面张力梯度, 进而推动装置高速向右运动, 而在关闭光照后 LCE 恢复折叠状态, 运动停止. 当右侧的 LCE 驱动臂经 $400 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 光照后, 樟脑的释放会诱导较弱的表面张力梯度, 进行产生较小推力, 以低速向左运动(电子支持信息图 S12(a)及 Movie S6). 通过对装置运动轨迹的绘制, 详细地展现了这种

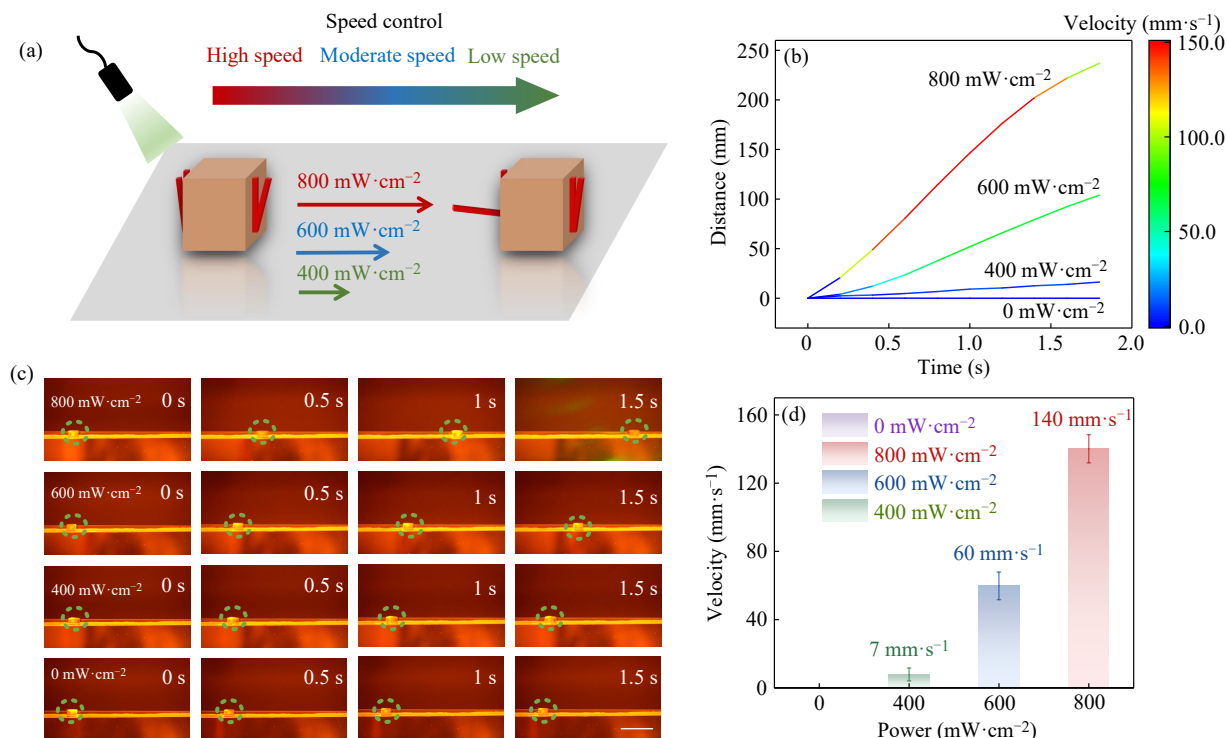


Fig. 5 Light power tuned Marangoni effect locomotion with controllable velocity. (a) Scheme of Marangoni effect robot locomotion under different light power; (b) Moving distance as a function of time of Marangoni effect swimmer under different light power; (c) The photographs of the Marangoni effect robot moving process under different light power (scale bar=5 cm); (d) Average speed of Marangoni effect robot under different light power. (All LCE films expansion angle are above 90°, LCE film was Length 0.5 cm × Width 0.3 cm, the bottom of LCE is 0.5 cm from water surface).

双向运动、速率可控的运动模式(电子支持信息图 S12(b)), 同时在运动过程图(电子支持信息图 S12(c))中也能对比出两次运动的方向、速度差异. 在液晶弹性体微机器人主体的四周各覆盖一个折叠 LCE 臂使推进系统能力扩展至全向导航, 当选择性地照射单个折叠 LCE 驱动臂即可实现沿东、南、西、北 4 个方向的可控推进, 实现光控定向运动(图 6(a)及电子支持信息 Movie S7). 图 6(b)展现了东南西北 4 个方向运动的轨迹图, 通过运动过程图(图 6(c))能清楚地展现该液晶弹性体微机器人的各项运动能力. 因此, 通过简单地贴合, 该光控水面行走机器人实现了多级调控: (1) 通过光照进行触发运动; (2) 通过光功率密度调控推力大小; (3) 通过空间选择性照射实现运动方向控制. 这种多级调控的水上行走机器人在货物运输与可编程轨迹执行应用中有着较大的潜力.

基于马兰戈尼效应的光控水上行走机器人还拥有光控运动启停的功能, 当 520 nm 光照射时, 折叠 LCE 臂展开释放樟脑并推动液晶弹性体微机器人运动, 当撤去光照时, LCE 臂恢复折叠状态, 运动停止(图 7(a)和 7(d)). 通过对液晶弹性体

微机器人循环往复运动 5 次进行运动测试, 其表现出依赖光照的运动开启与关闭(电子支持信息 Movie S8). 由于微机器人在高速运动的过程中, 激光难以对其进行准确跟踪, 为进一步分析微机器人在持续驱动过程中的运动状态, 对其循环运动行为进行了统计, 并对 5 个往复运动循环中每个运动阶段的平均速度进行了统计, 结果显示, 随着循环次数增加, 微机器人每次运动的平均速度逐渐降低, 首次运动过程中的平均速度约为 130 mm·s⁻¹, 在达到第 5 个循环时, 平均速度降低至约 40 mm·s⁻¹, 说明在连续运动过程中樟脑不断升华、释放和扩散, 使水/空气界面的有效浓度梯度逐渐减弱, 从而导致马兰戈尼驱动力和运动速度逐步下降(图 7(b)和 7(c)). 当 LCE 驱动臂收起时, 樟脑负载区域与水面之间的距离增大, 樟脑分子向水/空气界面释放并形成有效浓度梯度的效率明显降低, 因此微机器人的运动停止. 然而, 由于樟脑本身具有挥发性, 即使在驱动臂收起、微机器人处于停止状态时, 樟脑仍会发生一定程度的升华, 该部分非工作状态下的樟脑消耗会影响微机器人的长期驱动寿命. 尽管如此,

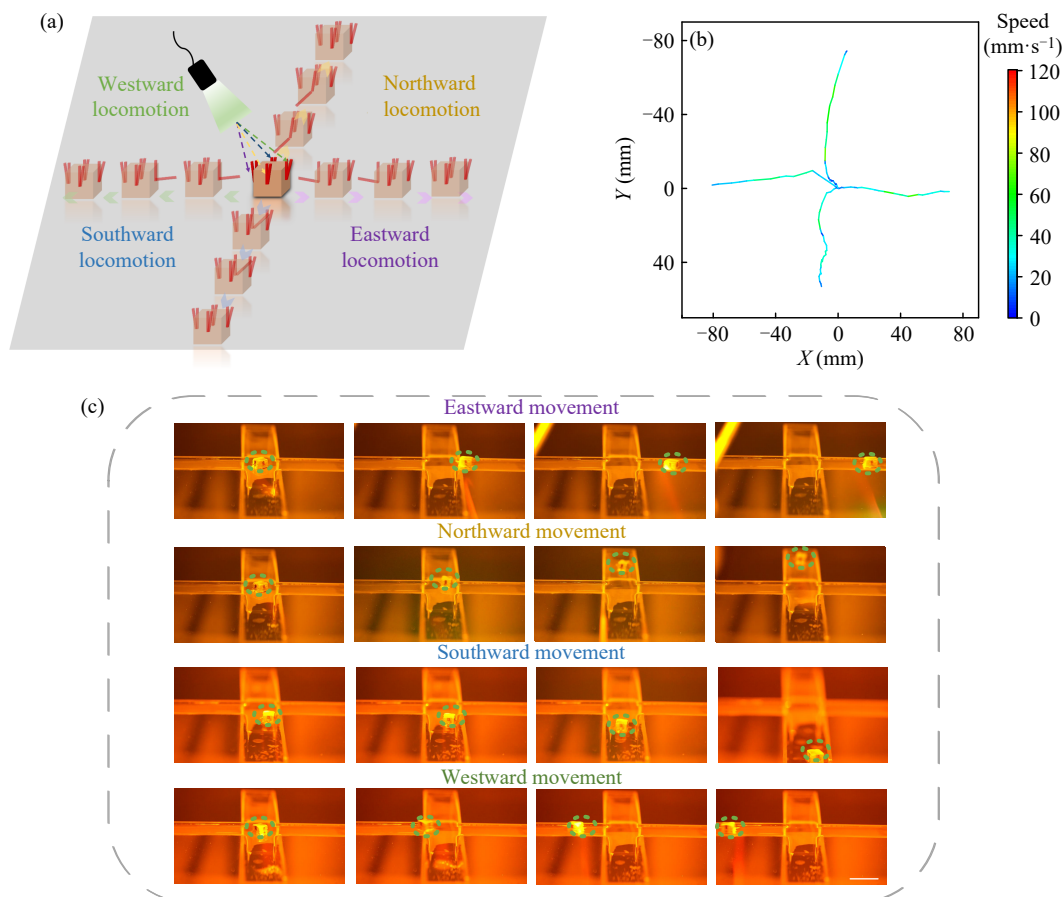


Fig 6 Marangoni effect robot with multi-directional motion. (a) Scheme and (b) moving trajectory of Marangoni effect robot with multi-directional locomotion under light trigger; (c) The video screenshots of the multi-directional Marangoni effect robot moving process (scale bar=5 cm).

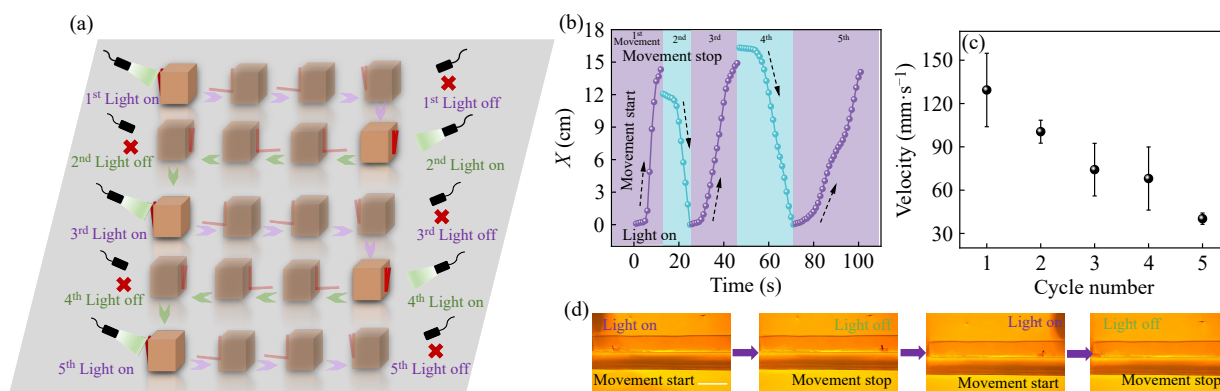


Fig. 7 Marangoni effect robot with controllable “start” and stop. (a) Scheme of Marangoni effect robot with 5 cyclic locomotion under light trigger; (b) The moving distance as time of Marangoni effect robot under different cycle locomotion; (c) Velocity variation under multi-cycle acuation; (d) The video screenshots of Marangoni effect robot cycle locomotion (scale bar=5 cm).

便捷的樟脑负载过程能迅速进行下一次的樟脑吸附, 从而不断进行运动“燃料”的补充. 为进一步评估该微机器人的驱动能力, 通过添加负载的方式测试其水面运动行为(电子支持信息图 S13 和 Movie S9). 结果表明, 微机器人在携带一定负

载后仍能保持可控运动, 但运动速度随着负载质量增加而降低, 说明该体系具有一定的负载驱动能力. 与传统直接依赖光热效应产生表面张力梯度的 Marangoni 驱动体系不同, 本研究体系中光照主要用于调控 LCE 驱动臂的形变状态及樟脑

释放位点与水面的相对距离, 从而实现对 Marangoni 驱动过程的间接调控, 该驱动方式可使机器人在水面行走, 承载负载质量可达单个 LCE 驱动模块自重的约 32 倍以上. 因此, 本文设计的水上马兰戈尼行走机器人不仅拥有速率、方向的可控性, 还能通过光照的开启与关闭控制运动的启停, 燃料的不足也能通过简单的重新负载进行补充, 这为水面机器人在货物运输、区域探索领域有着极其重要的意义.

3 结论

基于液晶弹性体(LCE)开发了一种运动行为可控的马兰戈尼微机器人. 该微机器人将 LCE 的光致形变与低表面张力“燃料”分子的升华及其在水面的吸附过程相结合. 通过在具有光致形变能力的 LCE 驱动臂中负载“燃料”分子, 利用光照调控驱动臂的展开与折叠, 从而调节自升华“燃料”分子在液面的吸附, 改变水面局域表面张力并诱导马兰戈尼效应, 实现 LCE 微机器人的运动启停. 同时, “燃料”分子的升华过程可通过

光功率密度进行调节, 从而实现光照诱导的加速与减速行为, 其最高运动速度可达 $140 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. 进一步, 通过构建具有多个驱动臂的微机器人, 可实现光诱导运动方向的可控调节, 从而获得可控的运动轨迹. 该研究克服了传统马兰戈尼微机器人运动行为通常难以调控的问题, 不仅实现了高速运动, 同时获得了可控的运动轨迹和速度, 不仅如此, Marangoni 驱动体系能够将分子释放、界面张力差异和宏观运动行为相联系, 在微尺度能量转换、自驱动系统、界面输运和水面微操作等方面具有潜在应用价值^[41,42]. 此外, LCE 等软弹性体材料具有良好的刺激响应性、可变形性和结构可设计性, 未来可进一步与可拉伸电子、自修复能源器件或柔性传感系统结合, 发展具有运动、感知和能量供给一体化功能的智能软体机器人^[43-46].

致谢 感谢上海科技大学软物质微纳加工实验室、物质科学与技术学院电镜中心、分析测试中心对各项制备和表征提供的支持.

REFERENCES

- 1 Bush, J. W. M.; Hu, D. L. Walking on water: biolocomotion at the interface. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **2006**, 38, 339-369.
- 2 Wu, H.; Chen, Y. Y.; Xu, W. L.; Xin, C.; Wu, T.; Feng, W.; Yu, H.; Chen, C.; Jiang, S. J.; Zhang, Y. C.; Wang, X. J.; Duan, M. H.; Zhang, C.; Liu, S. L.; Wang, D. W.; Hu, Y. L.; Li, J. W.; Li, E. Q.; Wu, H. G.; Chu, J. R.; Wu, D. High-performance Marangoni hydrogel rotors with asymmetric porosity and drag reduction profile. *Nat. Commun.*, **2023**, 14, 20.
- 3 Lu, G. X.; Zhu, G. Q.; Zhang, Q.; Tian, P.; Cheng, M. J.; Shi, F. A hydrolyzable supra-amphiphile as a Marangoni self-propulsion fuel for efficient macroscopic supramolecular self-assembly. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2023**, 62(15), e202300448.
- 4 Katzschmann, R. K.; DelPreto, J.; MacCurdy, R.; Rus, D. Exploration of underwater life with an acoustically controlled soft robotic fish. *Sci. Robot.*, **2018**, 3(16), eaar3449.
- 5 Aubin, C. A.; Choudhury, S.; Jerch, R.; Archer, L. A.; Pikul, J. H.; Shepherd, R. F. Electrolytic vascular systems for energy-dense robots. *Nature*, **2019**, 571(7763), 51-57.
- 6 Zhang, X. B.; Zhao, J.; Zhu, Q.; Chen, N.; Zhang, M. W.; Pan, Q. M. Bioinspired aquatic microrobot capable of walking on water surface like a water strider. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2011**, 3(7), 2630-2636.
- 7 Yan, J. H.; Yang, K.; Liu, G. F.; Zhao, J. Flexible driving mechanism inspired water strider robot walking on water surface. *IEEE Access*, **2020**, 8, 89643-89654.
- 8 Zhu, H.; Xu, B. R.; Wang, Y.; Pan, X. X.; Qu, Z. H.; Mei, Y. F. Self-powered locomotion of a hydrogel water strider. *Sci. Robot.*, **2021**, 6(53), eabe7925.
- 9 Sun, J.; Li, X. N.; Song, J. L.; Huang, L.; Liu, X.; Liu, J. Y.; Zhang, Z. H.; Zhao, C. L. Water strider-inspired design of a water walking robot using superhydrophobic Al surface. *J. Dispers. Sci. Technol.*, **2018**, 39(12), 1840-1847.
- 10 Mao, J. W.; Han, D. D.; Zhou, H.; Sun, H. B.; Zhang, Y. L. Bioinspired superhydrophobic swimming robots with embedded microfluidic networks and photothermal switch for controllable Marangoni propulsion. *Adv. Funct. Mater.*, **2023**, 33(6), 2208677.

- 11 Yang, X.; Chen, Y. H.; Zhang, X.; Xue, P.; Lv, P. F.; Yang, Y. Z.; Wang, L.; Feng, W. Bioinspired light-fueled water-walking soft robots based on liquid crystal network actuators with polymerizable miniaturized gold nanorods. *Nano Today*, **2022**, 43, 101419.
- 12 Paven, M.; Mayama, H.; Sekido, T.; Butt, H. J.; Nakamura, Y.; Fujii, S. Light-driven delivery and release of materials using liquid marbles. *Adv. Funct. Mater.*, **2016**, 26(19), 3199-3206.
- 13 Fan, X. Y.; Wang, Y. G.; Xie, Y. J.; Xiao, Z. F.; Wang, H. G. Bioinspired superhydrophobic light-driven actuators *via in situ* growth of copper sulfide nanoparticle on cellulose nanofiber. *Chem. Eng. J.*, **2024**, 479, 147614.
- 14 Xuan, H. X.; Guan, Q. B.; Zhang, L. Z.; You, Z. W. Thermoplastic photoheating polymer enables 3D-printed self-healing light-propelled smart devices. *Adv. Funct. Mater.*, **2021**, 31(14), 2009568.
- 15 Liang, Y. L.; Xu, Y. B.; Ye, W.; Yao, D. H.; Chen, Y. H.; Wang, C. Y. Multi-stage hydrogel rockets with stage dropping-off by thermal/light stimulation. *J. Mater. Chem. A*, **2018**, 6(35), 16838-16843.
- 16 White, T. J.; Broer, D. J. Programmable and adaptive mechanics with liquid crystal polymer networks and elastomers. *Nat. Mater.*, **2015**, 14(11), 1087-1098.
- 17 Herbert, K. M.; Fowler, H. E.; McCracken, J. M.; Schlafmann, K. R.; Koch, J. A.; White, T. J. Synthesis and alignment of liquid crystalline elastomers. *Nat. Rev. Mater.*, **2022**, 7(1), 23-38.
- 18 Choi, Y.; Park, C.; Lee, A. C.; Bae, J.; Kim, H.; Choi, H.; Song, S. W.; Jeong, Y.; Choi, J.; Lee, H.; Kwon, S.; Park, W. Photopatterned microswimmers with programmable motion without external stimuli. *Nat. Commun.*, **2021**, 12, 4724.
- 19 Ma, S. D.; Li, X.; Huang, S.; Hu, J.; Yu, H. F. A light-activated polymer composite enables on-demand photocontrolled motion: transportation at the liquid/air interface. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2019**, 58(9), 2655-2659.
- 20 Hu, Z. M.; Fang, W.; Li, Q. Y.; Feng, X. Q.; Lv, J. A. Optocapillarity-driven assembly and reconfiguration of liquid crystal polymer actuators. *Nat. Commun.*, **2020**, 11, 5780.
- 21 Zhang, W.; Jin, K.; Ren, Z.; Li, L.; Chang, L. F.; Zhang, C. C.; Wang, R. R.; Li, B.; Wu, G.; Hu, Y. High-performance MXene/carbon nanotube electrochemical actuators for biomimetic soft robotic applications. *Adv. Funct. Mater.*, **2024**, 34(48), 2408496.
- 22 Chang, L. F.; Wang, D. P.; Huang, Z. S.; Wang, C. F.; Torop, J.; Li, B.; Wang, Y. J.; Hu, Y.; Aabloo, A. A versatile ionomer-based soft actuator with multi-stimulus responses, self-sustainable locomotion, and photoelectric conversion. *Adv. Funct. Mater.*, **2023**, 33(6), 2212341.
- 23 Pang, X. L.; Lv, J. A.; Zhu, C. Y.; Qin, L.; Yu, Y. L. Photodeformable azobenzene-containing liquid crystal polymers and soft actuators. *Adv. Mater.*, **2019**, 31(52), 1904224.
- 24 Kuenstler, A. S.; Chen, Y. Z.; Bui, P.; Kim, H.; DeSimone, A.; Jin, L. H.; Hayward, R. C. Blueprinting photothermal shape-morphing of liquid crystal elastomers. *Adv. Mater.*, **2020**, 32(17), 2000609.
- 25 Guo, H. S.; Ruoko, T. P.; Zeng, H.; Priimagi, A. Hydrogen-bonded liquid crystal elastomers combining shape memory programming and reversible actuation. *Adv. Funct. Mater.*, **2024**, 34(10), 2312068.
- 26 Wernter, H.; Finkelmann, H. Liquid crystalline elastomers as artificial muscles. *E Polym.*, **2001**, 1, 13.
- 27 Tang, Y. F.; Pan, F.; Qin, L.; Yu, Y. L. Adaptive locomotion of pleurotya caterpillar-inspired segmental crawling robots with multiple postures. *Adv. Funct. Mater.*, **2025**, 35(42), 2506987.
- 28 Zhao, X.; Chen, Y.; Peng, B.; Wei, J.; Yu, Y. L. A facile strategy for the development of recyclable multifunctional liquid crystal polymers *via* post-polymerization modification and ring-opening metathesis polymerization. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2023**, 62(21), e202300699.
- 29 黄鑫, 庞馨蕾, 秦朗, 俞燕蕾. 室温光致形变主链型交联液晶高分子纤维执行器. *高分子学报*, **2022**, 53(11), 1324-1331.
- 30 Zhou, X. R.; Jin, B. J.; Zhu, Z.; Wu, J. J.; Zhao, Q.; Chen, G. C. Metal-ligand bonds based reprogrammable and re-processable supramolecular liquid crystal elastomer network. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2024**, 63(44), e202409182.
- 31 Wang, H.; Chen, X. R.; Meng, X.; He, Y. S.; Jin, B. W.; Zhao, X. L.; Ye, C. H. Soft micromotors with switchable motion enabled by 3D-to-3D shape reconfiguration. *Chem. Mater.*, **2024**, 36(9), 4174-4184.
- 32 Shahsavan, H.; Aghakhani, A.; Zeng, H.; Guo, Y. B.; Davidson, Z. S.; Priimagi, A.; Sitti, M. Bioinspired underwater locomotion of light-driven liquid crystal gels. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **2020**, 117(10), 5125-5133.
- 33 Huang, C. Q.; Pinchin, N. P.; Lin, C. H.; Tejedor, I. H.; Scarfo, M. G.; Shahsavan, H.; Pena-Francesch, A. Self-propelled morphing matter for small-scale swimming soft robots. *Adv. Funct. Mater.*, **2024**, 34(52), 2413129.
- 34 Zhao, Y. S.; Xuan, C.; Qian, X. S.; Alsaied, Y.; Hua, M. T.; Jin, L. H.; He, X. M. Soft phototactic swimmer based on self-sustained hydrogel oscillator. *Sci. Robot.*, **2019**, 4(33), eaax7112.

- 35 Li, Z. W.; Myung, N. V.; Yin, Y. D. Light-powered soft steam engines for self-adaptive oscillation and biomimetic swimming. *Sci. Robot.*, **2021**, 6(61), eabi4523.
- 36 Park, S. J.; Gazzola, M.; Park, K. S.; Park, S.; Di Santo, V.; Blevins, E. L.; Lind, J. U.; Campbell, P. H.; Dauth, S.; Capulli, A. K.; Pasqualini, F. S.; Ahn, S.; Cho, A.; Yuan, H. Y.; Maoz, B. M.; Vijaykumar, R.; Choi, J. W.; Deisseroth, K.; Lauder, G. V.; Mahadevan, L.; Parker, K. K. Phototactic guidance of a tissue-engineered soft-robotic ray. *Science*, **2016**, 353(6295), 158–162.
- 37 Karasawa, Y.; Nomoto, T.; Chiari, L.; Toyota, T.; Fujinami, M. Motion modes of two self-propelled camphor boats on the surface of a surfactant-containing solution. *J. Colloid Interface Sci.*, **2018**, 511, 184–192.
- 38 Jin, H.; Marmur, A.; Ikkala, O.; Ras, R. H. A. Vapour-driven Marangoni propulsion: continuous, prolonged and tunable motion. *Chem. Sci.*, **2012**, 3(8), 2526–2529.
- 39 Kim, S.; Kim, J.; Kim, H. Y. Dewetting of liquid film via vapour-mediated Marangoni effect. *J. Fluid Mech.*, **2019**, 872, 100–114.
- 40 Atkins, P.; De Paula, J. *Physical Chemistry*, 10th ed.; Oxford University Press: Oxford, **2014**. 120–125.
- 41 Cheng, M. J.; Zhang, D. Q.; Zhang, S.; Wang, Z. K.; Shi, F. Tackling the short-lived Marangoni motion using a supramolecular strategy. *CCS Chem.*, **2019**, 1(2), 148–155.
- 42 Bai, H. Y.; Chen, R. H.; Lei, I. M.; Wang, Z. J.; Wu, Z. L. Marangoni-effect-driven locomotion of patterned gels with evolved shape changes and varied motion modes. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2026**, 18(3), 6036–6043.
- 43 Li, Z.; Guo, Y.; Liu, X. K. Stretchable and self-healable lithium-ion batteries with all-in-one configuration. *Supramol. Mater.*, **2024**, 3, 100073.
- 44 Tan, M. H.; Tian, P.; Zhang, Q.; Zhu, G. Q.; Liu, Y. C.; Cheng, M. J.; Shi, F. Self-sorting in macroscopic supramolecular self-assembly via additive effects of capillary and magnetic forces. *Nat. Commun.*, **2022**, 13, 5201.
- 45 Li, Q.; Du, H. X.; Chen, Y.; Jiang, C. G.; Han, J. P.; Zheng, Q.; Wang, Z. J.; Wu, Z. L. Dynamic activation of mechanophores in glassy hydrogels with high efficiency and controllability. *Adv. Mater.*, **2026**, 38(20), e23692.
- 46 He, Y. S.; Li, H. Y.; Steiner, A. M.; Fery, A.; Zhang, Y.; Ye, C. H. Tunable chiral plasmonic activities enabled via stimuli responsive micro-origami. *Adv. Mater.*, **2023**, 35(48), 2303595.

Research Article

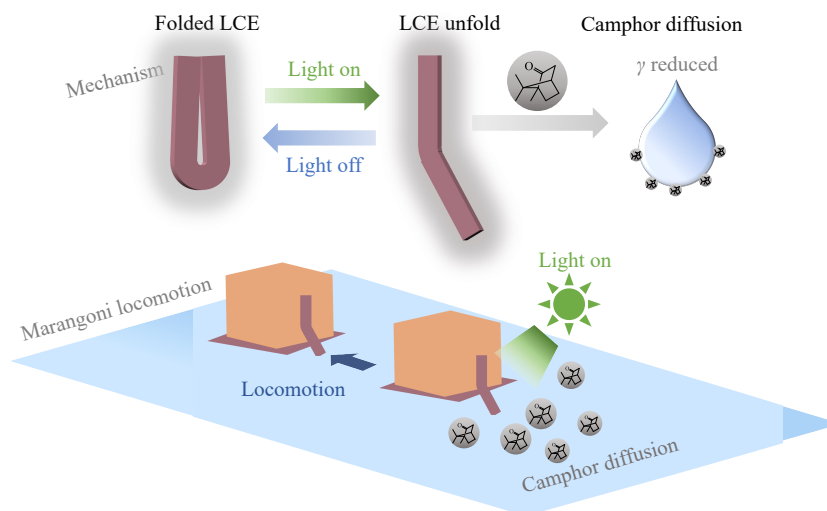
Light-triggered Marangoni Robot with Programmable Locomotion

Liang Yuan¹, Bo-wen Jin¹, Xiao Meng¹, Chun-hong Ye^{1,2,3*}⁽¹*School of Physical Science and Technology*, ²*State Key Laboratory of Advanced Medical Materials and Devices*,
ShanghaiTech University, Shanghai 201210)⁽³*Shanghai Clinical Research and Trial Center, Shanghai 201210)*

Abstract Inspired from nature, developing actuator that can walk on water is attractive, but it still remains challenging to realize controllable motion on the water surface with tunable velocity and direction. Herein, a controllable water-surface walking robot was developed by using a hydrophobic liquid-crystal thin-film phase as the main body, integrating responsive liquid crystal elastomers (LCEs) as actuator arms, incorporating Disperse Red dye into the LCE as a photothermal conversion agent, and adsorbing camphor on the surface as the solute for Marangoni propulsion. In this design, the foldable LCE actuator arm served as the driving unit. Under 520 nm light irradiation, the LCE unfolded, enabling the controlled release of camphor. The resulting Marangoni effect propelled the robot to move unidirectionally on the water surface. By tuning the light intensity, the evaporation rate of camphor could be regulated, thereby allowing control over the Marangoni-driven locomotion speed. When the light was switched off, the LCE returned to its folded state and the motion stops. Furthermore, by arranging multiple foldable LCE actuator arms in different directions on a single robot and precisely controlling their folding/unfolding states with light, both the speed and direction of locomotion could be modulated. This study

* Corresponding author: Chun-hong Ye, E-mail: yechh@shanghaitech.edu.cn

therefore provides a new strategy for untethered soft robots capable of precise spatiotemporal actuation and adaptation to complex aquatic environments.



Keywords Biomimic actuator; Liquid crystal elastomers; Light response; Marangoni effect; Programmable locomotion