

折纸结构及其应用研究科学计量学综述

余晴云, 鄂玉萍

浙江理工大学艺术与设计学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2023年10月19日; 录用日期: 2023年12月13日; 发布日期: 2023年12月21日

摘要

在过去的十年里, 折纸结构及其应用引起了学术界和工业界的广泛关注, 同样给工业设计也带来深远影响。虽然已经有折纸结构在某些领域应用的多篇文献综述, 仍缺乏对其比较系统而全面的梳理分析。以 Web of Science 核心集数据为分析样本, 利用 CiteSpace 可视化分析软件对折纸结构及其应用进行了科学计量学回顾。通过对纳入文献的一般数据分析, 从发文数量、国际研究力量、学科和期刊分布情况层面对当前研究现状进行梳理。同时, 基于对当前研究的共被引网络、聚类和引文爆发的分析等, 总结出机械超材料、机器人和折纸启发设计的新兴趋势。并从设计方法、工业产品设计、机器人和材料四个方面具体分析了三个新兴趋势对于工业设计的影响与启发。研究成果可为折纸结构的相关课题研究以及在工业设计领域的应用提供参考。

关键词

折纸结构, 折纸设计, 科学计量学, 共引分析, CiteSpace, 工业设计

A Scientometrics Review of Origami Structure and Its Applications

Qingyun Yu, Yuping E

School of Art and Design, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang

Received: Oct. 19th, 2023; accepted: Dec. 13th, 2023; published: Dec. 21st, 2023

Abstract

In the past decade, origami structures and their applications have attracted widespread attention from academia and industry, and profoundly impacted the field of industrial design. While the existing literature has provided a relatively comprehensive summary of the applications of origami structures in certain fields, still lacks systematic and comprehensive analysis. Using Web of Science data as sample, the paper conducted a scientometrics review of origami structures and

their applications using CiteSpace software. Through the general data analysis of the included literature, the current research status is summarized from the perspectives of the number of publications, international research strength, disciplines, and journal distribution. Moreover, based on the analysis of the current research, including co-citation network, clustering, and citation burst, emerging trends in mechanical metamaterials, robotics, and origami-inspired design are summarized. And specifically analyzes their impact and inspiration on industrial design from design methods, industrial products design, robots, and materials. The research results can provide valuable reference for future research on origami structures and their applications in industrial design.

Keywords

Origami Structure, Origami Design, Scientometrics, Co-Citation Analysis, CiteSpace, Industrial Design

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

折纸是一种古老的艺术形式, 可以不经剪裁和粘接, 就能将二维平面折叠成三维模型。随着计算机科学和计算几何学等领域的发展, 折纸的概念开始应用于可展结构、柔性电子、生物医学设备、超材料、机器人等多个领域。折纸结构在不同的工程领域产生了广泛应用, 甚至最新的研究进展涉及了跨学科领域, 因此系统地回顾最新的研究进展和挑战是非常必要的。

根据文献检索, 有关折纸及其应用方面的综述文献数量近几年呈增加趋势。然而, 现有综述文献多为针对折纸结构在某些领域的应用成果的总结和技术分析。而对于折纸结构及其应用研究较为全面的综述仍比较欠缺。随着该领域的研究迅速发展, 同时考虑到折纸结构在工业设计领域所具有的不可忽视的重要作用。科学而系统地回顾折纸结构及其应用领域的研究现状, 揭示其新兴趋势, 并对这些趋势在工业设计领域的影响进行深入剖析, 或能为该领域的研究者提供更清晰的视野, 为工业设计领域带来新的启示和可能的发展路径。

2. 研究方法

2.1. 研究工具

研究采用科学计量学的方法。科学计量学是信息学的分支, 是对科学本身进行定量研究的一门新兴学科, 它已被广泛用于评估科学贡献, 分析科学发展, 绘制知识结构, 并确定特定研究领域内的新兴趋势[1]。CiteSpace 是一个经典的科学计量学软件, 能够对科学文本进行挖掘和可视化呈现, 直观地展示出所关注领域科学知识的结构、规律和分布情况, 目前此软件已广泛用于分析研究热点和趋势的变化[2]。本研究选择了 Drexel 大学陈超美教授研发的 CiteSpace 引文空间软件(6.2.2.msi 版本)。

2.2. 数据来源

研究基于 2007 年至 2023 年发表的“折纸结构及其应用”相关出版物。文献检索于 2023 年 3 月 22 日在 Web of Science (WoS)核心合集中进行。为了生成恰当的检索空间, 主要根据两个方面确定搜索策略。

首先, 基于长期以来的多篇综述文章, 收集一些可能的检索短语并进行主题检索: “Origami structures”、“Origami design”、“Origami inspired”、“Origami robots”、“Engineering origami”、“Origami applications”、“Origami approaches”, 这里, 主题检索包括标题、摘要、和附录, 将所有检索短语与“OR”操作相结合, 共获得 5899 份文件。然而, 在检索出的 5899 篇文献中, 发现大量生物学、细胞学文章, 因此利用“Not”操作排除掉主题为“DNA origami”、“Protein structure”、“Cell origami”的文献。最后限制文献类型为论文、会议、综述、在线发表, 共检索代表性论文 2587 篇。

3. 文献分析

本研究的数据来源包括 2007 年至 2023 年期间在 Web of Science 上发现的 2587 篇论文(具体指 2023 年 3 月 22 日)。

3.1. 发文数量年度分布

如图 1 所示, 折纸结构及其应用研究的年发文量总体呈稳定增长趋势。2007~2012 年期间, 年发文量相对较少, 均不超过 50 篇每年。但在 2013~2014 年形成一股研究热潮, 并在 2015 年增幅稍有回落。2016 年为研究的第二个小爆发期, 年增长数首次突破 200 篇。另外, 与 2022 年的 373 篇出版物相比, 今年前 3 个月已发表 63 份出版物, 这也一定程度表明增长已开始放缓。综上, 折纸结构及其应用研究发展大致历经早期研究(2007~2012 年)、快速增长(2013~2017)和平稳增长(2018 年至今)。

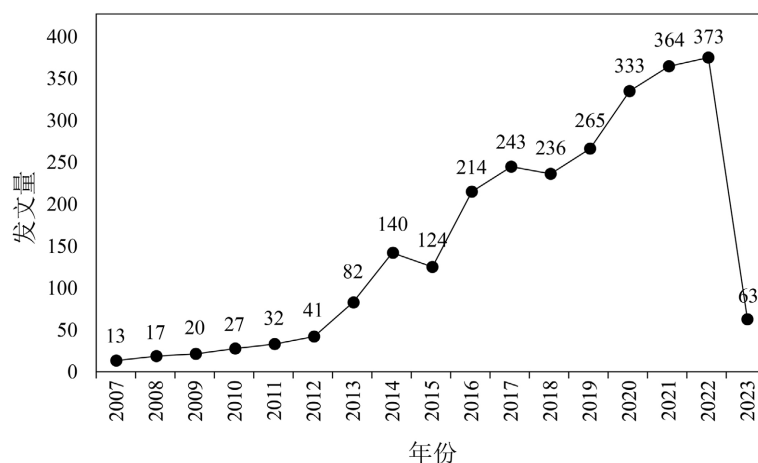


Figure 1. The number of papers published on origami structure and its application over the years

图 1. 折纸结构及其应用研究历年文献发表数量

3.2. 国际研究力量分布

表 1 按文章总数(TA)列出了目前折纸结构及其应用领域发文量最多的 10 个国家或地区。从发文频次来看, 美国的发文量最多, 占到总发文量的 41.3%, 是折纸结构及其应用研究的核心力量。其次是中国和英国。论文的平均引用量(ACPP)代表了论文的影响力, ACPP 方面排名前三的依次为瑞士、美国和新加坡。其中有很大比例为国际合作文章, 占约 42%, 这表明折纸结构及其应用研究已吸引世界范围内研究人员进行合作。值得注意, 国际合作论文的 ACPP 值普遍较高, 这意味着合作可能可以促进更高质量的研究, 有利于不同学术资源的整合、创新以及研究成果的广泛传播。另外日本与瑞士、新加坡呈现了截然不同的两种情况, 日本虽总发文量排名第四, 但 ACPP 值仅为 13.36; 而瑞士和新加坡虽发文量只有

75 和 72 篇, 但 ACP 值排名第一和第三。分析这三个国家的发文数据, 可以发现日本独立研究的文章 ACP 值很低, 且国际合作文章占比较少; 瑞士的国际合作与独立研究文章数目分布较为均衡, 且独立研究文章的 ACP 值高达 30.3, 遥遥领先; 新加坡的国际合作文章占比达到总发表量的 78%, 且其独立研究文章的 ACP 值在 10 个国家中排名第三。由此可见, 国际合作和研究质量本身是影响 ACP 值的关键因素。

Table 1. 10 countries or regions with the largest number of papers
表 1. 发文量最多的 10 个国家或地区

国家/地区	TA	TC	ACPP	H-index	nCC	IC				NIC			
						TA	TC	ACPP	SP	TA	TC	ACPP	SP
美国	1069	32,294	30.21	89	36	278	12,710	45.72	0.26	791	19,584	24.76	0.74
中国	728	15,765	21.66	61	29	313	10,035	32.06	0.43	415	5730	13.81	0.57
英国	231	5202	22.52	37	25	146	3219	22.05	0.63	85	1983	23.33	0.37
日本	225	3007	13.36	28	26	68	1875	27.57	0.30	157	1132	7.21	0.70
韩国	136	3533	25.98	26	15	54	1976	36.57	0.40	82	1558	19.00	0.60
澳大利亚	80	1805	22.56	26	17	57	1375	24.12	0.71	23	430	18.70	0.29
德国	80	1477	18.46	17	20	40	1063	26.58	0.50	40	414	10.35	0.50
瑞士	75	2280	30.40	24	9	31	947	30.55	0.41	44	1333	30.30	0.59
新加坡	72	1962	27.25	19	15	56	1620	28.93	0.78	16	342	21.38	0.22
意大利	71	1263	17.79	17	19	42	1017	24.21	0.59	29	246	8.48	0.41

Table 2. 10 of the most productive institutions
表 2. 最具生产力的 10 家机构

机构	TA	TPR%	TC	ACPP	H-index	国家/地区
Brigham Young University	89	3.440	1667	18.73	22	美国
University System of Georgia	78	3.015	3080	39.49	24	美国
Massachusetts Institutes of Technology MIT	77	2.976	5720	74.29	26	美国
State University System of Florida	75	2.899	948	12.64	17	美国
Tianjin University	74	2.860	1524	20.59	20	中国
University of Oxford	72	2.783	1691	23.49	25	英国
SWISS Federal Institutes of Technology Domain	69	2.667	2248	32.58	24	瑞士
Georgia Institutes of Technology	66	2.551	2843	43.08	21	美国
Harbin Institutes of Technology	66	2.551	935	14.17	14	中国
University of California System	62	2.397	1301	20.98	19	美国

表 2 列出了相关研究发文量最多的 10 家机构。其中有 6 家来自发文量最高的国家——美国，杨百翰大学位居榜首。其次是有两家机构的中国。值得提出，在 ACPP 值有突出表现的瑞士也占据一家。美国的麻省理工学院、佐治亚理工学院和佐治亚州大学系统在 ACPP 方面较为领先。显然，这些顶级机构在研究折纸结构及其应用方面发挥了突出作用。ACPP 除美国外排名最高的是瑞士的苏黎世联邦理工学院，中国的两所机构天津大学和哈尔滨工业大学在此方面表现尚可。

3.3. 学科及期刊分布情况

根据 WOS 文献池统计，共有 79 个研究方向关联到相关研究。表 3 列出了排名前 10 的相关主题及其在该领域中的贡献比例。结果表明折纸结构及其应用研究高度多样化，涉及跨学科领域。通过跨学科交叉，折纸结构给这些学科带来了新的研究思路和研究视角。

Table 3. Top 10 related subject areas for research

表 3. 排名前 10 的相关主题领域

序号	研究方向	记录数	百分数%
1	Engineering	1111	42.95
2	Materials Science	667	25.78
3	Science Technology Other Topics	438	16.93
4	Robotics	420	16.24
5	Physics	361	13.95
6	Chemistry	331	12.80
7	Mechanics	238	9.20
8	Computer Science	233	9.01
9	Instruments Instrumentation	144	5.57
10	Automation Control Systems	107	4.14

由于折纸结构及其应用的跨学科交叉性，涉及了许多不同类别的出版物。表 4 列出了论文总量排名前 10 的出版物。可以发现，除了工程学、机器人、材料科学等领域的期刊外，对折纸结构及其应用研究做出突出贡献的还包括涉及自动化控制、机器人、工程学、力学等领域的会议集，这表明时效性对于折纸结构及其应用有一定的影响力。

Table 4. Top 10 publications for the most productive research

表 4. 最具生产力的前 10 名出版物

期刊	TA	类别	5 year IF	AJP
Journal of Mechanisms and Robotics-Transactions of the ASME 82	82	Engineering; Robotics	2.622	41.56
Smart Materials and Structures	56	Instruments & Instrumentation; Materials Science	4.253	65.39
Journal of Mechanical Design	50	Engineering	3.479	64.60

Continued

Advanced Materials	41	Chemistry; Science & Technology - Other Topics; Materials Science; Physics	32.095	97.65
IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA	38	Automation & Control Systems; Robotics		
Proceedings of the ASME Conference on Smart Materials Adaptive Structures and Intelligent Systems	38	Automation & Control Systems; Robotics		
Mechanism and Machine Theory	36	Engineering	4.590	87.23
Extreme Mechanics Letters	34	Engineering; Materials Science; Mechanics	5.546	74.02
Thin Walled Structures	34	Engineering; Mechanics	5.601	90.68
IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium	33	Engineering; Telecommunications		

4. 结果与分析

CiteSpace 能够将文献可视化为由单个网络集合构建的网络图谱, 以展现一个学科领域是如何随着时间发展的。研究将使用 CiteSpace 并根据视觉属性来描述折纸结构及其应用研究的发展脉络和潜在特性。

4.1. 共被引网络分析

在网络图谱中, 论文引用以节点的形式表现。若两个文献同时被第三个文献引用, 则这两个文献是一种共被引(Co-citation)关系, 经常共被引的文献表示它们以某种方式相关。对文献进行共被引分析有助于挖掘出相关研究的基本知识元和知识群, 揭示关键研究领域及其内在关联[3]。

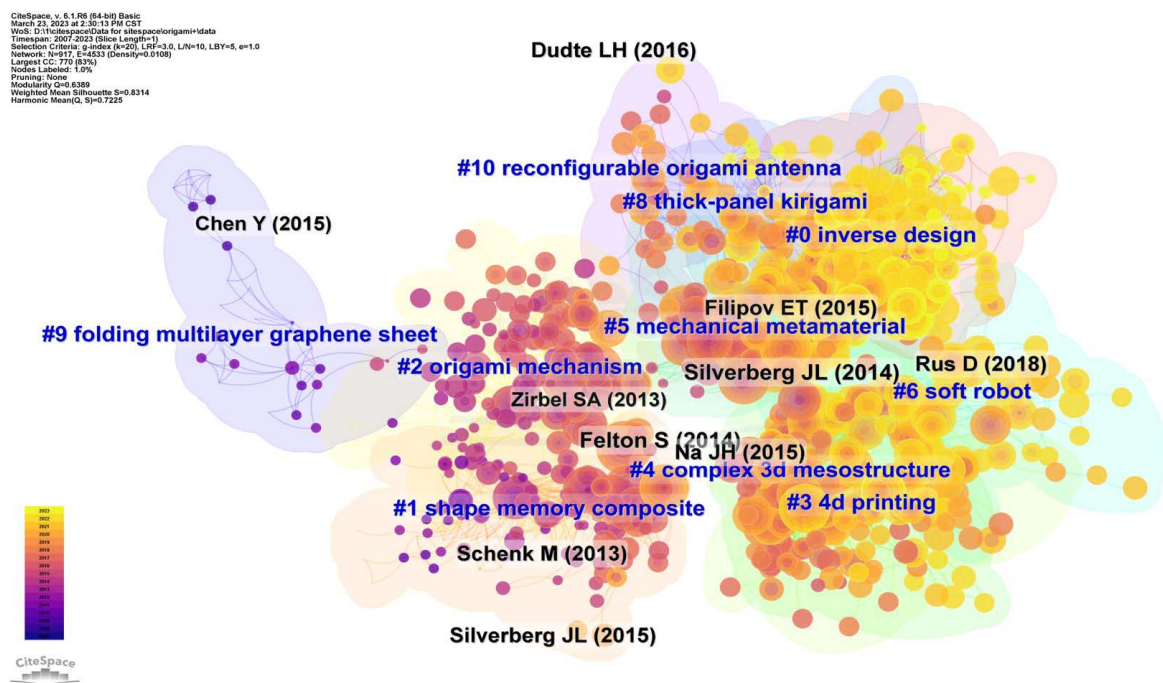


Figure 2. Paper folding structure and its application research co-citation network analysis diagram

图 2. 折纸结构及其应用研究共被引网络分析图谱

图 2 显示了用 Citespace 软件绘制的文献共被引网络图谱。根据节点之间的关联性共生成 11 个聚类, 不同聚类的区域用不同的颜色填充。聚类的 ID 号是根据聚类内节点的数量进行排序的, 节点越多, ID 号越小。需注意, 一个聚类的合理性与平均轮廓值(silhouette, 简称 S 值)相关, 当 S 值高于 0.7 时, 聚类是高效率令人信服的, 当 S 值低于 0.5 时, 聚类是不合理的, 因此将#7 聚类省去。表 5 列出了前 10 个聚类的大小、S 值和聚类发表的平均年数。由表可得, 聚类的平均轮廓值得分从 0.744 (聚类#0)到 0.965 (聚类#9), 表明聚类是令人信服的。

Table 5. Top 10 publications for the most productive research

表 5. 最具生产力的前 10 名出版物

Cluster #	Label (LLR)	Size	S-score	Mean (year)
0	inverse design	145	0.744	2019
1	shape memory composite	110	0.834	2011
2	origami mechanism	108	0.786	2012
3	4d printing	93	0.815	2016
4	complex 3d mesostructure	91	0.869	2016
5	mechanical metamaterial	79	0.886	2015
6	soft robot	52	0.843	2017
8	thick-panel kirigami	32	0.921	2017
9	folding multilayer graphene sheet	28	0.965	2007
10	reconfigurable origami gripper	22	0.935	2016

4.2. 高被引文献分析

通过对高被引文献的分析可反映其研究前沿、研究水平, 为明晰折纸结构及其应用的研究脉络和发展方向奠定基础。图 2 中用黑色标记了集合引用最多的 10 篇参考文献。其中聚类#5 (mechanical metamaterial)占据了 6 篇, 聚类#1 (shape memory composite)占据两篇, 聚类#2 (origami mechanism)和聚类#6 (soft robot)各有一篇。被引率最高的文章是 Felton S 等(2014) [4], 来自聚类#1, 被引用了 188 次。将折纸技术应用于机器制造, 开发了一种可自行折叠的爬行机器人。第二篇是 Silverberg JL 等(2014) [5], 被引用了 150 次, 将折纸设计原理应用在折叠可编程机械超材料上。第三篇是 Filipov ET 等(2015) [6], 被引用了 136 次, 引入了一种“拉链”方式来耦合刚性可折叠折纸管, 极大地提高了系统刚度。第四篇(Schenk M 和 Guest SD, 2013) [7]描述了两种基于三浦折叠模式的折叠超材料。第五篇(Silverberg JL 等, 2015) [8]发现了折纸结构具有由隐藏自由度引起的向双稳定性的临界过渡。第六篇(Na JH 等, 2015) [9]介绍了基于微图案光交联聚合物的可逆自折叠折纸编程。第七篇文章(Dudte LH 等, 2016) [10]展示了与尺度无关的基本几何构造和约束优化算法, 可用于确定空间调制图案。来自聚类#6 的第八篇文章(Rus D 等, 2018) [11]是有关折纸机器人的一篇综述。第九篇文章(Chen Y 等, 2015) [12]提出了一种针对厚板折叠的方法。第 10 篇(Zirbel SA 等, 2013) [13]开发了一种方法适应基于厚板折纸的可部署阵列, 并具有高比例的部署 - 存放直径。

4.3. 聚类分析

图 3 展示了共被引聚类的发展时间轴。#1、#2、#9、#11 中的高被引文献主要发表于 2015 年之间, 表明他们是较早的热门话题。而聚类#0、#3、#4、#6 在 2015 年至近年一直不间断且大量地被发表引用, 展现了研究人员对此持续的研究兴趣, 因此将对这四个聚类进行重点分析。表 6 列出了聚类#0、#3、#4 和#6 中被引用最多的 5 篇参考文献。

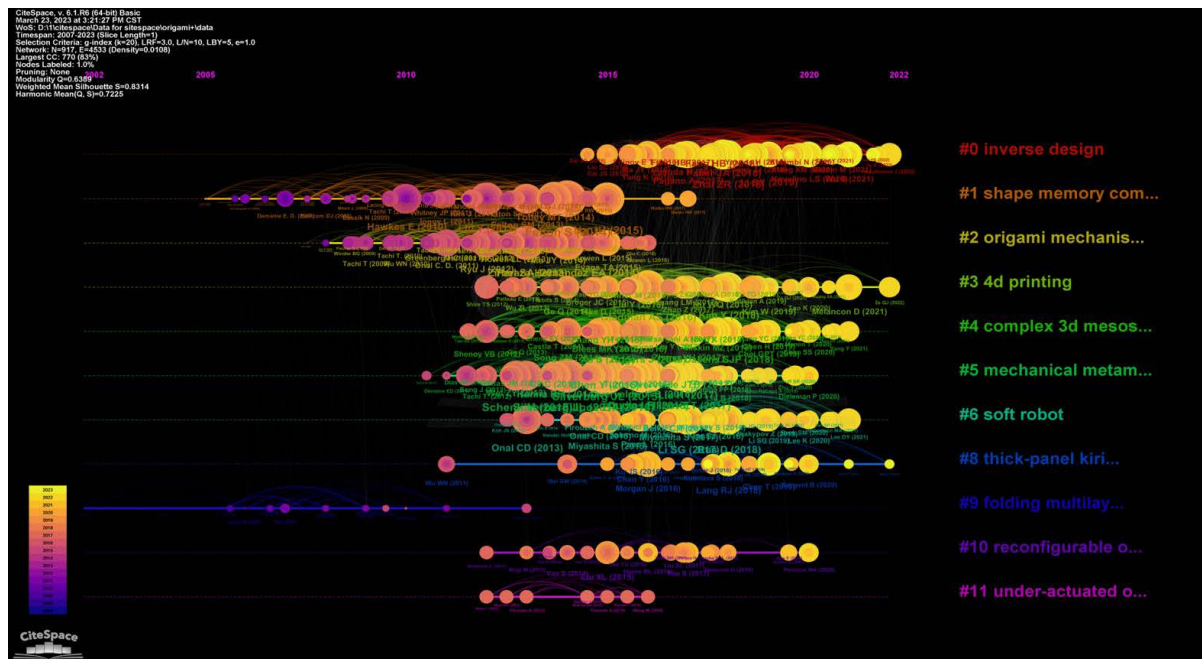


Figure 3. Research on origami structure and its application co-cited clustering timeline

图 3. 折纸结构及其应用研究共被引聚类时间轴

Table 6. The 5 most cited references in clusters #0, #3, #4, and #6

表 6. 聚类#0、#3、#4 和#6 中被引用最多的 5 篇参考文献

Cites	References	Cluster #
105	Zhai ZR (2018)	0
80	Faber JA (2018)	0
74	Li SY (2019)	0
69	Fang HB (2018)	0
59	Pagano A (2017)	0
94	Gladman AS (2016)	3
72	Kim Y (2018)	3
52	Hu WQ (2018)	3
51	Liu Y (2016)	3
46	Rus D (2015)	3

Continued

90	Rogers J (2016)	4
87	Callens SJP (2018)	4
66	Xu S (2015)	4
63	Blees MK (2015)	4
62	Zhang YH (2015)	4
120	Rus D (2018)	6
103	Li SG (2017)	6
69	Onal CD (2013)	6
57	Miyashita S (2017)	6
49	Miyashita S (2015)	6

聚类#0 (inversedesign)的平均年为 2019 年,是最年轻的聚类。Zhai ZR 等(2018) [14]是其中被引最多的一篇文章,它介绍了一种受折纸启发的,可按需展开和折叠并具有可调刚度的机械超材料。除此以外, Li SY 等人[15]综述了近年来关于折纸材料的不同方面的研究。Fang HB 等人[16]讨论了一种可编程自锁的折纸机械超材料。可以发现,这三篇引用较多的参考文献似乎与聚类#5 机械超材料更加吻合。目前尚不清楚这是由于引用文章或命名聚类使用术语的限制,还是与折纸对于材料研究和设计起到的重要启发作用有关。另外的两篇重要引用文献分别为: Faber JA 等人[17]介绍了一个弹簧折纸模型,其受螳螂的翅膀启发,拓宽了传统折纸的折叠设计空间,并允许制造精确可调的、具有可编程的仿生变形功能的四维打印物体; Pagano A 等人[18]证明了基于 Kresling 模式的双稳定折纸结构的折叠几何形状对其断裂行为的影响,并以爬行机器人作为基于这种折纸结构模仿爬行运动的一个案例。

聚类#3 (4D printing)中的引文文献代表了 4D 打印领域的重要发展。Gladman AS 等人[19]介绍了一种复合水凝胶结构,可以通过编程制造架构,并在浸入水中时改变形状,产生复杂的三维形态。Kim Y 等人[20]报道了在软材料中编程铁磁域的 3D 打印,通过磁驱动实现复杂 3D 形状之间的快速转换。Liu Y 等人[21]综述了二维(2D)聚合物片材编程的进展,并着重介绍了激发平面高分子材料形状变化的策略。Rus D 和 Tolley MT [22]综述了软机器人新兴领域的最新发展,已开始探索由柔性材料组成的软机器人的设计和控制。Hu WQ 等人[23]展示了一种多模态的软体机器人,并提出了理论模型来解释机器人如何移动。这两篇涉及软体机器人的文章最终聚类到聚类#3 中,或是由于都关注了机器人的行动控制与形态变化。4D 打印具有时间响应的第四维,在外界刺激下,4D 打印的静态结构具有随时间变化的动态特性,因此是解决上述问题的一个可能途径。

Rogers J 等(2016) [24]是聚类#4 (complex 3d mesostructure)中被引用最多的文献,其总结了类似于折纸的宏观弯曲和折叠技术,通过光刻显微和纳米图案薄膜的平面外组装制造三维微型和纳米结构器件。Callens SJP 和 ZadpoorAA [25]回顾了可用于将平板转化为三维结构的 origami 和 kirigami 技术,讨论其基本机制,并创建物理模型来演示和比较其可行性。Xu S 等人[26]介绍了一种通过压缩屈曲将微/纳米材料组装成复杂三维结构的途径。Blees MK 等人[27]验证了一种将剪纸应用到石墨烯片的想法,可用于构建机械超材料。Zhang YH 等人[28]介绍了一种 Kirigami 启发的,允许精确、机械地驱动组装来自 2D 微/纳米膜的不同材料的 3D 介观结构。

聚类#6 (softrobot)也是一个相对年轻地聚类,平均年为 2017,表明软机器人可能是一个新兴的研究

课题。该聚类中被引用最多的文献是 Rus D 和 Tolley MT [11]的一篇有关折纸机器人的综述, 重点介绍了设计原理、制造方法、驱动、智能材料和控制算法方面的进展。Li SG 等[29]提出了一种折纸启发的流体驱动人造肌肉架构, 为快速设计和低成本制造驱动系统打开了新世界的大门。Onal CD 等人[30]提出了一种折纸技术, 允许使用 2D 制造方法来构建 3D 机器人系统。Miyashita S 等[31]介绍了一种通过使用自折叠折纸“外骨骼”来实现变形, 达到扩展和改变机器人能力的方法。Miyashita S 等(2015) [32]是一篇会议论文, 介绍了一种可以当场折叠、完成任务、退化到环境中消失的微型机器人设备, 有望在医疗领域得以应用。

4.4. 引文爆发

引文爆发指发表后引用数量激增, 表明了学者们对相关问题予以了高度关注, 有利于追踪研究重点。主要有两个关键方面: 爆发强度和持续时间。

References	Burst	Duration	Range(2007-2023)	Cluster #
Hawkes E (2010)	40.05	2011-2015		1
Liu Y (2012)	35.29	2012-2017		1
Ryu J (2012)	19.15	2013-2017		2
Onal CD (2013)	18.69	2013-2018		6
Onal C. D. (2011)	16.44	2013-2016		2
Zirbel SA (2013)	31.6	2014-2018		2
Felton SM (2013)	15.81	2014-2017		1
Felton S (2014)	43.2	2015-2019		1
Schenk M (2013)	39.14	2015-2018		5
Silverberg JL (2014)	34.32	2015-2019		5
Peraza-Hernandez EA (2014)	24.37	2015-2019		2
Wei ZY (2013)	17.61	2015-2018		5
Tolley MT (2014)	16.33	2015-2019		1
Song ZM (2014)	15.82	2016-2019		4
Filipov ET (2015)	22.34	2017-2020		5
Na JH (2015)	16.29	2017-2020		1
Liu K (2017)	16.82	2020-2023		5
Zhai ZR (2018)	22.69	2021-2023		0
Rus D (2018)	20.55	2021-2023		6
Novelino LS (2020)	15.79	2021-2023		0

Figure 4. Top 20 references in terms of outbreak intensity

图 4. 引用爆发强度前 20 的文献

图 4 列出了 2007~2023 年期间整个数据集中引用爆发强度前 20 的文献。可以观察到 20 篇都发表于 2010 年至 2020 年之间, 其中大部分引用爆发发生在 2013 年至 2023 年期间。在这 20 名文献中, Felton S 等在 2014 年发表在《Science》上的文章[4], 以 43.2 的爆发强度位居榜首, 同时这篇文章也是 4.2 小节中高被引文献第一名。引用爆发第二强的文章, 是 Hawkes E 等人 2010 年发表的[33], 开发了一种被称为折叠可编程物质的材料, 能够根据指令进行编程以实现特定的形状或刚度。第三强的文章是 Schenk M 等人 2013 年发表的[7], 描述了两种基于 Miura-ori 折叠模式的折叠超材料。需强调的是, 其中有将近一半的引文集中在超材料领域(Filipov ET 等, 2015; Schenk M 和 Guest SD, 2013; Zhai ZR 等, 2018; Tolley

MT 等, 2014; Silverberg JL 等, 2014; Ryu J 等, 2012; Liu Y 等, 2012; Hawkes E 等, 2010; Felton SM 等, 2013) [5] [6] [7] [14] [33] [34] [35] [36] [37], 且多涉及自折叠与可编程性。此外, 有 4 篇引文是关于折纸机器人的(Felton S 等, 2014; Rus D 和 Tolley MT, 2018; Onal CD 等, 2013; Onal CD 等, 2011) [4] [11] [30] [38], 展现了将折纸结构应用于机器人设计制造方面的可行性。爆发最强且最新的参考文献是 Novelino LS 等人在 2020 年发表的[39]一篇介绍了一种具有磁控制的折纸系统的文章, 可实现可控速度下的无约束和局部/分布式驱动, 且允许动态编程。

5. 从新兴趋势看折纸结构对工业设计的影响

从 2007 年到 2021 年, 相关学术成果年度出版数量总体呈上升趋势。由此可见折纸结构及其应用研究已受到各领域研究人员的青睐, 至少在接下来几年内将会吸引更多关注。结合前文聚类分析和引用爆发的结果, 本章节将对未来折纸结构及其应用研究的新兴趋势进行总结并分析其在工业设计领域的影响与启发。

5.1. 新兴趋势

引文爆发表明学者对相应的出版物和领域给予了特别关注, 近年来出现的高强度的引用爆发文献通常被认为代表了未来可能的新兴趋势。图 5 展现了 2020 年、2021 年和 2022 年引用爆发最强的前 5 篇文献, 以及每篇文献中拥有最高引用量的前 3 篇参考文献(不包含综述)。与图 4 相比, 图 5 中的引用爆发文献涉及范围是扩大的, 说明折纸结构及其应用研究涉及的内容也更加广泛。根据图 5 中的参考文献和引用文章, 以及前文所分析的聚类及引文爆发, 可总结出以下三个新兴趋势: 机械超材料、机器人和折纸启发设计。

References	Burst	Duration	Range(2007-2023)	Cluster #
Hawkes E (2010)	40.05	2011-2015		1
Liu Y (2012)	35.29	2012-2017		1
Ryu J (2012)	19.15	2013-2017		2
Onal CD (2013)	18.69	2013-2018		6
Onal C. D. (2011)	16.44	2013-2016		2
Zirbel SA (2013)	31.6	2014-2018		2
Felton SM (2013)	15.81	2014-2017		1
Felton S (2014)	43.2	2015-2019		1
Schenk M (2013)	39.14	2015-2018		5
Silverberg JL (2014)	34.32	2015-2019		5
Peraza-Hernandez EA (2014)	24.37	2015-2019		2
Wei ZY (2013)	17.61	2015-2018		5
Tolley MT (2014)	16.33	2015-2019		1
Song ZM (2014)	15.82	2016-2019		4
Filipov ET (2015)	22.34	2017-2020		5
Na JH (2015)	16.29	2017-2020		1
Liu K (2017)	16.82	2020-2023		5
Zhai ZR (2018)	22.69	2021-2023		0
Rus D (2018)	20.55	2021-2023		6
Novelino LS (2020)	15.79	2021-2023		0

Figure 5. The top 5 articles with the strongest outbreaks were cited in 2020, 2021 and 2022
图 5. 2020 年、2021 年和 2022 年引用爆发强度前 5

结合 4.3 节的聚类分析, 图 4 与图 5 中的相关引文, 足以看出机械超材料是折纸结构及其应用领域最热门的新兴趋势。其中又以开发可编程性能的机械超材料关注最为广泛。以往可编程性主要源于所设计超材料的结构多重稳定性, 但在最近的研究中, 折纸已被确定为实现可编程性的理想平台。例如 Fang HB 等(2018) [16]提出并演示了一种实现折纸超材料可编程性的新机制, 采用了基于自锁的加强机制来调整运动学和力学性能。当然除了可编程性, 研究人员通过折纸结构也给材料带来了许多其他特有性能。Gao J 和 You Z (2022) [40]提出了一种受折纸启发的具有自锁特性的蜂窝超材料的新颖设计。Jamalimehr A 等(2022) [41]合并了 kirigami 和 origami 的概念, 引入了一种刚性可折叠的细胞超材料, 它可以平折并锁定在多个方向上的刚性状态等等。

另外, 折纸结构凭借其良好的折叠特性被大量用于机器人的设计中, 图 5 中包含有 9 篇机器人相关文章(20.5%), 其中更是以软机器人为热门。Bhovad P 等人在 2019 [42]和 2021 [43]发表的两篇文章都是将折纸结构用于软机器人动作的驱动与控制上。

而折纸启发设计也是一个较受关注的重点, 图 5 中有 6 篇文献(13.6%)与此相关。不仅涉及到产品以及其结构方面的设计, 也包括一些产品设计方法。

5.2. 对工业设计的影响与启发

折纸作为一种传统的艺术形式, 在工业设计领域也具有不可忽视的重要作用。首先, 折纸艺术中的结构原理和设计思想能够启发工业设计师在产品设计中探索创造新的形态和结构。其次, 折纸结构可以方便地实现二维到三维的变化, 这种可塑性使得产品设计有了更多样的表现形态和样式。另外, 折纸结构本身所具备的特性, 可以为工业设计带来新的功能上的解决途径, 例如实现产品折叠、承重性能优化、制造工艺简化等等。同样的, 上一小节中总结出的折纸结构及其应用的三个热门趋势: 机械超材料、机器人和折纸启发设计, 也将影响工业设计领域的发展, 为工业设计带来一些新启示, 使其焕发新活力。

从设计方法上来看, 折纸启发设计作为折纸结构及其应用的一个热门趋势, 也涉及到基于折纸的一些设计方法。例如 Morgan J 等[44]将基于折纸的设计按抽象到具体分为折纸灵感设计、折纸适应设计和折纸应用设计, 提出了一种具体的折纸适应产品的设计方法。包含有定义问题、确定折纸解决方案、修改折纸模型和设计整合四大步骤。并通过三个航空航天机构的例子来验证了这种方法的可行性: 折纸风箱, 可扩展的栖息地(作为一个模块在国际空间站上实施), 和可展开的抛物面天线。这种参考了仿生设计的设计方法给想要基于折纸进行一些造型、结构或创意方面的设计提供了一种较为规范的设计思路。但对于第一次想要基于折纸进行设计的设计师来说, 往往需要投入大量时间来获得折纸的相关经验。因此为设计师提供一个更为简洁方便的方式以快速选择出适合的种子折纸是未来可发展的一个研究方向。Francis 等[45]提出当一个没有折纸基础的设计师从折痕图开始进行一个功能性折纸设计时, 可以遵循刚性可折叠、折痕特性、材料性能和尺寸、制造这四个因素的引导进行设计, 并通过背包以及医疗保健机 c 臂 x 光机两个例子进行了演示。将折纸结构应用于工业设计产品需要结合多个领域的知识和技能。然而, 这些设计方法基本是根据一些工程领域学者的经验进行梳理的, 缺乏一些设计上更加合理专业的指导意见。例如对于一个完整的工业产品设计来说, 对产品进行前期调研, 了解当前市场和用户需求, 以及后期的用户反馈与优化工作等等也非常重要。综上, 基于折纸的产品设计方法仍需要进行进一步完善和扩展, 以帮助提高设计的创新性、实用性和可靠性。

就具体产品而言, 折纸启发设计也为工业设计带来了许多新颖的结构与解决方式。在航天航空领域方面, NASA 和杨百翰大学的研究人员[46]开发了一种基于折纸的可展开太阳能电池板, 能够直接装载在运载火箭上, 在更小的储存空间中实现更大的有效展开面积, 完成更长时间的太空任务。Beker 等[47]从折纸鸟的扇动翅膀中获取灵感, 提出了一种新型可折叠扑翼微型飞行器(FWMAV)。这种设计可以减少结

构的自重, 以及制造相关的成本和工作量。折纸结构在医疗领域的应用发展非常迅速, 并不断扩展应用范围, 包括医疗工具和器械、可穿戴医疗设备、生物材料等等。Randall 等[48]综述了基于折纸结构的生物医学应用, 如纳米到厘米尺度的多面体容器、细胞生长支架、手术工具等。Cybulski 等[49]发明的纸折显微镜, 能够实现超低成本的大规模制造, 同时具有轻便耐用、防水防摔等优势。而在户外或应急救援类产品上。Melancon D 等[50]介绍了一种多稳态和可充气的刚性壁可展开结构, 并创建了一个双稳态折纸形状库, 为建造如拱门和应急避难帐篷的大型充气系统提供方法。此外, 折纸结构在其他领域也涌现出许多应用。Tawk C 等[51]提出了一种受蕨类植物孢子囊启发的新型 3D 打印软真空致动器。杨百翰大学的团队以吉村折纸为基础, 设计了一款轻型、可折叠的防暴盾牌, 可以在 5 秒内完成组装。德国设计师 Lukas Bazle 所设计的 Medusa Lamp, 利用了折纸折叠时的动态变化调节房间照明亮度和照明范围, 满足用户个性化需求, 增加了家居装饰的趣味性和灵活性, 等等。

值得注意的是, 机器人也是工业设计领域的一个重要的组成部分, 而机器人同样也是折纸结构及其应用第二大新兴趋势。一方面, 一些应用于折纸的结构具有可以轻易改变材料形状和刚度的能力, 对软机器人具有重要的应用价值。Bhovad P 与 Li SY 的研究[43]表明折纸结构可以作为一个具有足够计算能力的动态库, 并通过一个设有传统控制器的类似蚯蚓蠕动的爬行案例进行研究, 展示了折纸物理库在软体机器人控制问题上的计算能力。Ze Q 等[52]介绍了一种具有平面内收缩的磁驱动小型折纸爬行器, 其收缩机制是通过一个四单元 Kresling 折纸组件实现的, 未来可用于生物医学应用的微创设备。除了软机器人以外, 折纸结构也为解决刚性机器人出现的问题提供了全新的解决方案。Santoso J 和 Onal CD [53]设计了一种连续体机械手, 能够通过折纸启发的模块化设计提供被动扭转刚度, 弥补了连续体机器人通常存在的不可控扭转。Wu S 等[54]引入了基于 Kresling 模式的磁控折纸机器人手臂, 用于包括拉伸、折叠、全向弯曲和扭曲的多模式变形。Zhai ZR 等[55]设计了一种曲面折纸模型, 通过激活曲面折纸模型上的预定义折痕来实现对正、零和负刚度的原位刚度操作。这项工作展示了曲面折纸尚未被探索到的能力, 为曲面折纸在机器人领域的应用开辟了新的道路。不难发现, 很多折纸机器人的应用目前还处于实验室阶段, 尚未完全转化为实际的产品或应用。要真正实现在日常生活中的广泛应用, 还需要解决很多实际问题和难点。但是随着技术的不断进步和学科交叉的不断融合, 有理由相信这些应用会逐渐走向实际, 在各个领域展现独特优势。

材料是工业设计中需要考虑的重要因素之一, 它能直接影响了产品的性能、成本、外观和用户体验。如 4.1 中所述, 折纸启发的超材料能够具备一些特殊的机械性能, 例如可编程、自锁、可调刚度等。这些具有突出性能的机械新材料, 能够启发工业设计师们进行一些新的创造, 解决产品需求上的技术难题。例如: Kuang X 等[56]报道了一种由硬磁性微颗粒组成的磁动力聚合物(MDP)复合材料, 这种材料能够用于磁辅助装配的靶向焊接、磁化重新编程和永久结构重组, 提供了非常理想的结构和材料可编程性及可重编程性。未来有望为多功能组件、可重构变形架构和器件的设计与制造提供新的范例。Li SG 等[29]提出了一种折纸启发的受流体驱动的人造肌肉架构。这种人造肌肉的结构为驱动系统的快速设计和低成本制造打开了大门, 能够适用于多种规模的众多应用, 从微型医疗设备到可穿戴机器人外骨骼, 再到用于太空探索的大型可展开结构等。Tao R 等[57]采用形状记忆聚合物的 4D 打印方法, 制备了一种智能折纸超材料。这种超材料可通过控制温度实现形状编程、自膨胀和机械可调, 并可通过调节参数在单稳定和双稳定之间切换, 在机械存储、可调减震接口和软体机器人等领域都具有广泛的应用前景。当然, 从理论转化成实践总要经历尝试与过程, 要将机械超材料应用在具体产品上, 不可避免会存在一些挑战和问题。但基于折纸启发的这些新型材料为工业设计带来了更多新的机会和可能性也是必然的。通过深入研究和探索, 这些新机会和可能性将会为工业设计带来更多的创新和发展。

6. 总结

本文借助当前较为前沿的一种科学计量学方法, 概述了折纸结构及其应用在过去十六年的研究进展, 从出版物数目、国际研究力量、学科分布和期刊层面进行了分析。此外, 研究表明国际合作研究产生了更多的高影响力论文, 这暗示了国际合作在折纸结构及其应用领域的重要性。

结合 CiteSpace 知识图谱可视化分析软件梳理、揭示了折纸结构及其应用的聚类、热点和趋势。通过聚类分析、引文爆发及引用文献分析, 总结出以下三个新兴趋势: 机械超材料、机器人和折纸启发设计。并在设计方法、工业产品设计、机器人和材料这四个方面, 具体地分析三个新兴趋势对工业设计的影响与启发。虽然折纸结构及其应用的新兴趋势为工业设计领域带来了诸多机遇和挑战, 但需要更加深入地探讨和研究这些趋势的实际应用前景, 以进一步推动工业设计领域的创新发展。

首先, 折纸结构启发的超材料具有可编程、自锁和可调刚度等特性, 为工业设计师提供了新的设计思路和方法, 有助于解决产品的技术难题。其次, 折纸结构在机器人领域的应用, 不仅可以帮助解决刚性机器人的问题, 还可以为软机器人提供新的解决方案。折纸结构的灵活性和可变性为机器人的设计和优化提供了新的思路 and 方向。最后, 折纸启发设计不仅可以启发工业设计师的创新思维, 创造更多新颖的结构和产品。同时通过借鉴折纸结构的设计思想和原理, 由此总结的基于折纸的设计方法给工业设计师们提供了一种较为规范的设计思路。综上: 折纸结构及其应用的新兴趋势对工业设计领域具有深远的影响。然而, 如何将这些新兴趋势转化为实际的应用并推广到更广泛的领域仍需要深入探讨和研究。未来, 我们期待这些新兴趋势能为工业设计的创新发展注入更多活力和灵感。

参考文献

- [1] Zheng, C.J., Yuan, J.F., Zhu, L., *et al.* (2020) From Digital to Sustainable: A Scientometric Review of Smart City Literature between 1990 and 2019. *Journal of Cleaner Production*, **258**, Article ID: 120689. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120689>
- [2] 张寒, 孟宪飞. 大学-产业界知识转移国际研究的热点主题和研究前沿——基于 2010-2021 年国际文献的科学知识图谱分析[J]. *科学学与科学技术管理*, 2022, 43(10): 103-122.
- [3] 宋歌. 共被引分析方法迭代创新路径研究[J]. *情报学报*, 2020, 39(1): 12-24.
- [4] Felton, S., Tolley, M., Demaine, E., *et al.* (2014) A Method for Building Self-Folding Machines. *Science*, **345**, 644-646. <https://doi.org/10.1126/science.1252610>
- [5] Silverberg, J.L., Evans, A.A., Mcleod, L., *et al.* (2014) Using Origami Design Principles to Fold Reprogrammable Mechanical Metamaterials. *Science*, **345**, 647-650. <https://doi.org/10.1126/science.1252876>
- [6] Filipov, E.T., Tachi, T. and Paulino, G.H. (2015) Origami Tubes Assembled into Stiff, Yet Reconfigurable Structures and Metamaterials. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **112**, 12321-12356. <https://doi.org/10.1073/pnas.1509465112>
- [7] Schenk, M. and Guest, S.D. (2013) Geometry of Miura-Folded Metamaterials. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **110**, 3276-3281. <https://doi.org/10.1073/pnas.1217998110>
- [8] Silverberg, J.L., Na, J.H., Evans, A.A., *et al.* (2015) Origami Structures with a Critical Transition to Bistability Arising from Hidden Degrees of Freedom. *Nature Materials*, **14**, 389-393. <https://doi.org/10.1038/nmat4232>
- [9] Na, J.H., Evans, A.A., Bae, J., *et al.* (2015) Programming Reversibly Self-Folding Origami with Micropatterned Photo-Crosslinkable Polymer Trilayers. *Advanced Materials*, **27**, 79-85. <https://doi.org/10.1002/adma.201403510>
- [10] Dudte, L.H., Vouga, E., Tachi, T. and Mahadevan, L. (2016) Programming Curvature Using Origami Tessellations. *Nature Materials*, **15**, 583-588. <https://doi.org/10.1038/nmat4540>
- [11] Rus, D. and Tolley, M.T. (2018) Design, Fabrication and Control of Origami Robots. *Nature Reviews Materials*, **3**, 101-112. <https://doi.org/10.1038/s41578-018-0009-8>
- [12] Chen, Y., Peng, R. and You, Z. (2015) Origami of Thick Panels. *Science*, **349**, 396-400. <https://doi.org/10.1126/science.aab2870>
- [13] Zirbel, S.A., Lang, R.J., Thomson, M.W., *et al.* (2013) Accommodating Thickness in Origami-Based Deployable Arrays. *Journal of Mechanical Design*, **135**, Article ID: 111005. <https://doi.org/10.1115/1.4025372>

- [14] Zhai, Z.R., Wang, Y. and Jiang, H.Q. (2018) Origami-Inspired, On-Demand Deployable and Collapsible Mechanical Metamaterials with Tunable Stiffness. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **115**, 2032-2037. <https://doi.org/10.1073/pnas.1720171115>
- [15] Li, S.Y., Fang, H.B., Sadeghi, S., et al. (2019) Architected Origami Materials: How Folding Creates Sophisticated Mechanical Properties. *Advanced Materials*, **31**, Article ID: 1805282. <https://doi.org/10.1002/adma.201805282>
- [16] Fang, H.B., Chu, S.C.A., Xia, Y.T. and Wang, K.W. (2018) Programmable Self-Locking Origami Mechanical Metamaterials. *Advanced Materials*, **30**, Article ID: 1706311. <https://doi.org/10.1002/adma.201706311>
- [17] Faber, J.A., Arrieta, A.F. and Studart, A.R. (2018) Bioinspired Spring Origami. *Science*, **359**, 1386-1391. <https://doi.org/10.1126/science.aap7753>
- [18] Pagano, A., Yan, T.X., Chien, B., Wissa, A. and Tawfick, S. (2017) A Crawling Robot Driven by Multi-Stable Origami. *Smart Materials and Structures*, **26**, Article ID: 094007. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aa721e>
- [19] Gladman, A.S., Matsumoto, E.A., Nuzzo, R.G., et al. (2016) Biomimetic 4D Printing. *Nature Materials*, **15**, 413-418. <https://doi.org/10.1038/nmat4544>
- [20] Kim, M.Y., Yuk, H., Zhao, R.K., Chester, S.A. and Zhao, X.H. (2018) Printing Ferromagnetic Domains for Untethered Fast-Transforming Soft Materials. *Nature*, **558**, 274-279. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0185-0>
- [21] Liu, Y., Genzer, J. and Dickey, M.D. (2016) "2D or Not 2D": Shape-Programming Polymer Sheets. *Progress in Polymer Science*, **52**, 79-106. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2015.09.001>
- [22] Rus, D. and Tolley, M.T. (2015) Design, Fabrication and Control of Soft Robots. *Nature*, **521**, 467-475. <https://doi.org/10.1038/nature14543>
- [23] Hu, W.Q., Lum, G.Z., Mastrangeli, M. and Sitti, M. (2018) Small-Scale Soft-Bodied Robot with Multimodal Locomotion. *Nature*, **554**, 81-85. <https://doi.org/10.1038/nature25443>
- [24] Rogers, J., Huang, Y.G., Schmidt, O.G. and Gracias, D.H. (2016) Origami MEMS and NEMS. *MRS Bulletin*, **41**, 123-129. <https://doi.org/10.1557/mrs.2016.2>
- [25] Callens, S.J.P. and Zadpoor, A.A. (2018) From Flat Sheets to Curved Geometries: Origami and Kirigami Approaches. *Materials Today*, **21**, 241-264. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.10.004>
- [26] Xu, S., Yan, Z., Jang, K.I., et al. (2015) Assembly of Micro/Nanomaterials into Complex, Three-Dimensional Architectures by Compressive Buckling. *Science*, **347**, 154-159. <https://doi.org/10.1126/science.1260960>
- [27] Blees, M.K., Barnard, A.W., Rose, P.A., et al. (2015) Graphene Kirigami. *Nature*, **524**, 204-207. <https://doi.org/10.1038/nature14588>
- [28] Zhang, Y.H., Yan, Z., Nan, K.W., et al. (2015) A Mechanically Driven form of Kirigami as a Route to 3D Mesostuctures in Micro/Nanomembranes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **112**, 11757-11764. <https://doi.org/10.1073/pnas.1515602112>
- [29] Li, S.G., Vogt, D.M., Rus, D. and Wood, R.J. (2017) Fluid-Driven Origami-Inspired Artificial Muscles. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **114**, 13132-13137. <https://doi.org/10.1073/pnas.1713450114>
- [30] Onal, C.D., Wood, R.J. and Rus, D. (2013) An Origami-Inspired Approach to Worm Robots. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **18**, 430-438. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2012.2210239>
- [31] Miyashita, S., Guitron, S., Li, S.G. and Rus, D. (2011) Robotic Metamorphosis by Origami Exoskeletons. *Science Robotics*, **2**, eaao4369. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aao4369>
- [32] Miyashita, S., Guitron, S., Ludersdorfer, M., et al. (2015) An Untethered Miniature Origami Robot That Self-Folds, Walks, Swims, and Degrades. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seattle, 26-30 May 2015, 1490-1496. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7139386>
- [33] Hawkes, E., An, B., Benbernou, N.M., et al. (2010) Programmable Matter by Folding. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **107**, 12441-12445. <https://doi.org/10.1073/pnas.0914069107>
- [34] Tolley, M.T., Felton, S.M., Miyashita, S., et al. (2014) Self-Folding Origami: Shape Memory Composites Activated by Uniform Heating. *Smart Materials and Structures*, **23**, Article ID: 094006. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/9/094006>
- [35] Ryu, J., D'amato, M., Cui, X.D., et al. (2012) Photo-Origami-Bending and Folding Polymers with Light. *Applied Physics Letters*, **100**, Article ID: 161908. <https://doi.org/10.1063/1.3700719>
- [36] Liu, Y., Boyles, J.K., Genzer, J., et al. (2012) Self-Folding of Polymer Sheets Using Local Light Absorption. *Soft Matter*, **8**, 1764-1769. <https://doi.org/10.1039/C1SM06564E>
- [37] Felton, S.M., Tolley, M.T., Shin, B., et al. (2013) Self-Folding with Shape Memory Composites. *Soft Matter*, **9**, 7688-7694. <https://doi.org/10.1039/c3sm51003d>

- [38] Onal, C.D., Wood, R.J. and Rus, D. (2011) Towards Printable Robotics: Origami-Inspired Planar Fabrication of Three-Dimensional Mechanisms. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Shanghai, 9-13 May 2011, 4608-4613. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2011.5980139>
- [39] Novelino, L.S., Ze, Q.J., Wu, S., *et al.* (2020) Untethered Control of Functional Origami Microrobots with Distributed Actuation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **117**, 24096-24101. <https://doi.org/10.1073/pnas.2013292117>
- [40] Gao, J.Y. and You, Z. (2022) Origami-Inspired Miura-Ori Honeycombs with a Self-Locking Property. *Thin-Walled Structures*, **171**, Article ID: 108806. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108806>
- [41] Jamalimehr, A., Mirzajanzadeh, M., Akbarzadeh, A. and Pasini, D. (2022) Rigidly Flat-Foldable Class of Lockable Origami-Inspired Metamaterials with Topological Stiff States. *Nature Communications*, **13**, Article No. 1816. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29484-1>
- [42] Bhovad, P., Kaufmann, J. and Li, S.Y. (2019) Peristaltic Locomotion without Digital Controllers: Exploiting Multi-Stability in Origami to Coordinate Robotic Motion. *Extreme Mechanics Letters*, **32**, Article ID: 100552. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2019.100552>
- [43] Bhovad, P. and Li, S.Y. (2021) Physical Reservoir Computing with Origami and Its Application to Robotic Crawling. *Scientific Reports*, **11**, Article No. 13002. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92257-1>
- [44] Morgan, J., Magleby, S.P. and Howell, L.L. (2016) An Approach to Designing Origami-Adapted Aerospace Mechanisms. *Journal of Mechanical Design*, **138**, Article ID: 052301. <https://doi.org/10.1115/1.4032973>
- [45] Francis, K.C. (2013) Origami-Based Design for Engineering Applications. Brigham Young University, Utah, United States.
- [46] Zirbel, S.A., Magleby, S.P., Howell, L.L., *et al.* (2014) Accommodating Thickness in Origami-Based Deployable Arrays. *Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences/Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE)*, Portland, 4-7 August 2013, V06BT07A027. <https://doi.org/10.1115/DETC2013-12348>
- [47] Beker, C., Turgut, A., Ozcan, O., *et al.* (2017) Design of a Novel Foldable Flapping Wing Micro Air Vehicle. *9th Ankara International Aerospace Conference*, Ankara, 20-22 September 2017, 138.
- [48] Randall, C.L., Gultepe, E. and Gracias, D.H. (2012) Self-Folding Devices and Materials for Biomedical Applications. *Trends in Biotechnology*, **30**, 138-146. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2011.06.013>
- [49] Cybulshi, J.S., Clements, J. and Prakash, M. (2014) Foldscope: Origami-Based Paper Microscope. *PLOS ONE*, **9**, e98781. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0098781>
- [50] Melancon, D., Gorissen, B., Garcia-Mora, C.J., Hoberman, C. and Bertoldi, K. (2021) Multistable Inflatable Origami Structures at the Metre Scale. *Nature*, **592**, 545-550. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03407-4>
- [51] Tawk, C., Panhuis, M.I.H., Spinks, G.M., *et al.* (2018) Bioinspired 3D Printable Soft Vacuum Actuators for Locomotion Robots, Grippers and Artificial Muscles. *Soft Robot*, **5**, 685-694. <https://doi.org/10.1089/soro.2018.0021>
- [52] Ze, Q.J., Wu, S., Nishikawa, J., *et al.* (2022) Soft Robotic Origami Crawler. *Science Advances*, **8**, eabm7834. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abm7834>
- [53] Santoso, J. and Onal, C.D. (2021) An Origami Continuum Robot Capable of Precise Motion through Torsionally Stiff Body and Smooth Inverse Kinematics. *Soft Robot*, **8**, 371-386. <https://doi.org/10.1089/soro.2020.0026>
- [54] Wu, S., Ze, Q.J., Dai, J.Z., *et al.* (2021) Stretchable Origami Robotic Arm with Omnidirectional Bending and Twisting. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **118**, e2110023118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2110023118>
- [55] Zhai, Z.R., Wang, Y., Lin, K., *et al.* (2020) *In situ* Stiffness Manipulation Using Elegant Curved Origami. *Science Advances*, **6**, eabe200. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abe2000>
- [56] Kuang, X.A., Wu, S., Ze, Q.J., *et al.* (2021) Magnetic Dynamic Polymers for Modular Assembling and Reconfigurable Morphing Architectures. *Advanced Materials*, **33**, Article ID: 2102113. <https://doi.org/10.1002/adma.202102113>
- [57] Tao, R., Ji, L.T., Li, Y., *et al.* (2020) 4D Printed Origami Metamaterials with Tunable Compression Twist Behavior and Stress-Strain Curves. *Composites Part B: Engineering*, **201**, Article ID: 108344. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108344>