



面向高性能人工视觉的曲面图像传感器及其制造工艺

龙正浩^{1,2,3}, 王开晨^{1,2}, 范智勇^{1,2,4*}

1. 香港科技大学电子与计算机工程学系, 香港 999077

2. 香港科技大学高级显示与光电技术国家重点实验室, 香港 999077

3. 香港建造机器人中心, 香港 999077

4. 香港科技大学化学与生物工程学系, 香港 999077

* 联系人, E-mail: eezfan@ust.hk

2025-06-30 收稿, 2025-12-04 修回, 2025-12-05 接受, 2025-12-08 网络版发表

深圳市科技计划(JCYJ20170818114107730, JCYJ20180306174923335)、香港研究资助局一般研究基金(16205321, 16214619)、创新科技基金(GHP/014/19SZ)、粤港澳智能微纳光电技术联合实验室(2020B1212030010)、佛山创新创业科研团队项目(2018IT100031)和香港建造机器人中心(香港创新科技署InnoHK计划资助的InnoHK-HKCRC中心)资助

摘要 受生物眼启发的基于曲面图像传感器的视觉器件凭借结构简单、低数据冗余以及超广角视觉等高性能优势, 在自动驾驶、人形机器人、无人机等依赖视觉感知的新兴应用领域中展现了巨大的应用潜力。然而, 传统的微纳加工工艺难以适用于大曲率基底, 对高性能曲面图像传感器的制造提出了严峻挑战, 因此亟需开发可靠且创新的新型曲面像素阵列集成方法, 以满足这一领域对器件制备的需求。本文总结了过去二十余年该领域的主要发展历程, 重点介绍并分析了几种典型的曲面图像传感器制备工艺, 希望能够为相关领域的研究者提供有价值的见解与启发。

关键词 曲面图像传感器, 仿生眼, 光电子器件, 感光半导体

感光半导体材料构成的阵列是现代人工视觉系统的硬件基础。以电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)和互补金属氧化物半导体(complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS)为代表的硅基图像传感器在城市管理及消费电子等领域应用广泛, 为各类场景提供了有效的环境信息探测与分析能力。随着人工智能技术(artificial intelligence, AI)的发展, 图像传感器正朝着小型化、高性能方向持续演进。传统图像传感器基于整块硅晶圆, 通过光刻等微加工工艺制备大规模、高密度的光电二极管阵列, 并以此高效采集经透镜系统汇聚的视觉信息。得益于微加工工艺的进步, 现代图像传感器已具备优异的阵列数据采集能力。商用产品分辨率可达亿级, 像素密度逼近光学衍射极限, 同时帧率超过人眼(>60 Hz)。这些突破为现有人工智能系统的

高效运行提供了关键保障。

然而, 上述图像传感器的平面结构正成为进一步提升其性能的主要瓶颈, 制约了人工智能系统性能的发展。当前图像传感器需先通过透镜汇聚环境光形成图像, 再由图像传感器探测。由于透镜通常基于曲面几何结构, 会将图像汇聚到曲面上形成场曲, 而平面图像传感器与之存在几何结构失配, 这导致探测结果存在显著误差和畸变, 限制了探测精度。现有系统在确保中心区域图像清晰时, 边缘模糊问题不可避免^[1-4]。目前主流解决方案涉及光学系统和算法两方面: 在光学系统方面, 目前的相机基于复杂的多透镜组系统来汇聚环境光, 通过组合不同的透镜来减场曲。这一方案增加了系统冗余度和重量, 且场曲无法完全校正, 边缘模糊问题依然存在; 同时复杂透镜组增加了光路长度和设

引用格式: 龙正浩, 王开晨, 范智勇. 面向高性能人工视觉的曲面图像传感器及其制造工艺. 科学通报, 2026, 71: 1852–1859

Long Z, Wang K, Fan Z. Curved image sensors and their fabrication technologies for high-performance artificial vision systems (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 1852–1859, doi: [10.1360/CSB-2025-5175](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5175)

计约束,显著减小了系统的视场角。在算法方面,光学系统无法完全矫正的畸变,如边缘模糊及色差等,需依赖额外算法修正,这带来了高计算功耗和处理延迟问题。随着人工智能系统发展,平面图像传感器结构在小型化、超广角、低数据冗余方面存在局限,相关产业的进一步发展亟需一种新的图像传感器架构。

曲面图像传感器因其几何结构与光学系统的成像曲面天然适配,能够直接消除场曲问题,近年来被视为下一代视觉传感系统的理想结构。然而,当前成熟的平面微纳制造工艺体系与曲面加工存在根本性矛盾:传统光刻技术依赖平面投影曝光,在曲面上无法实现高精度图形化;基于块体硅材料的像素阵列与曲面基底的异质集成也面临材料和应力挑战。这导致迄今无法制备出同时满足超过六十度大曲率和超过1000像素每英寸(PPI)像素密度要求的器件,无法满足实际应用中的最基本的性能需求。本文综述了曲面图像传感器的发展历程与感光元件的曲面集成方法,剖析了该领域的核心挑战,希望能为相关领域的研究者提供帮助。

1 基于曲面传感器的视觉系统

视觉是人类以及大部分动物的主要感知功能之一。对人类而言,视觉不仅是感知周围世界的核心方式,也是在与环境互动中不可或缺的工具。通过视觉,我们能够捕捉到白天与黑夜的变化、物体的色彩与形状特征,以及空间的尺寸与深度。这些视觉信息不仅构建了我们对外界的基本认知,还使我们能够在复杂的环境中迅速做出有效决策,并与其他人进行高效互动。正因为视觉的关键作用,视觉相关技术的发展一直备受重视。最早,人类通过作画等手段将视觉信息记录在载体上以作为信息传播的工具。随着19世纪相机的发明,人类首次拥有了一种高效保存视觉信息的方法。随后,以CCD和CMOS器件为代表的数码相机的出现,标志着视觉信息采集正式进入数字时代^[5]。这不仅提升了视觉信息记录的效率,还为人工智能系统的环境感知提供了坚实的硬件基础。

然而,与人类眼睛相比,当前的相机系统在多方面仍存在不足。其一是结构复杂性与冗余性。以单反相机为例,往往需要由数十个透镜组成的复杂光学结构才能汇聚环境光,而较小型化的手机镜头通常也需要五个或更多透镜。相比之下,人眼仅凭角膜、瞳孔和晶状体三个主要光学结构,就能实现出色的视觉能力。其二是视场角的局限性。目前的相机系统在不引入严重光

学畸变的情况下,很难实现超过120°的视场角,而人眼的单眼视场角可以达到150°,能够感知更广阔的环境信息。这些不足主要受到图像传感器几何结构的限制。

图1展示了平面和曲面图像传感器系统在光学聚焦功能上的对比。图1(a)显示了典型平面图像传感器的聚焦情况:光线通过凸透镜聚焦到平面图像传感器上。由于透镜的曲面几何特性,虽然中心区域的光线可以很好地聚焦,但边缘区域出现明显失焦问题。这不仅会导致成像质量下降,还使系统难以在大角度入射情况下实现超广角视场。受人眼等高性能生物视觉系统结构的启发,曲面图像传感器被提出,其光学聚焦功能如图1(b)所示。通过采用曲面结构,传感器能够有效聚焦超广角入射光,从而实现显著优化的视觉性能。

尽管曲面图像传感器在光学效果上具有明显优势,其制备过程受到现有微加工工艺的限制,难以实现大规模生产和应用。本文的下一部分将重点分析当前曲面图像传感器的制备方法、主要思路及其存在的问题。

2 感光元件的曲面集成方法

如何实现感光元件的曲面高密度集成,是曲面图像传感器领域的核心挑战。在过去二十多年间,研究者开发了多种不同的曲面器件集成方法。本部分将介绍如图2所示的几种最具代表性的工艺路线,包括直接塑形法、岛-桥设计、可折叠设计、柔性半导体材料的曲面集成,以及半球面纳米线阵列结构。

基于现有图像传感器工艺制备高性能图像传感器,并将其塑形成曲面结构,是一种直接且可靠的曲面图像传感器制备方法^[6,7]。Guenther等人^[7]提出了一种具有代表性的方法。他们通过将硅基CMOS图像传感器削薄,使其具备一定的柔性,再利用一种气动成型工艺,将薄片状图像传感器塑形成精确的弯曲光学表面。图3(a)展示了该方法的工艺示意图。该工艺结合了成型模具的设计、压力膜的弹性特性以及受控的摩擦力,使硅片逐步从角部接触模具并被平滑地压制成球面形状。图3(b)展示了这一器件的结构示意图,图3(c)则展示了最终制备出的曲面图像传感器的实物照片。这一方法在实现硅片弯曲成型的同时,成功简化了光学系统。采用曲面图像传感器的系统可以减少30%以上的透镜数量,从而有效降低了冗余透镜系统的复杂性,并保留了CMOS图像传感器的高分辨率优势及其对现有系统的兼容性。然而,该方法并未突破硅材料作为块体材料所固有的非柔性特性。在弯曲过程中,硅材料会产生较大

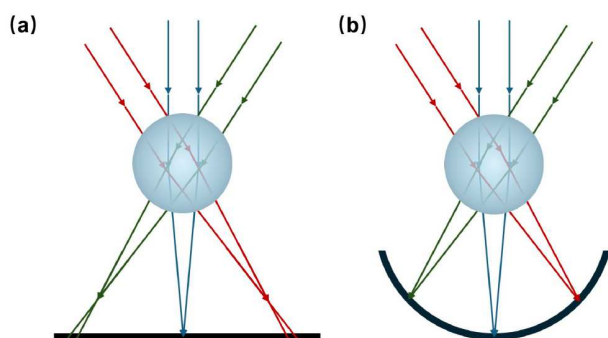


图1 (网络版彩色)(a) 平面与(b) 曲面图像传感器
Figure 1 (Color online) (a) Planar and (b) curved image sensors

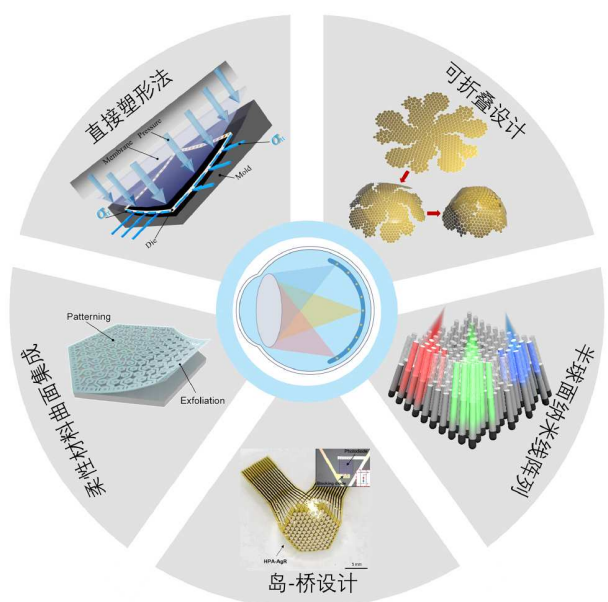


图2 (网络版彩色)几种主要的曲面图像传感器制备方法
Figure 2 (Color online) Fabrication methods for curved image sensors

的应力,限制了该方法在大曲率器件上的应用.这也使得其在光学系统优化方面的潜力受到一定的限制.

由于硅材料本身的限制,弯曲过程中的应力问题无法完全解决.另一种有效的解决方案是将硅材料部分替换为柔性材料^[8,9].通过这种方式,硅基光电二极管优异的光电探测性能可以在系统中得以保留,同时柔性材料的可弯曲特性使得在大曲率基底(如半球面)上实现图像传感器的制造成为可能. Ko等人^[8]首次提出了这一方法,这一结构也被称为“岛-桥设计”.该结构将单晶硅光电二极管制成密集的“岛屿”阵列,并通过导电且具有柔性的“桥梁”结构将这些“岛屿”连接起来.“岛屿”作为感光元件,确保了系统的成像性能,而

可弯曲的“桥梁”则在机械结构上支撑了这一网络状的曲面图像传感器结构,同时为阵列化数据读取提供了高效可靠的电气连接.这一设计开创性地提出了首个有效的大曲率图像传感器制备方法,并实现了高效的成像功能.最近,该结构得到了进一步优化.借鉴猫眼视觉系统的工作原理, Kim等人^[10]在硅光电二极管底部设置了金属反射层,从而大幅提高了器件的光响应灵敏度,使其在各种光照条件下均具备优异的视觉感知性能.此外, Choi等人^[11]将硅光电二极管阵列构筑在圆柱形基底上,并基于透镜成像原理设计了非均匀的像素分布.圆柱形几何结构相较于半球形结构部分缓解了应力问题,而非均匀像素分布进一步修正了光学像差.由此,该器件实现了4096像素的分辨率,在大曲率图像传感器中表现出较高的性能.然而,由于“桥梁”部分不具备感光能力且占用了较多空间,这种设计使得所制备的图像传感器在像素密度方面受到一定限制,难以实现较高分辨率.

岛-桥设计中,分辨率主要受限于不感光的“桥梁”结构占据空间,因此尽可能减小“桥梁”结构的占比成为一种自然的提高分辨率的方法.研究者们从剪纸和折纸这些古老的艺术形式中获得启发,开发出了多种基于可折叠结构的曲面图像传感器. Rao等人^[12]受剪纸艺术启发,利用在薄且不可拉伸的片材上进行切割以赋予其机械拉伸能力的特点,报道了一种基于超薄硅光电像素阵列的可弯曲且形状自适应的成像器件.其采用了一种可拉伸的像素设计:具体来说,将光电二极管设计为四边形结构,相邻四边形通过角与角连接.由于连接处超薄、超细的特点,该结构能够实现较大角度的弯曲.在拉伸前,该成像器具有78%的像素填充因子,并且在双轴拉伸至30%时仍能保持其光电性能.另一方面, Zhang等人^[13]受折纸艺术启发,提出了另一种基于可折叠结构的曲面图像传感器制备方法.在几何数学中,准球体可以通过截角二十面体构建,这种结构常见于足球等球面物体中.如图4(a)所示,该方法首先在柔性基底上绘制并将硅基光电探测器阵列切割为部分截角二十面体的展开图,然后通过折叠将多个部分组合形成类半球形结构.同时,将较大的五边形和六边形面细分为更小的多边形面能够进一步平滑半球结构的边缘.这种细分的二十面体设计大幅减少了“桥梁”结构的出现,并增加了像素数量.图4(b)和(c)分别展示了折叠前后的这种折纸结构图像传感器.总的来说,折叠设计在岛-桥结构的基础上有效提高了像素所占空

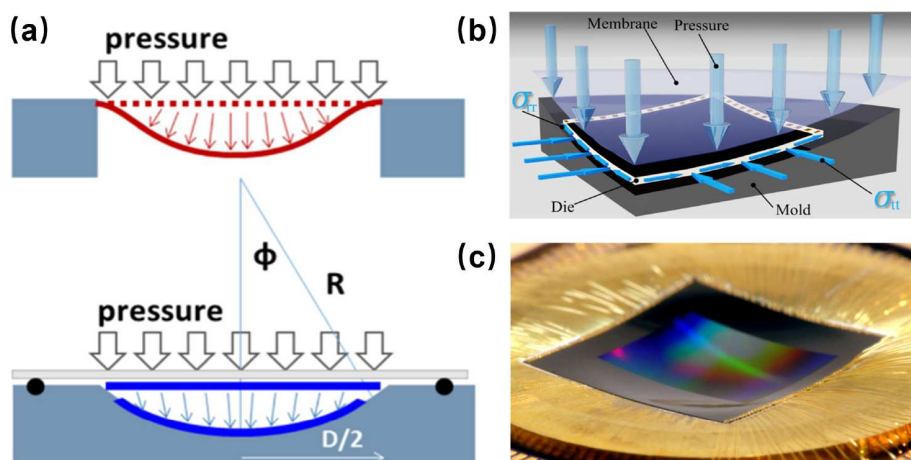


图3 (网络版彩色)直接塑形法。(a) 将薄硅基图像传感器塑形为曲面的方法示意图^[7]。直接塑形法制备的曲面硅基图像传感器的(b) 示意图和(c) 照片^[7]

Figure 3 (Color online) Direct deformation method. (a) Schematic illustration of the method for deforming a thin silicon-based image sensor into a curved surface^[7]. (b) Schematic diagram and (c) photograph of a curved silicon-based image sensor prepared by the direct deformation method^[7]

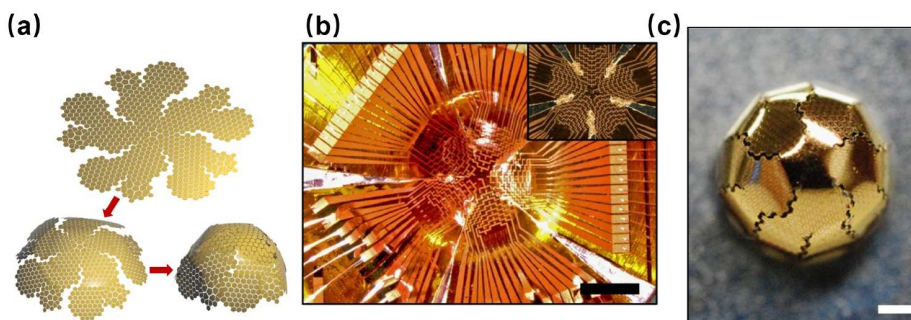


图4 (网络版彩色)(a) 受折纸艺术启发的曲面图像传感器制备方法^[13]。(b) 折叠前与(c) 折叠后的折纸像素阵列^[13]

Figure 4 (Color online) (a) Origami inspired curved image sensor fabrication method^[13]. Origami pixel array (b) before and (c) after folding^[13]

间比例,从而提升了像素密度。然而,这些结构依然需要依赖细小的连接部分,这对图案化工艺精度以及连接处材料的机械性能提出了极高要求,目前通过这些设计制备出具有高像素密度的曲面图像传感器仍然具有很大的挑战性。

上文所述的各种工艺,在根本上受到硅材料非柔性特性的限制,导致弯曲过程中产生应力问题,无法有效制备高密度曲面图像传感器阵列。如果能够制备基于柔性材料的光电二极管阵列,这一材料柔性的根本限制将得到突破,从而更高效地实现曲面图像传感器的制造^[5,11,14~19]。Choi等人^[20]基于柔性材料,提出了一种有效的曲面图像传感器制备方法。如图5(a)所示,该结构的感光单元基于 MoS_2 -石墨烯异质结,利用二维材料超薄且柔韧的特性,实现了大角度的弯曲。图5(b)展示了弯曲后的像素阵列,可以看到其成功形成了一个

较为光滑的曲面。图5(c)展示了这一结构在弯曲后能够很好地贴合生物曲面视网膜的模型,展现了这一方法在图像传感器领域的潜力。这一方法在弯曲前能够利用现有成熟的光刻等微加工工艺,实现高精度、高密度的像素阵列集成,而其材料的柔性则支持其实现较大角度的弯曲,是一种极具潜力的高分辨率曲面图像传感器制备工艺。在近期的研究工作中,柔性曲面图像传感器在感光性能与光学像差修正等方面取得了进一步的突破。Luo等人^[19]基于异质双层离子凝胶柱阵列结构,进一步提升了曲面图像传感器的光感性能。该器件无需外部辅助组件即可实现 180° 超广角、 $365\sim 970\text{ nm}$ 宽光谱感知,并依托其光突触结构具备神经形态成像功能。He等人^[21]利用柔性材料的可弯折特性,在聚对氯二甲苯(Parylene C)基底上构建了超薄钙钛矿曲面探测器阵列,开发出可反复弯折的曲面图像传感器结构。

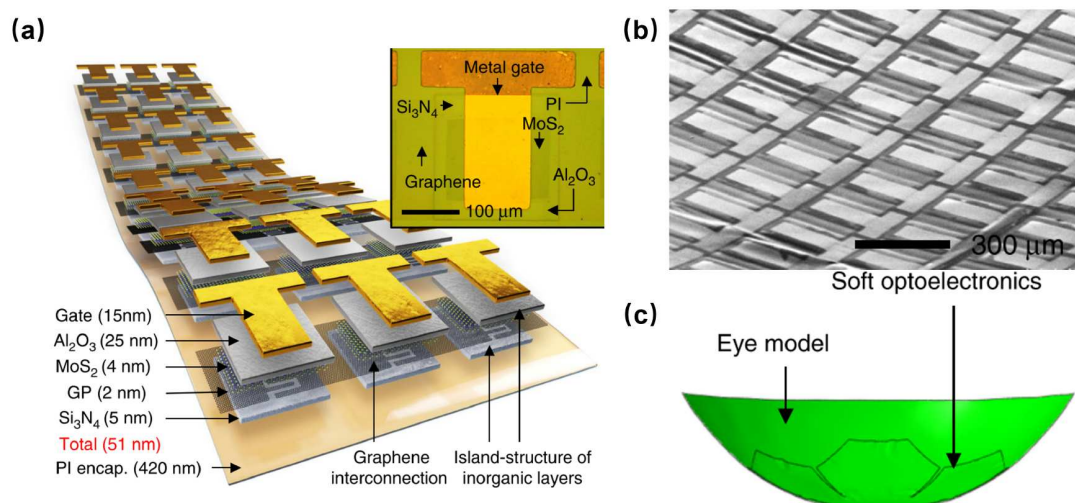


图5 (网络版彩色)(a) 柔性感光元件阵列示意图^[20]及其(b) 扫描电子显微镜照片^[20]. (c) 可以在弯曲后契合眼睛模型的柔性光电子器件阵列示意图^[20]

Figure 5 (Color online) Schematic illustration of (a) a flexible pixel array and (b) its scanning electron microscope image^[20]. (c) Schematic diagram of a flexible optoelectronic device array that can conform to an eye model after bending^[20]

该结构能够根据可变焦透镜的焦距调整曲面基底形变, 从而与透镜成像曲面自适应匹配, 实现变焦过程中光学像差的有效修正. 然而, 在半球形图像传感器的制备中, 柔性材料的使用虽然显著缓解了应力问题, 但并未完全消除其影响, 这仍限制了高分辨率器件的制备.

鉴于在将二维像素阵列转变为三维曲面图像传感器的过程中始终受到应力问题的限制, 直接在三维半球形基底上集成感光元件是一种理想的规避应力问题的制备方法^[22-29]. 基于电化学自组装结构的合成工艺, Gu等人^[28]直接在半球形铝基底上合成了感光半导体纳米线阵列, 并基于该结构制备了仿生图像传感器件. 具体的合成工艺如图6(a)所示, 首先利用金属铝柔软的特性, 将其冲压成半球形结构, 并在此基础上进行阳极氧化处理. 阳极氧化铝(AAO)具有高度有序排列的、密集的纳米孔道结构, 能够辅助生长高密度且取向有序的感光半导体纳米线阵列. 由于AAO透明且绝缘, 它不会干扰纳米线的光吸收, 同时能有效阻止相邻纳米线间的电荷传输, 解决串扰问题, 从而实现高性能半球面图像传感器的制备. 此外, 纳米线阵列由钙钛矿材料构成, 其优异的光电性能进一步确保了器件的光敏能力. 图6(b)和(c)分别展示了仿生眼的整体结构以及其中半球形纳米线阵列的结构^[29]. 基于高密度的纳米线阵列, 这一结构的感光元件密度可以达到 $4.6 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 以上, 远超人眼视细胞的密度, 是一种理想的高分辨率半球面图像传感器制备方法. 这种基于半球面半导体

纳米线阵列的设计直接在三维基底上实现了感光元件的高密度集成, 显著降低了半球面图像传感器的制备难度. 然而, 由于每个光探测器至少需要两个电极进行信号读取, 而电极的设计和制造不可避免地受到半球面图案化工艺精度的限制, 这一结构在实现高分辨率图像传感器方面仍面临较大的挑战.

3 展望

近年来, 多种曲面图像传感器的制备工艺路线得到了快速发展, 在大曲率阵列构筑、感光性能提升以及光学像差修正等方面均取得了重要突破, 为这一具有巨大应用潜力的成像器件的产业化奠定了坚实的技术与研究基础.

目前, 限制此类器件进一步发展的主要性能瓶颈在于其分辨率较低. 在曲率较大的器件中, 像素间距仍维持在数百微米量级, 使整体分辨率难以突破5000像素, 远低于现有平面图像传感器百万级以上的应用标准. 其根本原因在于曲面图案化工艺仍不成熟, 导致阵列集成密度难以显著提升.

针对这一问题, 可行的技术路径主要包括优化从平面到曲面的图案转移技术以及开发高精度的曲面阵列加工工艺. 一方面, 平面图案化工艺已相当成熟, 其空间分辨率远高于光学系统的衍射极限, 可高效制备高密度感光元件阵列. 通过像素材料选择、几何结构设计以及尺寸优化等手段, 有望将高密度平面阵列有效

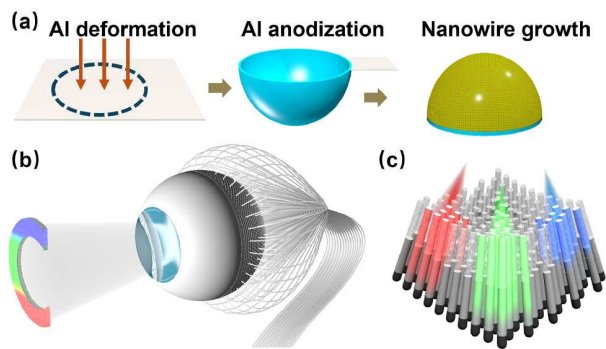


图6 (网络版彩色)(a) 半球面纳米线阵列制备方法示意图. (b) 基于半球面纳米线阵列的仿生眼器件^[29]. (c) 半球面纳米线阵列^[29]

Figure 6 (Color online) (a) Schematic illustration of the fabrication method of a hemispherical nanowire array. (b) Bionic eye device based on the hemispherical nanowire array^[29]. (c) Hemispherical nanowire array^[29]

转移至大曲率基底上, 从而实现高分辨率曲面图像传感器的制备. 另一方面, 3D打印、气溶胶打印及激光刻蚀等先进三维微加工技术已被证明可在非平面基底上实现微米级精度的结构加工. 结合大面积感光材料沉积工艺, 这些方法有望在高曲率表面上实现感光像素与电极阵列的高精度、大规模图案化, 从而突破曲面图像传感器在分辨率方面的核心限制. 展望未来, 随着微纳制造技术、曲面器件制备工艺以及仿生光学设计的持续融合与创新, 曲面图像传感器有望在智能机器视觉领域展现出革命性的应用潜力.

4 总结

受高性能生物视觉系统的启发, 曲面图像传感器展现出了卓越的视觉性能和广阔的应用潜力. 其曲面几何形状能够与光学元件的成像曲面高度适配, 从而直接修正场曲. 这一特性显著简化了透镜组的结构, 使系统仅需依赖少量简单的光学元件即可实现高质量成像, 进而大幅降低系统复杂性并推动视觉系统的小型化. 此外, 曲面传感器能够在不显著引入光学畸变的情况下实现超过 140° 的超广角成像能力, 极大拓展了其应用场景.

在过去的二十余年, 多种仿生图像传感器被陆续报道, 研究者们开发出了多种新方法有效制备曲面图像传感器. 然而, 由于目前尚缺乏成熟的曲面图案化工艺, 现有的曲面图像传感器在同时实现大曲率和高分辨率上依然面临诸多挑战. 除了通过直接塑形法制备的小曲率器件外, 目前曲率较大的器件中, 像素与像素的中心间距仍停留在数百微米级, 这种分辨率不足导致图像信号采集效率较低, 难以满足现代智能系统对高精度视觉功能的需求.

因此, 如何开发创新的制造方法、实现曲面像素阵列的高密度集成与高效信号读取, 已成为制约这一类器件发展的核心问题. 工艺改进、材料创新、新型架构设计等方向的协同发展有望有效推动曲面图像传感器在高分辨率和大曲率器件领域取得重要突破, 进一步拓展其在仿生视觉和智能成像系统中的应用潜力.

致谢 范智勇感谢新基石科学基金会“科学探索奖”以及香港科技创新联盟通过中银香港科技创新奖的支持.

参考文献

- 1 Zhuang Z, Chen Y, Yu F, et al. Field curvature correction method for ultrashort throw ratio projection optics design using an odd polynomial mirror surface. *Appl Opt*, 2014, 53: E69
- 2 Kwon J H, Rhee H G, Ghim Y S, et al. Field-curvature correction according to the curvature of a CMOS image-sensor using air-gap optimization. *J Opt Soc Korea*, 2015, 19: 658–664
- 3 Mouroulis P. On the correction of astigmatism and field curvature in telescopic systems. *Optica Acta-Int J Opt*, 1982, 29: 1133–1159
- 4 Matsunaga S, Nayar S K. Field curvature correction using focal sweep. *IEEE Trans Comput Imag*, 2015, 1: 259–269
- 5 Huang X, Guo Q, Yang D, et al. Reversible 3D laser printing of perovskite quantum dots inside a transparent medium. *Nat Photonics*, 2020, 14: 82–88
- 6 Itonaga K, Arimura T, Matsumoto K, et al. A novel curved CMOS image sensor integrated with imaging system. In: Symposium on VLSI Technology (VLSI-Technology): Digest of Technical Papers. New York: IEEE, 2014. 1–2
- 7 Guenter B, Joshi N, Stoakley R, et al. Highly curved image sensors: a practical approach for improved optical performance. *Opt Express*, 2017, 25: 13010–13023
- 8 Ko H C, Stoykovich M P, Song J, et al. A hemispherical electronic eye camera based on compressible silicon optoelectronics. *Nature*, 2008, 454:

748–753

- 9 Song Y M, Xie Y, Malyarchuk V, et al. Digital cameras with designs inspired by the arthropod eye. *Nature*, 2013, 497: 95–99
- 10 Kim M S, Kim M S, Lee M, et al. Feline eye-inspired artificial vision for enhanced camouflage breaking under diverse light conditions. *Sci Adv*, 2024, 10: eadp2809
- 11 Choi C, Hinton H, Seung H, et al. Anti-distortion bioinspired camera with an inhomogeneous photo-pixel array. *Nat Commun*, 2024, 15: 6021
- 12 Rao Z, Lu Y, Li Z, et al. Curvy, shape-adaptive imagers based on printed optoelectronic pixels with a kirigami design. *Nat Electron*, 2021, 4: 513–521
- 13 Zhang K, Jung Y H, Mikael S, et al. Origami silicon optoelectronics for hemispherical electronic eye systems. *Nat Commun*, 2017, 8: 1782
- 14 Kim M, Chang S, Kim M, et al. Cuttlefish eye-inspired artificial vision for high-quality imaging under uneven illumination conditions. *Sci Robot*, 2023, 8: eade4698
- 15 Park J, Kim M S, Kim J, et al. Avian eye-inspired perovskite artificial vision system for foveated and multispectral imaging. *Sci Robot*, 2024, 9: eadk6903
- 16 Choi C, Leem J, Kim M, et al. Curved neuromorphic image sensor array using a MoS₂-organic heterostructure inspired by the human visual recognition system. *Nat Commun*, 2020, 11: 5934
- 17 Lee M, Lee G J, Jang H J, et al. An amphibious artificial vision system with a panoramic visual field. *Nat Electron*, 2022, 5: 452–459
- 18 Liu W, Du Z, Duan Z, et al. Neuroprosthetic contact lens enabled sensorimotor system for point-of-care monitoring and feedback of intraocular pressure. *Nat Commun*, 2024, 15: 5635
- 19 Luo X, Chen C, He Z, et al. A bionic self-driven retinomorphic eye with ionogel photosynaptic retina. *Nat Commun*, 2024, 15: 3086
- 20 Choi C, Choi M K, Liu S, et al. Human eye-inspired soft optoelectronic device using high-density MoS₂-graphene curved image sensor array. *Nat Commun*, 2017, 8: 1664
- 21 He Z, Sun B, Lu H, et al. Focus-tunable real-time imaging system based on ultrathin perovskite curved image sensor with hierarchical mesh design. *Sci Adv*, 2025, 11: eadw7826
- 22 Zhou Y, Sun Z, Ding Y, et al. An ultrawide field-of-view pinhole compound eye using hemispherical nanowire array for robot vision. *Sci Robot*, 2024, 9: eadi8666
- 23 Zhou Y, Qiu X, Wan Z, et al. Halide-exchanged perovskite photodetectors for wearable visible-blind ultraviolet monitoring. *Nano Energy*, 2022, 100: 107516
- 24 Long Z, Zhou Y, Ding Y, et al. Biomimetic optoelectronics with nanomaterials for artificial vision. *Nat Rev Mater*, 2024, 10: 128–146
- 25 Long Z, Ding Y, Poddar S, et al. Bio-inspired visual systems based on curved image sensors and synaptic devices. *Mater Today Electron*, 2023, 6: 100071
- 26 Ding Y, Liu G, Long Z, et al. Uncooled self-powered hemispherical biomimetic pit organ for mid- to long-infrared imaging. *Sci Adv*, 2022, 8: eabq8432
- 27 Long Z, Ding Y, Qiu X, et al. A dual-mode image sensor using an all-inorganic perovskite nanowire array for standard and neuromorphic imaging. *J Semicond*, 2023, 44: 092604
- 28 Gu L, Poddar S, Lin Y, et al. A biomimetic eye with a hemispherical perovskite nanowire array retina. *Nature*, 2020, 581: 278–282
- 29 Long Z, Qiu X, Chan C L J, et al. A neuromorphic bionic eye with filter-free color vision using hemispherical perovskite nanowire array retina. *Nat Commun*, 2023, 14: 1972

Summary for “面向高性能人工视觉的曲面图像传感器及其制造工艺”

Curved image sensors and their fabrication technologies for high-performance artificial vision systems

Zhenghao Long^{1,2,3}, Kaichen Wang^{1,2} & Zhiyong Fan^{1,2,4*}

¹ Department of Electronic and Computer Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong 999077, China

² State Key Laboratory of Advanced Displays and Optoelectronics Technologies, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong 999077, China

³ Hong Kong Center for Construction Robotics, Hong Kong 999077, China

⁴ Department of Chemical and Biological Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong 999077, China

* Corresponding author, E-mail: eezfan@ust.hk

Bioinspired visual devices based on curved image sensors have attracted extensive attention due to their advantages of simplified optical structure, reduced data redundancy, and ultrawide field-of-view imaging capability. Such features endow them with great potential in emerging vision - dependent applications, including autonomous driving, humanoid robotics, drones, and intelligent navigation systems. However, the fabrication of high-performance curved image sensors remains extremely challenging, primarily because conventional planar micro–nano manufacturing processes are incompatible with large-curvature substrates. The formation of high-density photodetector arrays on curved geometries requires precise control over material deformation, interfacial stress, and electrical connectivity, all of which go beyond the capabilities of existing lithographic techniques. Consequently, the development of reliable and scalable integration strategies for curved pixel arrays has become an urgent research focus in recent years.

This review systematically traces the major advances made in curved image sensor technology over the past two decades. Firstly, the evolution of bioinspired architectures, from the hemispherical electronic eye mimicking the human retina, to compound-eye cameras inspired by arthropods, is analyzed to highlight how bionic design principles contribute to overcoming optical aberrations and improving imaging uniformity across wide viewing angles. Furthermore, we summarized representative fabrication approaches such as mechanical deforming and transfer, stretchable circuit integration, origami–kirigami transformation, and monolithic growth on nonplanar surfaces. Each method is discussed from perspectives of device structure, mechanical modeling, optical performance, and process feasibility. The paper also reviews breakthroughs in flexible optoelectronic materials and photosensitive nanostructure systems that enable large-strain accommodation and efficient light detection on curved substrates. Recent progress in perovskite-based photodetectors, organic thin-film electronics, and two-dimensional semiconductors such as MoS₂ and graphene has opened new pathways toward highly integrated, lightweight, and conformable imaging modules. These efforts are paving the way for constructing artificial vision systems capable of matching and eventually surpassing the dynamic range, adaptability, and sensitivity of biological eyes.

Finally, key challenges and potential directions for future research are discussed, including large-scale curved array integration, high-resolution integration strategies, optical-electronic co-optimization, and system-level intelligence coupling with neuromorphic computing. By summarizing the historical development, existing technical barriers, and emerging solutions, this work aims to provide researchers with an in-depth understanding and valuable insight into the design and fabrication of next-generation curved imaging sensors, thereby promoting their practical deployment in advanced intelligent visual systems.

curved image sensor, bionic eye, optoelectronic device, photosensitive semiconductor

doi: [10.1360/CSB-2025-5175](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5175)