

仿生光學

文・圖／蘇國棟

自然界常提供人們許多發明的靈感，例如我們日常生活中常用的魔鬼氈（Velcro），就是1941年一位瑞士籍的電機工程師，在光學顯微鏡底下仔細觀察小樹叢的種籽（burdock seed），所獲得的靈感而發明的。在光學當中，過去幾十年也有愈來愈多的研究，是受到生物結構啟發的仿生光學（Bio-inspired Optics）。在接下來的篇幅，會先回顧過去的光學材料，再談談近年仿生光學的發展，接著介紹本校光電所微光學實驗室在這領域的研究成果，最後是仿生光學未來可能影響。

傳統上，常用的微/奈米級光學元件，包括繞射光柵，光子晶體，超材料（metamaterial），主要依賴我們所熟悉的半導體製造工藝，成功地形成複雜的微/奈米結構。這些過程通常包括數個步驟的集合，包括光罩蝕刻（lithography），靶材料的物理/化學沉積（deposition），和濕/乾蝕刻（etching）。這樣可以讓研究人員，在微/奈米尺度上實驗出各種奇異的光學現象。儘管在過去20年中半導體製造方法取得了巨大進步，但仍存在一些局限性：由硬質材料形成的光學元件通常不具有回應周圍環境變化而自主重新配置的能力。而且，光學系統中不同組件和材料成分的三維立體結構仍然具有挑戰性。加上使用光罩蝕刻，實際可實現的最小特徵尺寸，特別是標準大學實驗室設備，限制在幾十奈米。特徵尺寸的這種限制可能代表進入分子和原子尺度設計空間的障礙，奈米級結構的精細控制對於超材料尤其重要。由於當前硬質材料的選擇和半導體製造的方法，這些因素限制了光學技術的發展。

從材料選擇的角度來看，“軟光學”領域的最新進展和不斷努力使我們能夠開始著手解決傳統“硬光學”的局限性。使用軟材料可以實現其他無法實現的結構尺寸和成分，它們具有動態適應和重新配置的能力。從而實現前所未有的光學功能。術語“軟光學”主要指從各種單獨組件實現光學系統，例如光柵，光子晶體，微透鏡和超材料，其完全或部分由多種軟性材料形成。這些材料包括流體，DNA組件，

水凝膠，柔性和可拉伸彈性體，光可重構聚合物，生物組分和膠體懸浮液。它們使用合適軟性物質處理的方法來製造，包括自組裝，反應擴散過程，奈米壓印/轉移印刷，流體擠出，定向組裝，剪切和其他非常規方法。在光學元件中使用軟材料的另一個重要優點，是它們能夠動態反應各種物理或化學刺激的特性，包括機械力，光，化學觸發，溫度，濕度或施加的電場。DNA互補結合，定向膠體自組裝，彈性體編程屈曲以及可重新配置的微流體通道和乳液液滴的使用等研究成果，使得光學元件能夠實現複雜的自適應，刺激反應，甚至可自主重構的微/奈米結構。

在臺大的微光學實驗室當中，我們開始使用一種稱為人工肌肉的離子聚合物金屬複合材料（ionic polymer metal composite, IPMC）。人工肌肉的結構包括在兩側的金屬電極之間的離子聚合物膜。離子聚合物膜是人工肌肉的驅動骨幹。通過離子交換過程中的擴散，離子聚合物膜可以吸收水分子和幾種陽離子，如氫離子，鋰離子，鈉離子等。在這些陽離子中，鋰離子為人工肌肉提供了最佳的力量來源。當電壓施加到電極的兩側時，固定作為聚合物膜結構的陰離子基團固定不變。但是，陽離子很容易被陰極吸引。同時，由於水分子的極性，他們也被移動的陽離子拖到陰極。在陰極聚集的許多水分子引起離子聚合物膜的體積膨脹。人工肌肉內非均勻分布的水分子，導致不平衡的應變並使其向陽極側彎曲。我們利用這彎曲的特性，製作出可以用電壓改變彎曲度的反射鏡，來達成不同的光學聚焦效果，並將其應用在

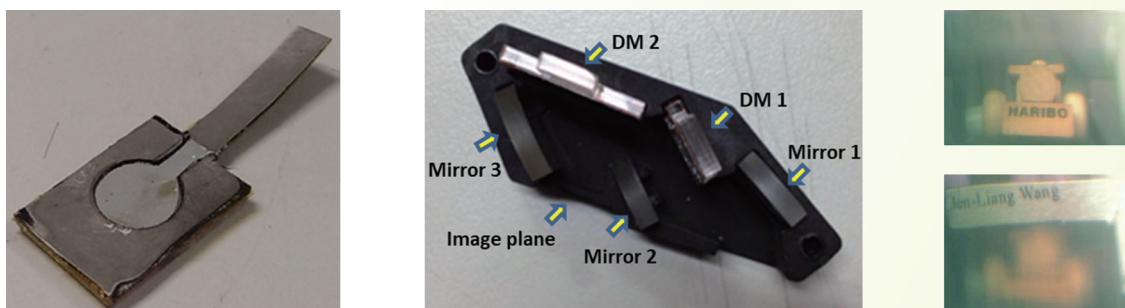


圖1：由左到右分別是以人工肌肉製作出來的反射鏡，將此反射鏡應用到微型化的光學相機上，以及其自動對焦的照片。在自動對焦的照片中，原本是聚焦在遠處的玩具火車上，並顯示出HARIBO的英文字樣。接下來用電壓控制人工肌肉反射鏡的彎曲度，改變聚焦到近處位置，呈現出Jen-Liang Wang的英文字樣。

微型化的相機上，達到自動對焦的目的。這樣的設計也是由人眼得到設計靈感；人眼上的肌肉會改變水晶體的彎曲度來自動對焦。與傳統相機比較起來，因為不需要額外的電動馬達來移動光學鏡片，其體積與重量可以大幅減少。圖1說明應用人工肌肉開發的微型化的相機。

除了人眼之外，昆蟲的複眼已是自然界中另一種常見的光學系統。在我們的實驗室發現，傳統相機中的鏡片數量可以通過彎曲的六邊形微透鏡陣列來減少。這種靈感來自人眼和昆蟲的複眼。在人眼中，有一個透鏡將物體光聚焦到彎曲的視網膜上。然而，商用相機採用低成本的平面圖像傳感器而不是彎曲圖像傳感器。為了將光聚焦到平面表面上，單透鏡不可避免地會有顯著的光學像差。因此，我們引入彎曲的六邊形微透鏡陣列來模仿昆蟲複眼以校正光學像差。我們也採用了軟性的高分子光學材料，透過流體擠出和3D立體壓印/轉移印刷的製作技術，成功的模仿出類似昆蟲複眼結構的光學鏡片，如圖2的電子顯微鏡照片。這樣的仿昆蟲複眼相機，其所需的鏡片由原來的五個鏡片減少為一個，且厚度僅有原來相機厚度的一半，大約3毫米左右。

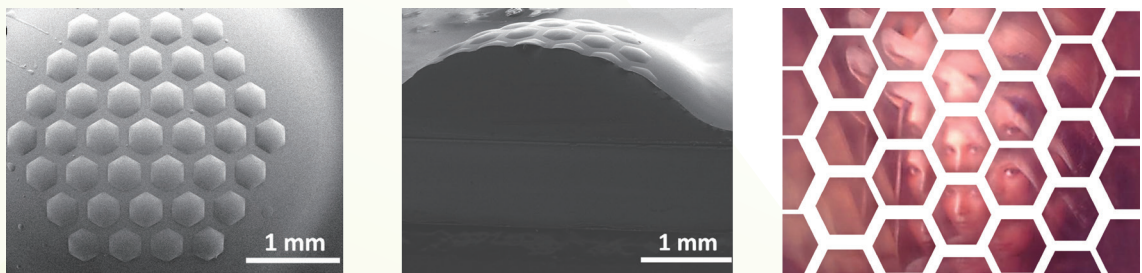


圖2：由左到右分別是以軟性高分子光學材料製作出仿昆蟲複眼鏡片，電子顯微鏡鳥瞰圖，以及其成像照片。在成像照片中，因為昆蟲複眼結構的關係，將會在六邊形鏡片內各自形成小範圍圖樣。經過後續電腦處理計算後，即可形成一個完整成像。

在仿生光學方面，大自然的光操作策略組合提供了一個很好的思考角度。透過軟性物質的多材料整合，以及在相關長度尺度上更好地製造方法，最近在使用軟性材料的成功為推動光學系統設計提供了令人信服的機會。但是迄今為止，合成軟光學材料還不能達到頭足類動物的皮膚令人難以置信的多功能性和光學性能——利用其皮膚中的各種細胞內光學特徵來動態控制反射光的光譜成分和亮度，並改變微觀

和宏觀皮膚紋理，同時還能夠使身體在很大程度上整體變形。通過繼續仔細研究自然界的光操作策略，我們可以學習有關跨尺度形態控制，多功能材料中光學元件的整合，成分和形態的動態控制，以實現可重構和反應的光學材料。我們期望當前正在進行的和未來的研究工作將迅速發展，形成進步的光學材料和元件，例如，匹配或超過頭足類動物的皮膚的驚人光學和機械特性。柔軟的光學材料將極大地豐富光學工程師的工具箱，並為光學技術奠定基礎，解決醫療保健，生物工程，能量捕獲和轉換，傳感，通信和數據處理方面的重大21世紀挑戰。 （本期專欄策畫／電機系林清富教授）

參考資料：

- [1]Mathias Kolle and Seungwoo Lee, “Progress and Opportunities in Soft Photonics and Biologically Inspired Optics,” *Advanced Materials*, 30, 1702669 (2018)
- [2]Wei-Hsiang Chen, Jia-Shiun Lu, and Guo-Dung J. Su, “Ionic polymer metal composite for an optical zoom in a compact camera,” *OPTICS EXPRESS*, Vol. 23, No. 10, 13266 (2015)
- [3]Wei-Lun Liang,Jun-Gu Pan, and Guo-Dung J. Su, “One-lens camera using a biologically based 2 artificial compound eye with multiple focal lengths,” *Optica*, Vol. 6, No. 2 (2019)



蘇國棟小檔案

1994 年國立臺灣大學電機系畢業，分別於 1998 年和 2001 年在加州大學洛杉磯分校獲得電機工程碩士和博士學位。博士研究興趣在微機電掃描裝置和適應性光學的微鏡片陣列。2001 到 2004 年間並擔任美國 DoD 和 NASA 的研究計畫主持人。自 2004 年起，加入臺灣大學電機系 / 光電所。目前的研究包括光學系統設計，光通信的微機電元件，緊湊的光學成像系統和奈米粒子上的表面等離子體現象。