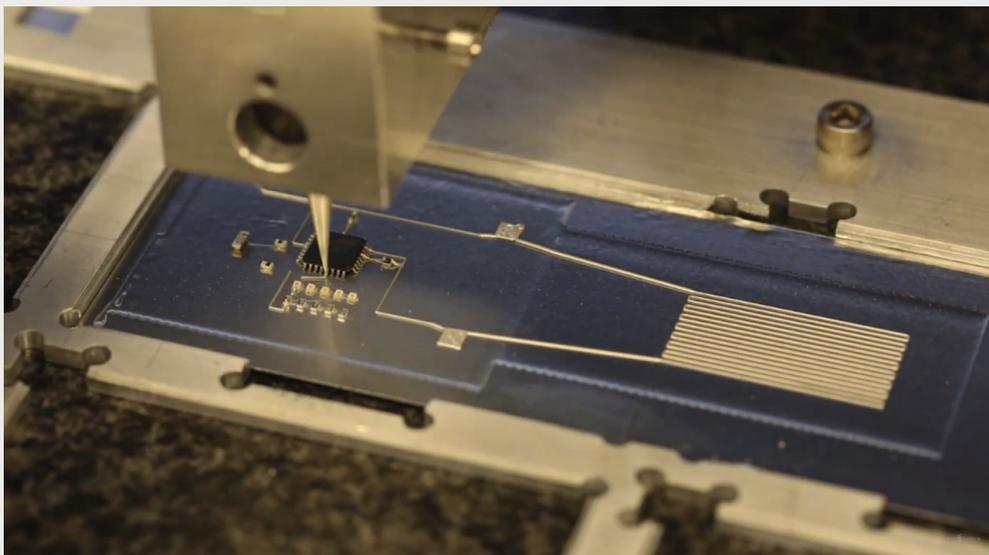




拉伸自如 混合3D列印技術

吳佩芸 文

2017年9月6日，由哈佛大學維斯生物啟發工程研究所 (Wyss Institute for Biologically Inspired Engineering)、約翰·保爾森工程和應用科學學院 (Harvard John A. Paulson School of Engineering and Applied Sciences, SEAS) 與美國空軍研究實驗室(Air Force Research Laboratory)合作開發的「混和3D列印技術」在《Advanced Materials》上公開發表，其研究將導電油墨和電子元件結合到柔韌耐用的穿戴式裝置中，帶來革命性的突破。



正在繪製電路的3D列印機器。(圖片來源 / 擷取自Wyss Institute)

穿戴式裝置的發展

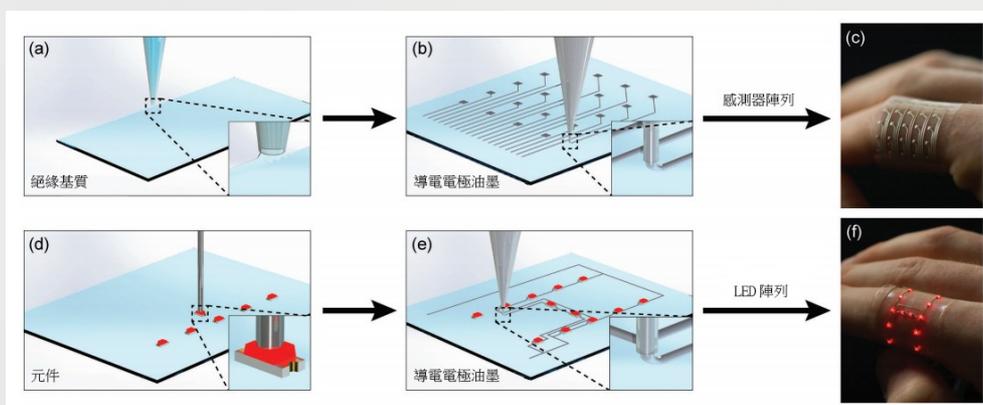
從早期智慧眼鏡(Google Glass)、智慧手錶(Apple Watch)的出現，到今年消費性電子展(Consumer Electronics Show，簡稱CES)上的智能衣(e-skin)，可以發現穿戴式裝置的設計逐漸趨向輕、薄以及貼合人體為主。

然而，穿戴式裝置越來越普及的同時，卻也面臨發展上的阻礙。為了提升使用者穿戴的舒適程度以及感測器的精準度，「使穿戴式裝置如同人的皮膚一般具有彈性」成為一股新的研發趨勢，但由於電子零件為剛性結構，無法被任意的拉伸，實現這個目標始終具有一定的挑戰性。

由於其可編程性、可延展性和低進入門檻，過往已有一些印刷方式被引入電子設備的製造業，但都需要一些手工裝配步驟來實現期望的裝置功能。「混和3D列印技術」沿襲了這些印刷方式的特點並加以改善，不但解決了電子零件無法拉伸的問題，也使製過程完全自動化，為穿戴式裝置的一大躍進。

什麼是混和3D列印技術？

「混和3D列印技術」(Hybrid 3D Printing)的出現，旨在創造一種生產軟性電子產品的新方法。它透過墨水直寫 (direct ink writing, DIW) 的方式，將絕緣基質 (insulating matrix) 和導電電極油墨直接印刷在特定的佈局上產生電路，並利用自動拾放功能 (pick-and-place, P+P)，通過一個空的吸嘴在真空模式下拾取單獨元件，移到基質上，在真空關閉模式下擺放至正確的位置。由墨水直寫印刷的導電線路與自動拾放功能所形成的組件互連可以產出軟性電子設備。



(a)、(b)、(c)為墨水直寫，(d)、(e)、(f)自動拾放功能。(圖片來源 / 吳佩芸重製)

資料來源：[《Advanced Materials》](#)

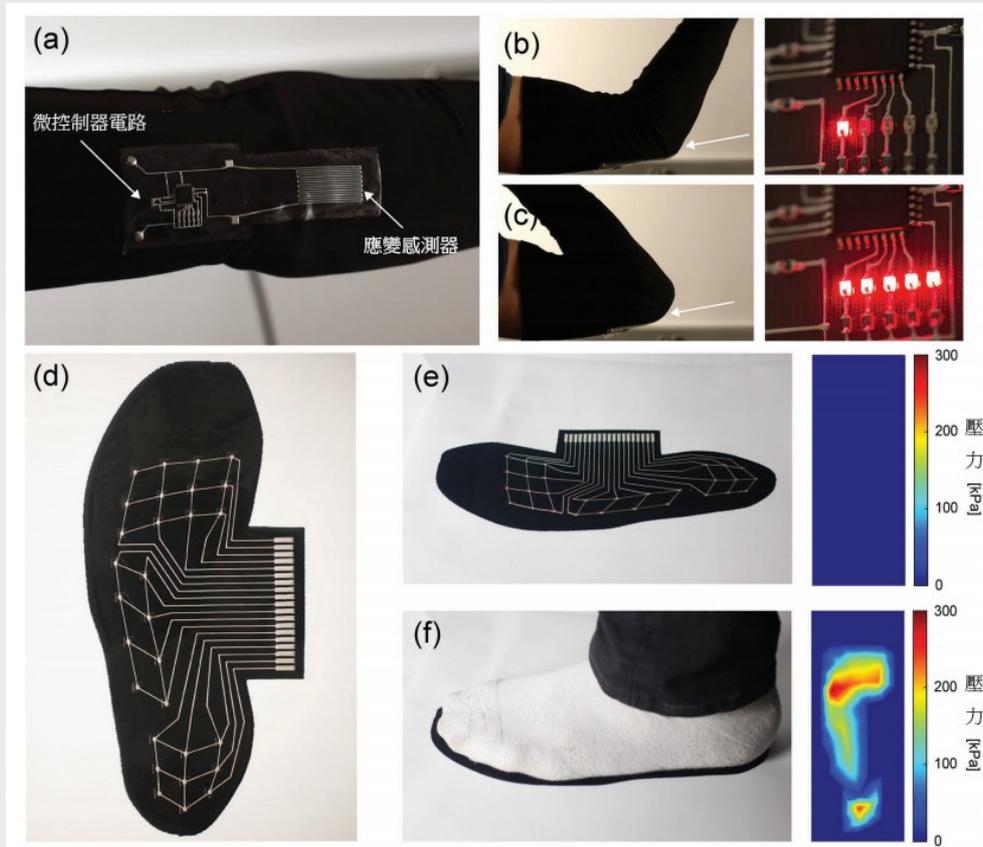
概念驗證 混和3D列印技術的應用

研究團隊首先開發了熱塑性聚氨酯 (以下簡稱TPU) 的基質和導電油墨。TPU是一種有機高分子合成材料，介於橡膠和塑膠之間，特點是具有生物相容性以及高度伸縮性，因此不會對人體造成毒害作用，適合作為印刷基體。導電電極的製造，則是將片狀銀粉 (橫向尺寸為2微米) 添加至純TPU油墨中。

為了檢驗其成效，研究團隊做了兩項實驗，一個為應變式感測器，另一個則是壓力感測器。應變式感測器的製作方式是將TPU與含銀TPU電極油墨印刷到紡織物基體上，並以自動拾放的方法加上微控制器晶元和LED讀出器，製成一種類似「袖套」的可穿戴裝置。它能夠通過點亮LED燈的數目，顯示出穿戴者手臂的彎曲程度。

而壓力感測器則是使用碳黑摻雜的TPU作為印刷基體，以增強導電電極油墨的可

視化，並採用電路互相交疊的方式減少連接點的數量。舉例來說，若一個裝置有29個感測器，使用電路交疊的方式只需要19個連接點就可以使之運行，而不是58個（每個傳感器都有2個電極）。研究團隊將壓力感測器做成人的左腳掌的形狀，在沒有施加壓力的情況下，感測器不會有任何變化，而當人踩在上面時，透過測量每個感測器的相對電容，可以得到獨特的足底壓力分佈圖。



實驗過程的記錄，(a)、(b)、(c)為應變式感測器，(d)、(e)、(f)為壓力感測器。（圖片來源 / 吳佩芸重製）

資料來源：《Advanced Materials》

原理簡單 實則隱含大學問

混和3D列印技術的應用看似簡單，其實在材料的使用及選擇上，研究團隊花了非常多的心力。

在印刷基體與墨水方面，比起純TPU油墨，加入銀粉的TPU油墨具有較強的剪切稀釋行為，它的黏度會隨著剪切應力（攪拌或壓力）的增加而減少，所以可輕易的通過吸嘴。另外，相對較高的儲存能量和防止外力致使變形的能力，使之在離開吸嘴時，仍可保持其絲狀型態。經過乾燥後，此種油墨產生的軟性電子裝置，在拉伸期間或拉伸之後不會出現剝落或裂開的現象，也克服了印刷電極易從底層的聚合物基體上剝落的現象。

在電子元件（例如LED、電阻、晶元）方面，剛性材料組成的特點，使得它的硬度比TPU印刷基體與加入銀粉的TPU油墨還要高，當拉伸時，作用力集中局限在

裝置上的電極界面會導致元件與電路分離。研究團隊觀察到，此現象的發生是元件和導電電極油墨之間接合不良所引起的。為了增強黏合力，放置元件前，團隊先利用TPU點錨定這些元件的位置，以創造出一個黏合區域，將施加的作用力分佈到整個基體中，從而使裝置能夠在保持功能的同時被拉伸。

而選用3D列印技術的原因究竟為何，SEAS博士後研究人員同時也是論文合著者的Will Boley提供了解答，「由於墨水和基質是3D列印的，所以我們可以完全控制在何處繪製導電特徵的圖案，設計電路，並創造幾乎所有尺寸和形狀的軟性電子設備。」

混和3D列印技術產出軟性電子設備的過程。(影片來源 / [Wyss Institute](#))

未來趨勢

透過開發新穎的絕緣基質與導電油墨，應變式感測器和壓力感測器被製造出來，並具有功能性上的特色。混和3D列印技術的研究結果突破目前穿戴式裝置所遇到的瓶頸，為其提供了一個新的發展方向。也許在不久後，穿戴式裝置又將掀起一股熱潮！



記者 吳佩芸

編輯 蔡亞融

