

感測器和機器人技術的集成與應用

Integration and Application of Sensors and Robotic Technologies

李貫名、林宗宏

Kuan-Ming Lee, Zong-Hong Lin

感知型機器人通過人與機器人互動的感知活動，在醫療和製造部門等實際環境中是非常具有意義的。而感知型機器人的結構複雜性所造成感測器在幾何定位上的困難以及提出相應的解決方案，一直是感知型機器人發展的主要挑戰。通過三維印刷工藝將三維電子組件集成到三維結構中，可以作為有潛力的解決方案以設計應用於實際的感知型機器人系統。而三維印刷工藝主要又可分為擠壓成型法及化學沉積法。三維印刷工藝所提供的優勢在於可以在一次設置中製造複雜的三維電子設備結構，允許設計上的靈活性和定制功能的便利。因此，透過三維感測器系統的平臺，並進一步研究其擴展到機械、化學和生物醫學領域之感知型機器人。

Perceptual robots are ideal in real-world environments such as medical and manufacturing sectors through the perceptual activity of human-robot interaction. Difficulties in geometric positioning of sensors due to the structural complexity of perceptual robots and proposing corresponding solutions have been the main challenges in the development of perceptual robots. The integration of 3D electronics into 3D objects through the 3D printing process can be a potential solution for designing actual perceptual robotic systems. The three-dimensional printing process can be divided into the extrusion method and the chemical deposition method. 3D printing offers the advantage of being able to fabricate complex 3D electronic device structures in a single setup, allowing design flexibility and the convenience of customization. Therefore, through the platform of three-dimensional sensor system, and further research on its extension to mechanical, chemical and biomedical fields of perceptual robotics.

一、簡介

1. 機器人技術的重要性

如今，我們很容易意識到，機器人技術的發展對我們來說是不可或缺的存在。由於機器人技術在人類生活中的優勢，其未來的潛力不僅在相關專業人士之間，而且在普通民眾中也經常被討論。⁽¹⁾ 機器人技術領域融合了電子、機械和計算機科學⁽²⁾，同時還能與其他領域相

互結合。這種結合的結果使機器人不僅可以改善人力資源的匱乏且可以完成人類生理上無法完成的任務。此外，只有人類才有的移情 (empathetic) 性質，而機器人在這方面就可以顯示其不受情感影響的獨特性。⁽³⁾ 例如，儘管探索了太空⁽⁴⁾、海底⁽⁵⁾、核電站⁽⁶⁾ 等感染性危險場所，⁽⁷⁾ 機器人也能夠不離不棄且與人類形成強烈的連結。⁽⁸⁾ 除了這些任務，機器人還能夠檢測生理狀態並實現人類在互動上的需求，如健康狀況和情感狀態。因此，必須將具有特定功能的機器人設計成「感知型機器人」。感知型機器人是指具有感知功能的機器人平臺，通過接管人類的一項或多項複雜任務來檢測環境刺激或變化。為了開發對周圍複雜環境做出響應的感知型機器人，應將感測器及其支援電路集成到機器人中。首先，必須設計具有良好靈敏度和可靠性的感測器，以追蹤環境中的任何變化，並將資料傳輸到監測單元。⁽⁹⁾ 其次，感測器的結構應嵌入機器人的內部或外部空間，而不妨礙機器人本體的運動，以進行數據採集。⁽¹⁰⁾ 最後，為了使機器人實現順暢的運作，必須要有一個完善的閉環系統 (closed-loop system)。^(11, 12) 基於這些，集成感測器的未來型機器人將具備良好的性能以監測即時事件，並有先進的診斷功能，在感知過程中對周圍的變化提供即時反饋。

2. 感測器的開發

在感測器設計方面，距離開發出可實際應用於感知型機器人的感測器還有一段路要走。儘管早期關於二維⁽¹³⁻¹⁵⁾ 感測器的研究已被廣泛應用於不規則形狀的結構，例如穿戴式裝置或基於電子皮膚的感測器，⁽¹⁶⁾ 但由於各種挑戰，包括電子組件或結構上的集成、機器人驅動時感測器的穩定定位，以及機器人在驅動時的不穩定性所帶來更困難的資料採集和處理。然而，這些開發的感測器仍不足以應用於感知型機器人。⁽¹⁷⁻¹⁹⁾ 因此，除了單純使用二維類型的感測器外，集成在三維結構中的三維感測器自然被認為是下一代感測器的新選擇，並應用於感知型機器人以克服其感測器在集成上的幾何障礙。這是因為三維印刷工藝能夠將感知部件 (sensing part)、執行器 (actuator) 及其計算單元 (computation) 作為一個系統集成到三維結構中。^(18, 20) 此外，電子組件的立體設計允許在機器人有限的內部空間中增加更多的電路系統，有助於推進「感知型機器人」的發展。

二維感測器的發展使用了先進的製造技術。例如，選擇性離子鍍 (selective ion plating)、⁽²¹⁾ 濺射 (sputtering)、⁽²²⁾ 噴墨印刷 (ink-jet printing)⁽²³⁾ 作為積層製造 (additive manufacturing, AM) 技術，或光刻 (photo-lithography)⁽²⁴⁾ 和蝕刻 (etching)⁽²⁵⁾ 作為消去 (subtractive) 技術已經被廣泛採用。然而，由於它們難以實現在加工能力上的靈活製造，上述方法在製造符合機器人結構的感測電子組件方面仍然受到限制。因此，在感測器的製造方法中，三維印刷已經逐漸顯示出其優勢，特別是通過其高靈活性來製造感測系統的電子組件，並將感測器無縫地集成到機器人中。⁽²⁶⁾ 此外，對於建構複雜的三維結構裝置而言，低成本的 AM 技術也有著一定的優勢。這樣的三維印刷感測器也就自然地被運用到機器人技術中。

而用於製造三維結構的三維印刷技術和最近開發的導電材料，以提升感測器集成到感知型機器人的相容性。從實踐的角度來看，三維印刷感測器所面臨的挑戰為三維印刷技術的解析度問題以及其與機器人驅動系統的相互連接等。

在未來的感知型機器人中，如圖 1 所示的人機互動將是機器人技術中最重要的目標之一。感知型機器人具有先進的生物訊號檢測系統，如圖 1(a)。除了簡單地配備感測器外，感知型機器人還可以通過與人互動，如圖 1(b) 所示，監測和評估人類的健康和情感狀態。這種先進的感測技術使機器人與人類之間產生共鳴，進而具有更好的適應性。

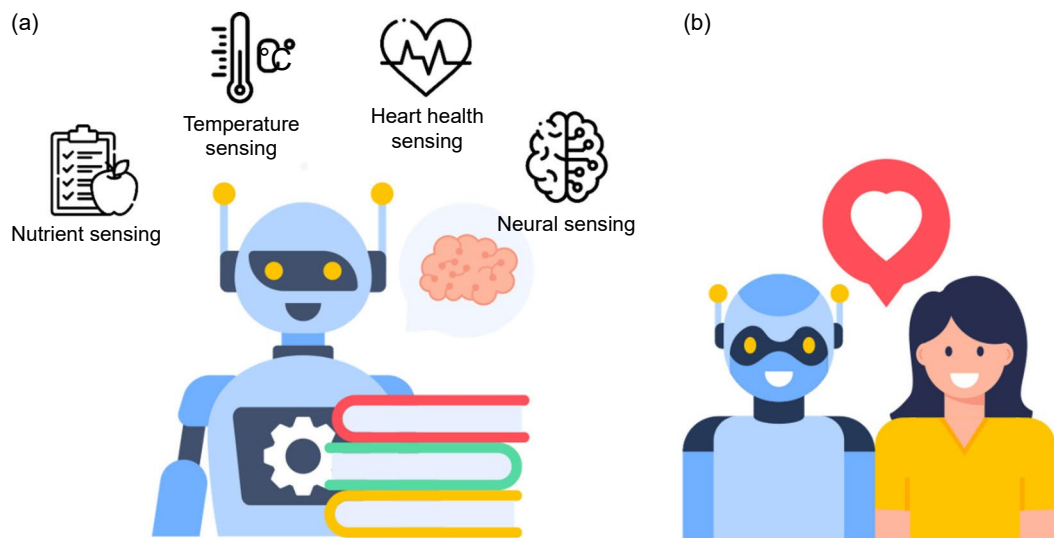


圖 1. 基於人機互動的前瞻性感測型機器人應用。(a) 感測型機器人配備了先進的生物訊號檢測系統；(b) 機器人可以監測和評估人類的健康和情緒狀況。

二、三維電子組件

1. 三維電子組件集成到三維物體中

三維電子結構不僅需要考慮其三維結構的幾何形狀，還需要考慮其相應的電子配置。透過 AM 技術將三維電子組件集成到三維物體中具有其優勢。圖 2(a) 顯示了一個三維印刷的信號調節電路。⁽²⁶⁾ 此三維電路是反映三維電子結構其幾何優勢的例子。電路的體積和走線密度被大大降低到 0.5" 乘 0.5" 乘 0.125" 的體積，以及其原始走線密度的 73%。⁽²⁶⁾ 除了這個結構外，還開發了一個六面的遊戲骰子 (圖 2(b))，這使我們能夠將電路設計到所有的表面，甚至在骰子的內部空間進行連接或搭建溝通的路徑。這個骰子帶有微控制器 (microcontroller) 和加速器 (accelerometer) 的複雜結構是由 CAD 軟體進行機械設計。^(18,27)

三維電子組件作為多功能電子組件方面具有優勢。如圖 2(c) 所示，智慧鞋墊在一個系統中包含壓力、溫度感測和無線通信單元等三種不同的電子組件，且沒有雜亂的電氣連接；其代表著電子組件的高效幾何屬性。作為另一個三維電子組件集成到三維物體中的具有幾何優勢的例子，氣動手爪 (pneumatic gripper) 具有三維結構應變和靜態感測器，它是通過在軟機器人內／外直接三維印刷感測器所開發而成，即三維感測器集成到三維物體中。由於將感測器直接集成到軟機器人的主體中，可以實現兩種感知類型的感測。此外，與層或平面 (layer or plane) 方法相比，將三維感測器集成到機器人中 (三維電子組件集成到三維物體中) 可以實現更高或更好的集成密度，還可以增添新的功能，然而這對傳統的逐層 (layer-by-layer) 設計來說是一個挑戰。^(19,28)

2. 三維電子組件的製造

2.1 基於擠壓成型的三維印刷

金屬奈米粒子和一些導電聚合物複合材料等電子材料被用來以多層方式直接擠壓印刷在基材上。⁽³⁰⁾ 三維印刷工藝可以克服傳統工藝的局限性，且具有印刷無源 (passive) 和有源

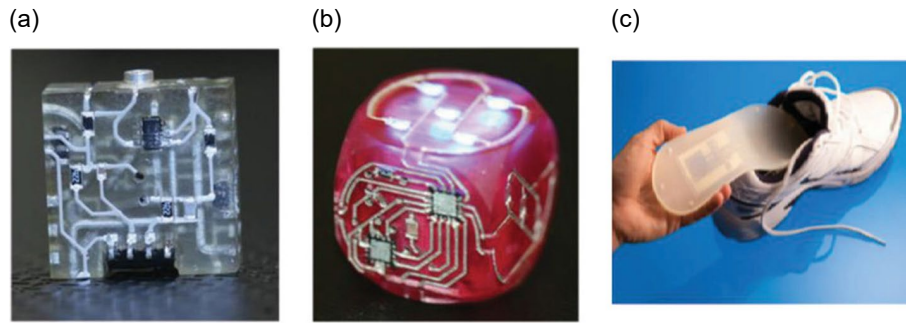


圖 2. 三維電子組件集成到三維物體中。(a) 三維印刷的信號調節電路；(b) 三維遊戲模具，帶有可充電的鋰聚合物電池。⁽²⁶⁾ Copyright 2014, IEEE.；(c) 智慧鞋墊包括壓力感應、溫度感測和無線通訊系統。⁽⁵⁴⁾ Copyright 2014, Ingenta.

(active) 組件的通用能力，如導電路徑、絕緣體、電容器、電阻器、天線⁽³¹⁻³⁵⁾等。此技術涉及到高黏性液體材料的擠壓，使其能夠在沉積或擠壓後保持其形狀。⁽²⁹⁾ 此工藝主要用於將電子組件直接印刷到不規則物體的表面。在電子應用上，通過直接印刷而運用的多種導電材料包括碳、銀、銅、及其複合材料。⁽³⁶⁻³⁸⁾

碳可以作為聚合物基質中的填充物來賦予其導電性。如圖 3(a) 所示，基於碳的聚合物複合材料被用來印刷三維電路中的導電路徑。通過熔融沉積 (fused deposition model, FDM) 工藝來實現實際電路和感測器的設計。^(39, 40)

基於銀的奈米材料是最廣泛使用的材料之一，用於製造印刷用導電複合材料。基於銀的聚合物導電複合材料被用來製作各種應用於電子組件的三維導電結構。圖 3(b) 顯示了一個用於電化學恆電位儀的三維印刷電路板原型，根據電路設計，將基於銀奈米粒子 (AgNPs) 的漿料擠壓在環氧樹脂板的頂層，然後進行燒結以獲得其可靠的導電性。⁽⁴¹⁾

2.2 化學沉積法應用於三維結構

化學沉積法是 AM 工藝之一，可以為電子組件製造導電路徑。在導電材料中，銅具有價格低廉和高導電性等優點。各種研究已經廣泛使用化學沉積製造銅的導電路徑。⁽⁴²⁻⁴⁴⁾ 然而，銅薄膜通過無電解沉積 (electroless deposition, ELD) 技術於低溫下在基板上形成圖案。其中 ELD 作為化學沉積方法之一，為在絕緣基板上進行金屬沉積，提供了一種低溫且具有成本效益的方法。通過這種技術，展示了集成到三維物體中的三維電子組件。其過程為：(1) 表面準備，(2) 通過使用催化金屬粒子進行表面處理，(3) 在處理後的表面上進行化學鍍槽 (electroless plating bath) 回收銅。圖 3(c) 顯示了一個三維印刷的電感器⁽⁴³⁾，聚乳酸 (poly lactic acid, PLA) 印刷的模型在 35 °C 下用聚多巴胺 (poly-dopamine) 修飾 3 小時，形成一層薄的多巴胺膜，以改善模型和銅離子之間的黏合性能。最後，將多巴胺修飾的樣品浸入銅離子溶液中，在 35 °C 下進行無電解鍍銅。作為銅沉積的結果，所製備的銅薄膜的厚度約為 150 nm。對於在可撓的聚合物 (polyethylene terephthalate, PET or polyimide, PI) 基板上，也可通過 ELD 來製造三維電極應用，如圖 3(d) 所示，柔性基板修飾上銅薄膜，以用於軟性印刷電路板 (flexible printed circuit board, FPCB)。⁽⁴⁴⁾

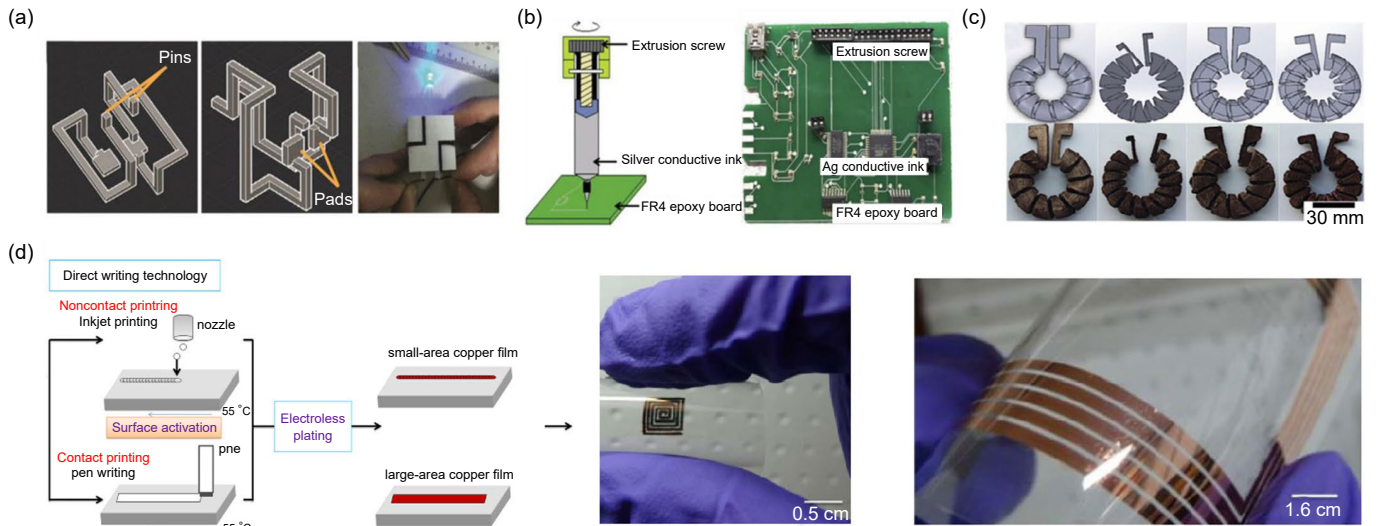


圖 3. 使用各種導電材料，基於碳、銀和銅導電材料印刷三維導電結構。(a) 製備聚丙烯和碳黑複合長絲，用於熔融沉積法印刷模組化三維電路中的嵌入式導電線路。⁽³⁶⁾ Copyright 2017, Elsevier. ; (b) 油墨擠出成型，以及雙面三維印刷電路板原型。⁽⁵⁵⁾ Copyright 2018, Elsevier. ; (c) 三維印刷電感器的無電解鍍層，四種電感器的電腦輔助設計圖像頂部，以及準備好的鍍銅電感器（底部）。⁽⁵⁶⁾ Copyright 2017, AIP Publishing. ; (d) 三維印刷的柔性聚合物導電基板及其 ELD 製程。⁽⁴⁴⁾ Copyright 2012, American Chemical Society。

三、感知型機器人之機構設計

感測器是一種精密且複雜的裝置，它可以測量物理量，如壓力、溫度等，並將其轉換為可測量的電訊號。為了實現感知型機器人，應考慮機器人設計的環境邊界條件。例如，在研究壓力感測機器人開發時，要考慮電子組件之間的相互干擾，以及機器人主體與封裝感測器對物理形變的耐受性。在這一點上，集成到三維物體中的三維電子組件可以通過額外的維度自由來克服幾何上的問題。此外，機器人運動和感測系統在特定環境下的穩定性，取決於對待測物的感測能力仍然是一項具有挑戰性的任務。另外，作為電子學領域高度先進的應用之一，通過精心的規劃和設計，將三維電子組件集成到三維物體中的感知型機器人是可以被實現的。依感知型機器人的主要特徵可分為三大類：機械、化學和生物醫學等作為機制，並配備集成到三維物體中的三維感測器。

1. 機械感知型機器人

通過使用具有多種材料的三維印表機，已經成功將感測器集成到機器人中。⁽⁴⁵⁾ 作為機器人中的感測部件，包括印刷電路板上帶有類比數位轉換器晶片的軟性電容式感測器被集成到三維印刷的機器人執行部件中，用於壓力感測和數據採集。至於介電層，採用商業用柔性熱塑性聚氨酯 (polyurethane) 和橡膠。電容式感測器的電流收集路徑或電極是用商業用導電聚乳酸複合材料、銀漿和基於石墨的油墨所製造。如圖 4(a) 所示，所開發的感知型機器人與三維列印的結構密不可分，並集成在一起。

通過採用矽樹脂彈性體封裝的壓電結構，將三維柔性感測器集成到機器人以用於執行感知任務，如圖 4(b) 所示。⁽⁴⁶⁾ 對於感測部分，薄層和厚層分別使用厚度為 13 和 28 μm 的層狀壓電聚合物聚偏二氟乙烯 (polyvinylidene difluoride, PVDF)；由鉻和金組成的金屬層，厚度分別為 10 和 100 nm，被用作電極，放置在頂部和底部表面。這種感知型機器人的設計，從形變的觀點來看，與二維的工藝相比，具有額外幾何自由度的三維工藝使我們能夠考慮更多可能的設計。

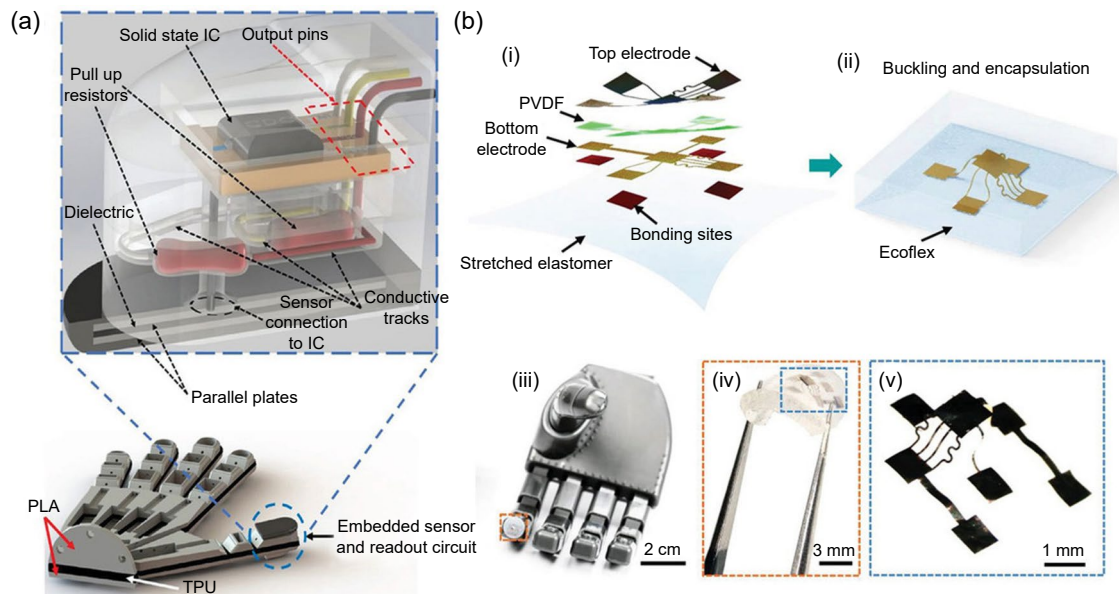


圖 4. 三維機械感型機器人。(a) 印刷的軟性電容感測器，在印刷電路板上有電容-數位轉換器晶片。⁽⁵³⁾ Copyright 2019, Wiley-VCH.；(b) 基於撞擊的三維壓電能量採集系統示意圖：(i) 拆解圖，(ii) 組裝圖，(iii) 採集器集成於該系統的機械手，以及 (iv) 相應的採集器在封裝後和 (v) 封裝前的圖片。⁽⁴⁶⁾ Copyright 2019, Springer Nature。

2. 化學感知型機器人

機器人另一個重要的感測機制為化學感測，採集化學反應之響應所產生的訊號變化。化學感測機器人通過電化學 (electrochemical) 和光學 (optical) 方法等來監測化學反應。為了提升機器人的化學感測能力，嘗試開發仿生感測器，以獲得高選擇性和高靈敏度。三維印刷工藝能夠設計出各式各樣複雜形狀的電極，這是適合製造化學感測器的主要優勢之一。⁽⁴⁸⁾ 基於碳的油墨被用來製造感知型手套中電化學感測系統的工作電極 (working electrodes, WE) 和指示電極 (counter electrodes, CE)。參考電極 (reference electrodes, RE) 的部分，則使用了銀/氯化銀墨水。該機械手與一個微小的 (面積： $50.8 \times 24.1 \text{ mm}^2$) 印刷電路板相結合，以無線方式將資料傳輸到筆記型電腦或行動裝置等接收器。如圖 5(a) 所示，參考電極、工作電極和指示電極被印刷在手套指尖上，而收集板 (collection pad) 則被印刷在另一個指尖上。(圖 5(a) 右圖) 收集板和電極被壓在一起以進行化學分析 (農藥檢測)。使用基於機器人手套的感測器系統同步進行壓力檢測和化學分析。電容式感測器被用來感測壓力，而電化學感測器則用來檢測農產品中是否殘留有機磷鹽類 (organophosphate) 農藥。⁽⁴⁹⁾

而有一種特殊的化學感知型機器人的應用，⁽⁵⁰⁾ 是通過採用基因改造後的細菌來檢測化學物質，圖 5(b) 展示了對化學反應有響應的仿生化學感知軟體機器人。⁽⁴⁷⁾ 生物性感知模組的部分，在構成軟體機器人夾爪的流體中使用了基因改造的大腸桿菌細胞 (*Escherichia coli* cells)。夾持器上的膜是多孔的，可以透過孔洞維持大腸桿菌的生物感測能力。一旦化學物質 (isopropyl β -d- 1-thiogalactopyranoside, IPTG) 暴露於大腸桿菌中，就可以從夾持器處的細菌觀察到螢光訊號。根據檢測到的訊號，夾持器系統決定是否抓取待測物。如果待測溶液中含有 IPTG，夾持器系統就會發出警報且不會有進一步的動作，反之，機器人則拿起物體。此結果表明，與合成生物學相結合的軟體機器人系統在先進的感測、診斷和治療功能方面有著巨大潛力。

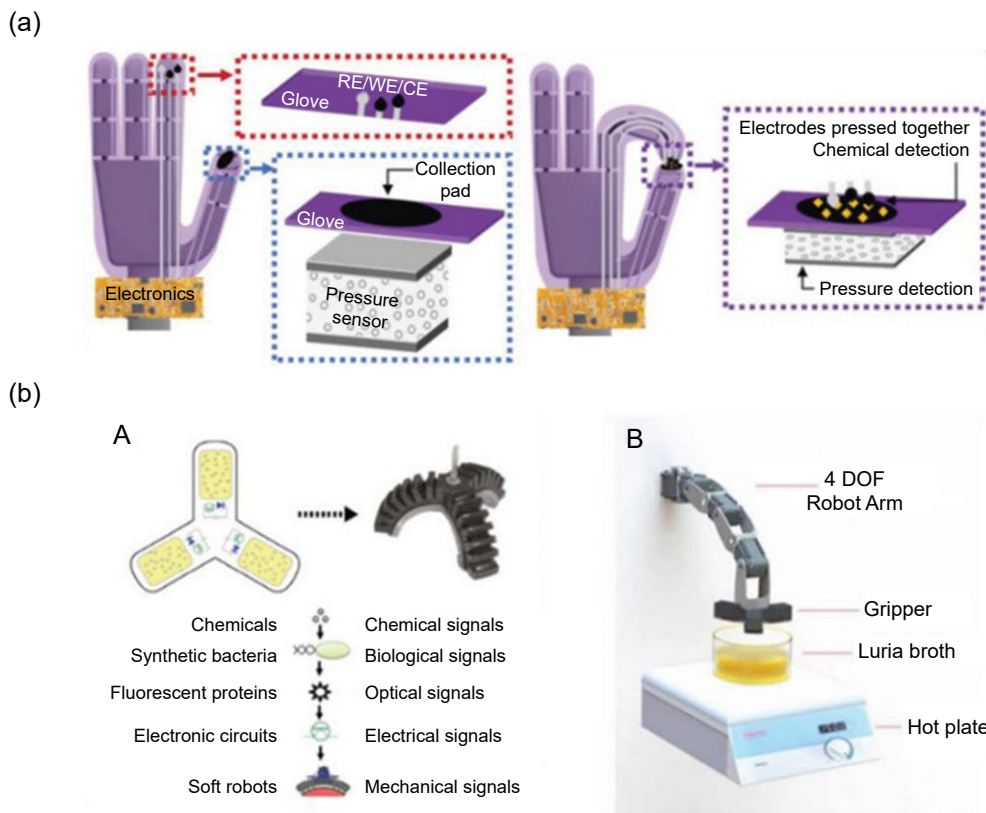


圖 5. 三維化學感知型機器人。(a) 結合了壓力和化學感測器的雙功能手套。⁽⁴⁹⁾ Copyright 2019, Royal Society of Chemistry. ; (b) 由化學和生物訊號啟動的機器人夾爪作為仿生的化學感知系統。⁽⁵⁰⁾ Copyright 2019, American Association for the Advancement of Science.

3. 生物醫學感知型機器人

將感測器整合到可以執行臨床測試和生物樣本的機器人中，是目前生物醫學領域發展的新方向。它們也可以應用於食品工業、醫學研究等領域。其中，生理訊號的測量在診斷疾病和監測人體上提供了有效的方法。現今，醫療專業人員已經利用肌電圖 (electromyography, EMG) 訊號對手部義肢進行分類，以評估病人的臨床進展。⁽⁵¹⁾ 然而，傳統設備的高成本問題使其無法被廣泛使用。為了克服這個問題而利用三維印刷工藝所開發的肌電介面義肢作為

生物醫學機器人，如圖 6(a) 所示。⁽⁵¹⁾ 肌電感測器安裝在三維印刷的前臂上，檢測患者殘餘的前臂肌肉運動並量測電壓變化最高的位置。根據 EMG 訊號的變化，決定機器人前臂的運動。此外，為了檢查機器人前臂於醫療的可用性，還採用了進一步的專業醫療評估。其中，舒適程度也被考慮在內。這樣的臨床研究與感知型機器人的發展說明了機器人其實用的重要性。簡而言之，用戶的舒適度以及 EMG 感測器的良好感測是 EMG 感測機器人應用的基本要求。電極的選擇在獲取高品質的生物電訊號方面也起著重要作用，因此，為了此應用，設計了不同的三維印刷工藝所製成的電極。除了生物訊號感測系統，低成本義肢的製造也著實重要，如三維生物醫學感測器通過三維掃描和三維印刷工藝的相互合作來實現，它們已被用於患有羊膜帶綜合症 (amniotic band syndrome) 的兒童 (圖 6(b))。⁽⁵²⁾ 檢測來自受試者生物訊號的電極陣列是用 PDMS-CNT 複合墨水的三維印刷技術製造的。在手的每個掌骨處，都嵌入了一個壓力感測器，共有五個壓力感測器和十個電極。此結果證明，在通過三維印刷工藝製作具有舒適性和兼具功能的穿戴式系統的同時，也可以擁有在客製化上的自由的共形電極陣列整合到人體組織接點上。

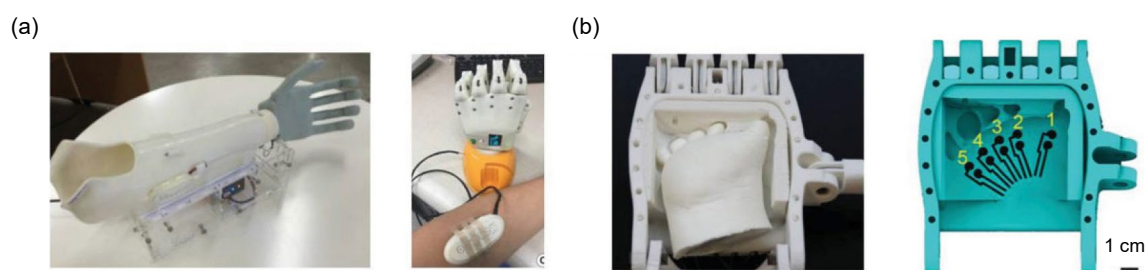


圖 6. 三維生物醫學感知型機器人。(a) 可藉由 EMG 訊號而作動的三維印刷機械臂，用於生物醫學治療。⁽⁵¹⁾ Copyright 2019, The Korean Society of Plastic and Reconstructive Surgeons.; (b) 三維印刷的客製化義肢，並通過共形 (conformal) 三維列印將解剖學上的共形電極陣列整合到人體組織接點上。⁽⁵²⁾ Copyright 2019, PLOS ONE.。

四、結論

感知型機器人的領域一直在快速發展，通過先進的感測能力以意識周圍的環境，但機器人必須與人類進行互動以獲得協助，並利用人類的回饋來增強他們的能力。這不僅可以通過訓練仿人機器人來實現，還可以透過嵌入智能感測器來實現，這些感測器可以根據其感測能力做出正確決策。如今，集成到三維物體中的三維感測器領域的進展使我們不僅可以印刷嵌入式系統的導電功能，還可以一次性印刷整個智能系統。這包括感測元件、電極、通道、連接和保護性封裝等組件。這將有助於創建強大的感測器系統，集成到機器人中並有效地發揮作用。有趣的是，不同的開發方法或策略，而且具有顯著的區別，這表明可用於開發實用感知型機器人的方法非常豐富。因此，對於感知型機器人的發展，沒有明顯的答案或途徑。這也意味著，在開發實用的、有前景的感知型機器人時存在許多未知性的挑戰或障礙。然而，克服它們則可以促進當前研究的創新。

參考文獻

1. T. Brogårdh, *Annu. Rev. Control.*, **31**, 69 (2007).
2. Z. Zhang, X. Wang, J. Liu, C. Dai, Y. Sun, *Annu. Rev. Control. Robot. Auton. Syst.*, **2**, 181 (2019).
3. A. Hentout, M. Aouache, A. Maoudj, *I. Akli, Adv. Robotics.*, **33**, 764 (2019).
4. A. Flores-Abad, O. Ma, K. Pham, S. Ulrich, *Prog. Aerosp. Sci.*, **68**, 1 (2014).
5. W.-S. Chu, K.-T. Lee, S.-H. Song, M.-W. Han, J.-Y. Lee, H.-S. Kim, M.-S. Kim, Y.-J. Park, K.-J. Cho, *S.-H. Ahn, Int. J. Pr. Eng. Man.*, **13**, 1281 (2012).
6. K. Nagatani, S. Kiribayashi, Y. Okada, K. Otake, K. Yoshida, S. Tadokoro, T. Nishimura, T. Yoshida, E. Koyanagi, M. Fukushima, S. Kawatsuma, *J. Field Robot.*, **30**, 44 (2013).
7. A. C. Nwosu, B. Sturgeon, T. McGlinchey, C. D. Goodwin, A. Behera, S. Mason, S. Stanley, T. R. Payne, *Palliat. Med.*, **33**, 1106 (2019).
8. R. Gockley, A. Bruce, J. Forlizzi, M. Michalowski, A. Mundell, S. Rosenthal, B. Sellner, R. Simmons, K. Snipes, A. C. Schultz, W. Jue, "Designing robots for long-term social interaction", presented at 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Aug 2-6. (2005).
9. A. Ravizza, C. De Maria, L. D. i Pietro, F. Sternini, A. L. Audenino, C. Bignardi, *Front. Bioeng. Biotechnol.*, **7**, 313 (2019).
10. E. National, Academies of Sciences, Medicine, *Frontiers of Materials Research: A Decadal Survey*, The National Academies Press, Wash-ington, DC (2019).
11. D. C. Slaughter, D. K. Giles, D. Downey, *Comput. Electron. Agr.*, **61**, 63 (2008).
12. P. Polygerinos, N. Correll, S. A. Morin, B. Mosadegh, C. D. Onal, K. Petersen, M. Cianchetti, M. T. Tolley, R. F. Shepherd, *Adv. Eng. Mater.*, **19**, 1700016 (2017).
13. Y. Li, S. G. Leonardi, A. Bonavita, G. Neri, W. Wlodarski, *Procedia Eng.*, **168**, 1102 (2016).
14. Y. Huang, X. Fan, S.-C. Chen, N. Zhao, *Adv. Funct. Mater.*, **29**, 1808509 (2019).
15. N. Luo, J. Zhang, X. Ding, Z. Zhou, Q. Zhang, Y.-T. Zhang, S.-C. Chen, J.-L. Hu, N. Zhao, *Adv. Mater. Technol.*, **3**, 1700222 (2018).
16. J. C. Yang, J. Mun, S. Y. Kwon, S. Park, Z. Bao, S. Park, *Adv. Mater.*, **31**, 1904765 (2019).
17. J. Kwon, Y. Takeda, R. Shiwaku, S. Tokito, K. Cho, S. Jung, *Nat. Commun.*, **10**, 54 (2019).
18. B. Lu, H. Lan, H. Liu, *Opto-Electronic Adv.*, **1**, 170004 (2018).
19. B. Shih, D. Shah, J. Li, T. G. Thuruthel, Y.-L. Park, F. Iida, Z. Bao, R. Kramer-Bottiglio, M. T. Tolley, *Sci. Robot.*, **5**, eaaz9239 (2020).
20. N. J. Wilkinson, M. A. A. Smith, R. W. Kay, R. A. Harris, *Int. J. Ad. Manuf. Technol.*, **105**, 4599 (2019).
21. J. Li, Y. Wang, G. Xiang, H. Liu, J. He, *Adv. Mater. Technol.*, **4**, 1800529 (2019).
22. B. Kang, H. Min, U. Seo, J. Lee, N. Park, K. Cho, H. S. Lee, *Adv. Mater.*, **25**, 4117 (2013).
23. P. Sundriyal, S. Bhattacharya, *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, **9**, 38507 (2017).
24. S. Paik, G. Kim, S. Chang, S. Lee, D. Jin, K.-Y. Jeong, I. S. Lee, J. Lee, H. Moon, J. Lee, K. Chang, S. S. Choi, J. Moon, S. Jung, S. Kang, W. Lee, H.-J. Choi, H. Choi, H. J. Kim, J.-H. Lee, J. Cheon, M. Kim, J. Myoung, H.-G. Park, W. Shim, *Nat. Commun.*, **11**, 805 (2020).
25. Y. Li, H. Zhang, R. Yang, Y. Laffitte, U. Schmill, W. Hu, M. Kaddoura, E. J. M. Blondeel, B. Cui, *Microsyst. Nanoeng.*, **5**, 41 (2019).
26. E. Macdonald, R. Salas, D. Espalin, M. Perez, E. Aguilera, D. Muse, R. B. Wicker, *IEEE Access*, **2**, 234 (2014).
27. A. Joe Lopes, E. MacDonald, B. W. Ryan, *Rapid Prototyp. J.*, **18**, 129 (2012).
28. B. Shih, C. Christianson, K. Gillespie, S. Lee, J. Mayeda, Z. Huo, M. T. Tolley, *Front. Robot. AI*, **6**, 30 (2019).
29. A. Chortos, E. Hajiesmaili, J. Morales, D. R. Clarke, J. A. Lewis, *Adv. Funct. Mater.*, **30**, 1907375 (2020).
30. T. Kim, C. Bao, M. Hausmann, G. Siqueira, T. Zimmermann, W. S. Kim, *Adv. Electron. Mater.*, **5**, 1800778 (2019).
31. F. Tricot, C. Venet, D. Beneventi, D. Curtil, D. Chaussy, T. P. Vuong, J. E. Broquin, N. Reverdy-Bruas, *RSC Adv.*, **8**, 26036 (2018).
32. A. Kamyshny, S. Magdassi, *Chem. Soc. Rev.*, **48**, 1712 (2019).
33. X. Yun, B. Lu, Z. Xiong, B. Jia, B. Tang, H. Mao, T. Zhang, X. Wang, *RSC Adv.*, **9**, 29384 (2019).
34. P. F. Flowers, C. Reyes, S. Ye, M. J. Kim, B. J. Wiley, *Addit. Manuf.*, **18**, 156 (2017).
35. J. Bjorgaard, M. Hoyack, E. Huber, M. Mirzaee, Y.-H. Chang, S. Noghianian, *Prog. Electromagn. Res.C.*, **84**, 119 (2018).

36. S. W. Kwok, K. H. H. Goh, Z. D. Tan, S. T. M. Tan, W. W. Tjiu, J. Y. Soh, Z. J. G. Ng, Y. Z. Chan, H. K. Hui, K. E. J. Goh, *Appl. Mater. Today*, **9**, 167 (2017).
37. C. Bao, M. Kaur, W. S. Kim, *Sens. Actuators, B.*, **285**, 186 (2019).
38. W. Li, Q. Sun, L. Li, J. Jiu, X.-Y. Liu, M. Kanehara, T. Minari, K. Sukanuma, *Appl. Mater. Today.*, **18**, 100451 (2020).
39. N. A. Mohd Radzuan, A. B. Sulong, J. Sahari, *Int. J. Hydrogen Energy*, **42**, 9262 (2017).
40. G. Martins, A. F. Salvador, L. Pereira, M. M. Alves, *Environ. Sci. Technol.*, **52**, 10241 (2018).
41. M. Zarek, M. Layani, I. Cooperstein, E. Sachyani, D. Cohn, S. Magdassi, *Adv. Mater.*, **28**, 4449 (2016).
42. S. Lee, M. Wajahat, J. H. Kim, J. Pyo, W. S. Chang, S. H. Cho, J. T. Kim, S. K. Seol, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **11**, 7123 (2019).
43. J. R. Jian, T. Kim, J. S. Park, J. Wang, W. S. Kim, *AIP Adv.*, **7**, 035314 (2017).
44. Y.-C. Liao, Z.-K. Kao, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **4**, 5109 (2012).
45. K. Y. Lee, A. Ambrosi, M. Pumera, *Electroanalysis*, **29**, 2444 (2017).
46. M. Han, H. Wang, Y. Yang, C. Liang, W. Bai, Z. Yan, H. Li, Y. Xue, X. Wang, B. Akar, H. Zhao, H. Luan, J. Lim, I. Kandela, G. A. Ameer, Y. Zhang, Y. Huang, *J. A. Rogers, Nat. Electron.*, **2**, 26 (2019).
47. H. H. Hamzah, S. A. Shafiee, A. Abdalla, B. A. Patel, *Electrochem. Commun.*, **96**, 27 (2018).
48. B. Ciui, A. Martin, R. K. Mishra, T. Nakagawa, T. J. Dawkins, M. Lyu, C. Cristea, R. Sandulescu, J. Wang, *ACS Sens.*, **3**, 2375 (2018).
49. M. Amit, R. K. Mishra, Q. Hoang, A. M. Galan, J. Wang, T. N. Ng, *Mater. Horiz.*, **6**, 604 (2019).
50. K. B. Justus, T. Hellebrekers, D. D. Lewis, A. Wood, C. Ingham, C. Majidi, P. R. LeDuc, C. Tan, *Sci. Robot.*, **4**, eaax0765 (2019).
51. I. Ku, G. Lee, C. Park, J. Lee, E. Jeong, *Arch. Plast. Surg.*, **46**, 303 (2019).
52. Y. Tong, E. Kucukdeger, J. Halper, E. Cesewski, E. Karakozoff, A. P. Haring, D. McIlvain, M. Singh, N. Khandelwal, A. Meholic, S. Laheri, A. Sharma, B. N. Johnson, *PLoS One*, **14**, 0214120 (2019).
53. M. Ntagios, H. Nassar, A. Pullanchiyodan, W. T. Navaraj, R. Dahiya, *Adv. Int. Syst.*, **2**, 1900080 (2019).
54. S. Ready, G. Whiting, T. N. Ng, *NIP Dig. Fab. Conf.*, 120 (2014).
55. Y. Dong, C. Bao, W. S. Kim, *Joule*, **2**, 579 (2018).
56. J. R. Jian, T. Kim, J. S. Park, J. Wang, W. S. Kim, *AIP Adv.*, **7**, 035314 (2017).

作者簡介

林宗宏先生為國立台灣大學化學博士，現為國立清華大學生物醫學工程研究所及動力機械工程學系教授。

Zong-Hong Lin received his Ph.D. in Chemical Department at the National Taiwan University. He is currently a Professor in the Institute of Biomedical Engineering and Department of Power Mechanical Engineering at National Tsing Hua University.

李貫名先生為國立清華大學生物醫學工程研究所碩士生。

Kuan-Ming Lee is currently a M.S. student in the Institute of Biomedical Engineering at National Tsing Hua University.