

會自己發電的感測器：自然啟發 科技驅動的智慧醫療感測新平台

Self-powered Sensors: A Bioinspired Technology Platform for Smart Healthcare Monitoring

吳鶴笙、洪晟淳、林宗宏

Ho-Sheng Wu, Sheng-Chun Hung, Zong-Hong Lin

近年來，智慧醫療與精準健康監測快速發展，但多數穿戴式或臨床感測系統仍仰賴外部電源與複雜電路，不僅限制長期連續量測能力，也增加裝置維護與臨床應用門檻。仿生設計結合摩擦奈米發電機 (triboelectric nanogenerator, TENG) 技術，提供了一種兼具自供電、高靈敏度與柔性結構且材料、設計多樣化的新型生醫感測解決方案。透過模仿自然界中如皮膚、鱗片與組織界面等結構與特性，可有效提升感測穩定性、訊號品質與機械耐用度，同時將環境或人體微小機械能直接轉換為電訊號，實現真正不需額外電池的智慧感測平台。本研究團隊已將此技術拓展至多項與人類生活與健康密切相關的生理活動監測情境，並結合資料分析與智慧化判讀，展現其於智慧健康照護與精準醫療中的潛力。本文將介紹此類自供電仿生感測技術的設計理念、關鍵工程挑戰、系統整合成果與未來發展方向，說明其作為下一代生醫感測與智慧醫療儀器平台的重要性。

In recent years, rapid advances in smart healthcare and precision health monitoring have driven the development of wearable and clinical sensing systems. However, most existing devices still rely on external power supplies and complex circuitry, which limit long-term continuous operation and increase maintenance burden and clinical implementation barriers. The integration of bioinspired design with triboelectric nanogenerator (TENG) technology provides a novel biomedical sensing solution that combines self-powered operation, high sensitivity, structural flexibility, and diverse material and design adaptability. By mimicking natural structures and interfaces such as skin, scales, and biological tissue surfaces, the sensing platform can significantly enhance signal stability, mechanical durability, and output quality. At the same time, small-scale mechanical energy from the human body or surrounding environment can be directly converted into electrical signals, enabling a truly battery-free intelligent sensing system. Our research team has extended this technology to multiple physiological monitoring scenarios closely related to daily life and healthcare, integrating data analysis and intelligent interpretation to demonstrate its potential in smart healthcare and precision medicine applications. This article introduces the design principles, key engineering challenges, system integration strategies, and representative achievements of self-powered bioinspired sensing technologies, highlighting their significance as a next-generation platform for advanced biomedical sensing and intelligent healthcare instrumentation.

一、前言

近年來，隨著智慧醫療 (smart healthcare)、精準醫療 (precision medicine) 與數位健康科技的蓬勃發展，醫療照護模式正逐漸由「醫院導向」走向「病患中心」與「連續化監測」的方向。面對人口高齡化與慢性疾病日益增加的趨勢，如何在不增加電力負擔與系統複雜度的前提下，長時間、穩定且高靈敏地取得人體生理訊號，並轉化為具臨床意義的資訊，已成為當代醫學工程與儀器科技的重要課題。傳統生醫感測裝置雖已具備成熟的量測能力，但多仰賴外接電源或電池模組，造成穿戴負擔與維護成本，亦限制了其在長期監測與日常化應用中的可行性。此外，人體生理活動多屬低頻、微位移與弱訊號特性，對感測靈敏度、訊噪比、柔性順應性與耐久性提出更高要求。因此，同時兼具高靈敏度、長期穩定性、柔性結構與能源自主性的新型感測技術，成為推動下一代智慧醫療與健康監測系統發展的關鍵。

然而，若要使此類自供電感測系統真正走入臨床與生活情境，仍面臨多項工程與應用挑戰。首先，在實際生醫情境中，人體活動所產生的機械能往往具有低頻、不規則與幅度有限的特性，如何在不影響佩戴舒適性的條件下，仍能穩定輸出足夠且具辨識度的電訊號，是系統設計的重要課題。其次，感測器需長時間貼附於皮膚或與身體組織互動，裝置必須具備柔性機械順應性、高耐磨性與抗環境干擾能力，以確保長期使用下的性能一致性與可靠性。此外，為使量測結果真正具有實用價值，仍需結合智慧化訊號處理與資料分析，使原始電訊號得以轉化為反映生理狀態與功能變化的有效指標，讓自供電裝置不僅是能源來源，更是一個兼具感測功能與資訊價值的智慧平台。在此脈絡下，結合仿生結構設計與摩擦奈米發電機 (triboelectric nanogenerator, TENG) 的技術逐漸展現其潛力；藉由自然界表面結構與摩擦調控的演化智慧，可有效改善材料接觸行為、提升電荷轉移效率與長期穩定性，使其在貼近真實使用環境的情境下仍能維持優良表現。

在這樣的背景下，本文聚焦於自然啟發設計與 TENG 所構築的自供電生醫感測平台，從材料與結構設計、能量轉換與訊號生成機制、系統整合方法，到應用驗證進行整體性介紹。首先將說明仿生設計在感測材料與界面工程中的角色，如何透過自然啟發的微／奈米尺度特徵改善耐磨性、穩定性與界面接觸行為；其次探討 TENG 在生醫感測中的雙重功能，既能提供能源，又能作為有效訊號來源，以及其在低頻機械刺激條件下的設計策略。此外，亦將討論感測系統從訊號擷取、資料處理到智慧化分析的完整鏈結，使其能對人體功能相關的生理活動提供具有辨識度與應用價值的資訊。透過具代表性的研究案例，本文將展示此技術自材料研究逐步走向功能化與系統化應用的發展成果，同時討論仍待突破的挑戰，包括跨情境穩定性、系統微型化與量產性，以及與智慧健康照護體系整合的可能性。綜合而言，自供電仿生感測技術不僅是材料與能源領域的創新，更是一個具備跨域整合能力、可望支撐未來智慧醫療與精準健康發展的重要平台。此外，相關技術亦已拓展至義肢使用者的人機介面健康監測，透過量測義肢腔體內之壓力分佈，協助提升輔具適配性與長期使用安全性，顯示其在特定醫療族群中的實際應用價值。

二、從能源限制到自供電感測：技術需求與發展脈絡

隨著可攜式醫療裝置與穿戴式健康監測系統的普及，如何在不同情境下持續穩定地獲取人體生理訊號，逐漸成為影響智慧醫療發展的關鍵因素之一。傳統感測系統多仰賴外部電源或電池作為主要驅動來源，雖然技術成熟且具一定穩定性，但在長期監測應用中卻暴露出多

重限制，例如電池體積與重量對裝置設計與穿戴舒適性的影響、更換或充電所帶來的維護負擔，以及電池消耗與環境影響等議題。此外，若監測需求從「短時間量測」進一步擴展至「連續性與長時間追蹤」，能源供應的可靠性便成為左右系統可用性、可信度與臨床接受度的重要因素。

另一方面，與許多工業或工程量測不同，生醫情境中的訊號來源具有其特殊性。人體活動所產生的機械能量通常具有低頻、不規律、小幅度與高度個體差異的特徵，這對感測裝置的靈敏度、穩定度與訊噪比提出更嚴苛要求。微小的生理動作或功能活動若能被準確捕捉，將有助於提供更具代表性與臨床意義的健康資訊；反之，若裝置因能源不足、結構衰退或環境干擾而導致訊號失真，則可能削弱其應用價值，甚至影響判讀與決策可靠性。以喉嚨吞嚥動作或微小的肌肉震動為例，感測器必須具備極低的最低力量感測值以捕捉微小形變，其感測下限需可達 2.5 Pa 甚至更低，並且裝置需在特定壓力區間 (如 0–100 kPa) 展現良好的線性靈敏度，使微位移能轉化為具辨識度的電壓訊號。在如此受限情況下，如何兼顧高品質訊號擷取與長期連續運作能力，成為當前生醫感測技術發展面臨的核心挑戰。

基於上述需求，自供電感測 (self-powered sensing) 的概念逐漸受到重視。其設計核心在於不再單純依賴外部供電，而是直接利用人體活動或環境中的可得機械能作為能源來源，甚至進一步將其轉化為具訊息意義的電訊號。在電氣性能方面，優化後的仿生 TENG 結構在開路電壓 (Voc) 可達 100 V 至 400 V，短路電流 (Isc) 則落在 μA 等級，足以驅動微型電路或作為高品質訊號源。並且相較易受電磁干擾的電阻式 (piezoresistive) 感測器，TENG 具備高輸入阻抗特性，能有效減少環境雜訊干擾，且無需外加偏壓。基於此概念的設計不僅能減輕對電池的依賴，降低系統維護成本與複雜度，也意味著感測平台有機會在更多開放情境下運作，包括室外活動、長期使用或難以頻繁維護的應用場域。同時，若能讓能源獲取與訊號感測整合於同一結構或材料之中，更有助於裝置微型化、輕量化與柔性化設計，提升與人體互動的順應性，並促進其走向實際醫療與健康照護應用。

在這樣的技術脈絡下，結合自然啟發設計與 TENG 的自供電感測技術，逐漸被視為一個具潛力的解決方案。TENG 能有效將日常活動中的低頻機械刺激轉換為電能，並兼具能源生成與訊號輸出的雙重角色；在仿生材料與結構設計的搭配上，耐用性、穩定性與能源收集效率上都獲得顯著提升，契合生醫感測對長期可靠度與高品質量測的需求。這樣的發展，使得自供電感測不僅是一項能源技術的創新，更逐漸成為推動下一代智慧健康監測與精準醫療的重要基礎。

三、自然啟發與摩擦奈米發電機：自供電感測的核心技術

自供電感測平台之所以能在智慧醫療與健康監測中展現潛力，關鍵在於其背後的能源轉換與訊號生成機制是否足以應對實際生醫環境的挑戰。TENG 技術正是此類系統的核心，其兼具低頻適用性、結構簡潔、材料選擇多樣性與易於整合等特性，極為適合用於與人體互動的感測應用。若再結合自然啟發 (bio-inspired) 的材料與結構設計理念，更能有效提升界面接觸效率、電荷生成穩定性與長期耐久度，形成具工程實用性的感測基礎。

1. TENG 的基本原理與特性

摩擦奈米發電機技術的核心源自兩個互相關聯的物理現象：接觸起電 (contact

electrification) 與靜電感應 (electrostatic induction)。當兩種不同材料表面反覆接觸與分離時，因材料本質對電子親和能力不同，會產生帶相反極性的表面電荷分佈；隨著之後的相對位移或分離，兩者之間的電位差變化即可驅動電子於外部電路中流動，形成可量測的電訊號。藉由不同幾何與運動模式設計，TENG 可運作於接觸分離、滑動摩擦、自由層運動與單電極等模式，具高度設計彈性。

相較於其他能量轉換技術，TENG 還具備數項對生醫感測格外關鍵的優勢。首先，其對低頻與不規則機械刺激具高度敏感性，與人體生理活動的動態特徵相當契合；其次，TENG 可利用高分子薄膜、柔性材料或可延展結構製作，便於貼合身體曲面並提升佩戴舒適度。此外，TENG 所產生的輸出不僅可視為能源來源，也可直接視為反映機械行為的訊號載體，意即「能源」與「感測」可同時由同一裝置完成，極大化系統整合效率。這些特徵使 TENG 成為發展自供電生醫感測系統的理想平台。

2. 仿生設計在感測材料與結構中的角色

儘管 TENG 本身已具備良好能源轉換潛力，但若將其應用於長期且真實的生醫監測環境，仍必須解決材料磨耗、界面穩定性與輸出一致性等挑戰。此時，源自自然界的仿生設計理念扮演關鍵角色。自然界中諸多生物表面，如皮膚、鱗片或具有功能梯度結構的外層組織，在長時間與環境接觸與摩擦過程中，仍能維持優異耐久性與機械穩定性，並展現良好摩擦調控能力，這些特性正好與 TENG 感測需求高度契合。

透過仿生設計引入微／奈米尺度表面結構與特殊材料組成，可同時改善數個關鍵性能，包括提升界面接觸有效面積、降低磨損與結構疲勞、穩定電荷產生行為及減少環境因素影響。例如，具紋理化或具功能性梯度的仿生表面，可讓接觸行為更可控且更具重複性；同時，仿生材料的韌性與適應性設計，有助於提升長期循環運作下的耐久性與輸出穩定性。當這些設計再進一步與人體貼合友善的柔性結構結合時，便可形成同時兼具高效率能源轉換、可靠感測性能與長期適用性的完整平台。

摩擦奈米發電技術提供了自供電與訊號生成的基礎，而仿生結構設計則進一步補足耐久性、穩定性與工程可信度兩大關鍵，使兩者結合成為一套兼具科學創新與應用潛力的自供電生醫感測核心機制，也為後續從材料層級推進至完整系統整合奠定重要基礎。

四、從材料到系統：自供電仿生感測平台的工程實現

自供電仿生感測技術若要真正走入智慧醫療與健康監測應用，必須從單一材料或元件層級，逐步提升至可長期操作且具系統整合能力的工程平台。這一過程不僅涉及材料選擇與界面工程設計，也包含結構設計、訊號擷取策略及與實際使用環境的互動考量。以下將分別從材料與界面工程、感測模組整合，以及訊號與資料層面的處理三個層次，說明自供電仿生感測平台的工程化實現路徑。

1. 材料與界面工程設計

在材料層級，仿生設計提供了一個結合結構功能與機械性能的工程框架。透過模仿自然界中具高度耐磨與摩擦調控能力的表面結構，例如具有層狀排列、階層式紋理或具功能梯度的界面，可有效改善傳統 TENG 在長期操作下可能面臨的磨損與性能衰退問題。此類仿生

材料設計常結合高分子基材與具特殊表面特性之功能材料，形成兼具柔性、韌性與穩定電荷生成能力的複合結構。微／奈米尺度的紋理設計則能提升接觸有效面積與摩擦控制能力，不僅將接觸有效面積最大化，更確保了在 20,000 次以上循環操作下輸出電壓的漂移率 (drift rate) 仍維持在 5% 以內，在提高輸出訊號強度的同時仍保持一致性。

除了提升能源轉換效率之外，材料與界面工程亦需考量實際生醫應用情境中的多重環境因素，例如長期機械循環、汗液或濕度影響、溫度波動，以及可能的污染或表面劣化。透過適當的材料組成設計與結構保護策略，可減少外界干擾對感測性能的影響，並確保裝置在長時間使用下仍維持穩定輸出。這些設計不僅提升系統耐久度，也為後續感測功能的可靠性奠定關鍵基礎。

2. 感測模組與系統整合

在系統層級，如何將自供電 TENG 元件有效整合為可實際操作的感測模組，是推動其邁向應用的重要一步。首先，裝置必須具備良好的機械順應性與人體貼合性，避免過度限制自然活動或造成佩戴不適；柔性次系統 (flexible subsystem) 設計以及薄膜化與輕量化結構，是提升可用性的重要方向。其次，依不同監測需求，感測器可發展為單點式量測、陣列化佈局或分散式多節點架構，使其能捕捉更完整的生理行為資訊。

在實務設計上，需同時兼顧能源管理與訊號讀取兩項功能。例如，部分 TENG 裝置可將輸出電能透過能量管理電路暫存於能量儲存單元中 (電容或電池)，以支援後端訊號處理或無線傳輸；另一方面，在許多應用場景中，TENG 輸出的即時電訊號本身即具生理意義，因此如何在不額外增加複雜硬體負擔的前提下，原始訊號經由高輸入阻抗電路調理 (進行阻抗匹配與濾波) 後，透過採樣率達 1 kHz 甚至更高的資料擷取系統進行數位化，以確保不會遺漏任何高頻的特徵細節。如此穩定而有效地擷取與轉換訊號，是系統整合設計的重要課題。透過模組化與平台化的設計思維，自供電仿生感測器得以逐步朝向完整智慧感測系統邁進。

3. 訊號擷取與智慧分析

當自供電感測平台能穩定輸出電訊號後，下一個關鍵環節在於如何將這些訊號轉化為可解讀且具有應用價值的健康資訊。由於 TENG 輸出同時反映了機械刺激的幅度、頻率與動態模式，適當的訊號處理可從中萃取出具辨識能力的指標，以對應不同生理活動或功能狀態。典型的處理流程可能包含訊號濾波、特徵提取、統計分析與模式辨識等步驟；在更進一步的應用中，亦可結合機器學習與資料驅動方法，提升對複雜行為或個體差異的辨識能力。

智慧化訊號分析不僅提升單一量測的資訊含量，也為長期監測與個人化健康管理提供可能。透過連續數據累積與分析，可望辨識趨勢變化或功能狀態轉移，進而支持早期警示、狀態追蹤或輔助決策等應用方向。一些研究中導入了先進的機器學習演算法，並建立嚴謹的驗證流程以確保模型效能。在模型架構方面，也有採用隨機森林 (random forest, RF) 作為主要分類器，並將其與 K-近鄰演算法 (KNN) 及支持向量機 (SVM) 等基礎模型進行基準比較 (baseline comparison)。以步態辨識為例，資料集規模包含從多名受試者擷取的 60,000 至 80,000 個樣本，並依照 80:20 或 90:10 的比例進行訓練集與測試集的切分。為了提升模型的通用性並減少個體差異干擾，分析流程採用了交叉驗證 (cross-validation) 策略。模型評估指標則涵蓋了整體準確度 (accuracy)、F1-Score 以及混淆矩陣 (confusion matrix)，確保系統在分類多樣化動作 (如 12 種康復訓練或不同坡度的步行環境) 時具備卓越的辨識能力。例如，

優化後的模型在使用者識別與步態異常偵測上的準確度可達 95% 以上。值得注意的是，這一過程的可靠性仍高度依賴前端感測器的穩定輸出與系統整合品質，因此材料、結構與資料處理三者之間，形成了一個相互支持且密不可分的整合架構。

從材料設計、結構工程、系統整合到訊號分析，自供電仿生感測技術逐漸形成一個具完整層級架構的工程平台。其不僅提供能源自主與高度感測能力，更展現出可持續擴展至多元健康監測場域的靈活性，為下一階段的功能展示與應用發展奠定重要基礎。

五、代表性成果與應用展示

在前述材料創新、能源轉換與系統整合設計的基礎上，自供電仿生感測平台已不僅止於概念型研究，而是逐步展現出具體且具工程成熟度的應用成果。這些成果顯示，藉由自然啟發的結構設計與摩擦奈米發電技術的結合，確實能在貼近真實場域與人體互動的情境下，完成穩定、具辨識能力且具擴展潛力的智慧感測功能。

1. 自供電步態監測與行為分析

如圖 1 所示，透過自供電感測裝置與資料擷取、機器學習分析流程的整合，可建立一個能對人體動態行為進行辨識與分類的智慧健康監測平台。裝置藉由貼近人體活動的佈署方式，於日常動作或功能活動中直接獲取機械刺激並轉換為電訊號，接著由資料擷取系統與智慧分析模型進行判讀，從而萃取出具有生理意義的資訊。此平台展示了從材料—裝置—數據的完整鏈結，顯示自供電感測不僅能提供能源支持，更能作為高價值資訊來源，支援未來智慧健康監測與功能狀態分析。

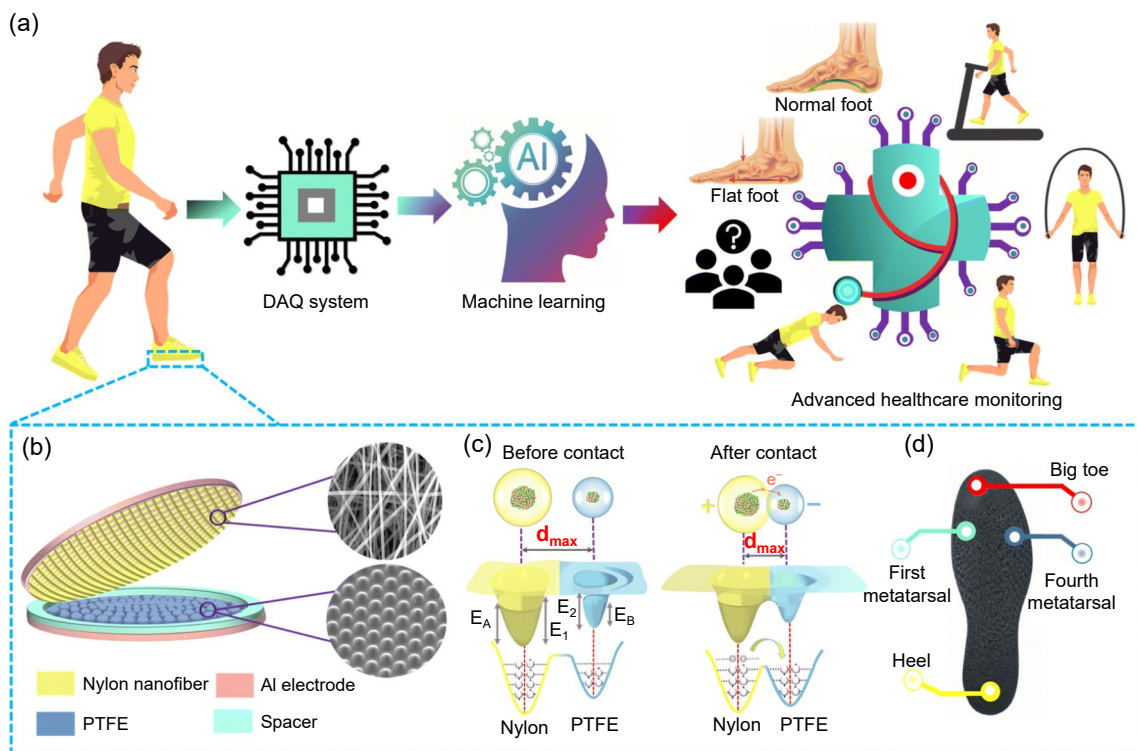


圖 1. 自供電仿生感測平台之整體系統概念與智慧分析流程。

2. 仿生微／奈米結構於穩定訊號生成與耐久操作之貢獻

在材料與仿生結構層級，圖 2 展現了以自然生物外表面為啟發，所設計之階層化與結構化表面的工程成果。透過雙重複製與材料轉印策略，可將生物表面的紋理特徵有效轉化至功能材料中，形成具備特殊微／奈米的感測層。掃描式電子顯微鏡影像顯示，經仿生設計後的表面不僅具規則結構，亦兼具立體幾何特徵，有助於提升界面摩擦行為控制能力與接觸效率，經過 30 min (1000 rpm) 旋轉磨耗測試後，商用 nylon 電輸出衰退 75%、PLA 衰退：50%，keratin/PVA 不同結構對照下，drop-like 輸出衰退 57%；flat 輸出衰退 22%；snake scale-like 輸出衰退 5%。配合化學與材料分析結果，證實此類仿生複合材料在結構穩定性與表面特性上皆能滿足長期的耐磨運作需求，為提升能源轉換效率與輸出穩定性提供關鍵支持。

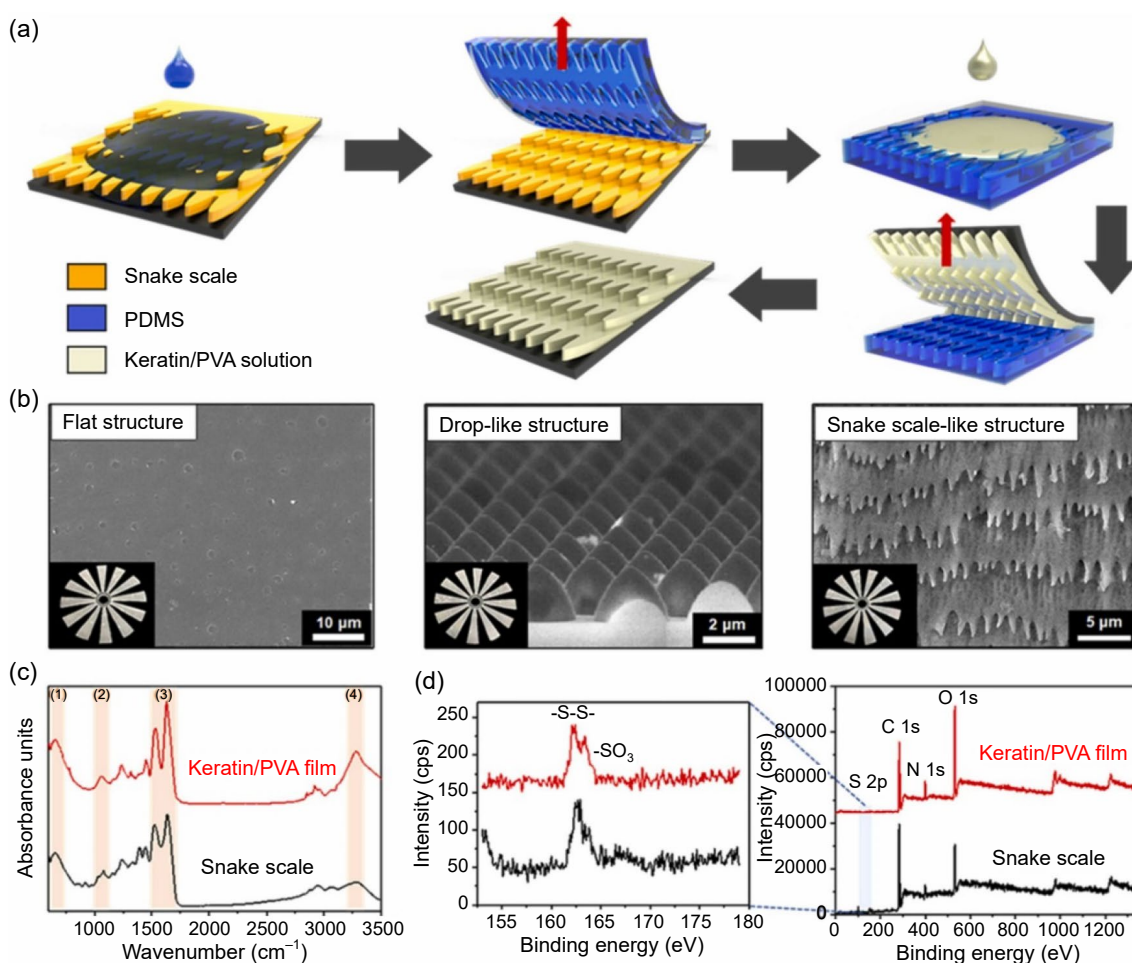


圖 2. 以自然啟發為基礎之仿生微／奈米結構材料設計與製程示意。

3. 可穿戴整合與長期使用場景中的可靠度驗證

在系統與人體互動層級，圖 3 進一步展示了自供電仿生感測平台於實際穿戴及真實活動條件下的應用示範。感測元件以多點方式整合於可穿戴結構中，可對人體動態過程中不同階段的受力與動作轉換產生同步響應；在 70 MΩ 下最大功率密度達 2.75 mW/m² 其輸出訊號與

動態活動過程間具有良好對應性，並能進行時程分析與事件標定，顯示系統對複雜動作過程具有足夠的追蹤能力。此外，在 10,000 次壓力測試下具備長期穩定性與使用者間一致性分析亦顯示其具備穩健量測特性，意味著此系統已具備從實驗室走向實際應用環境的技術成熟度。

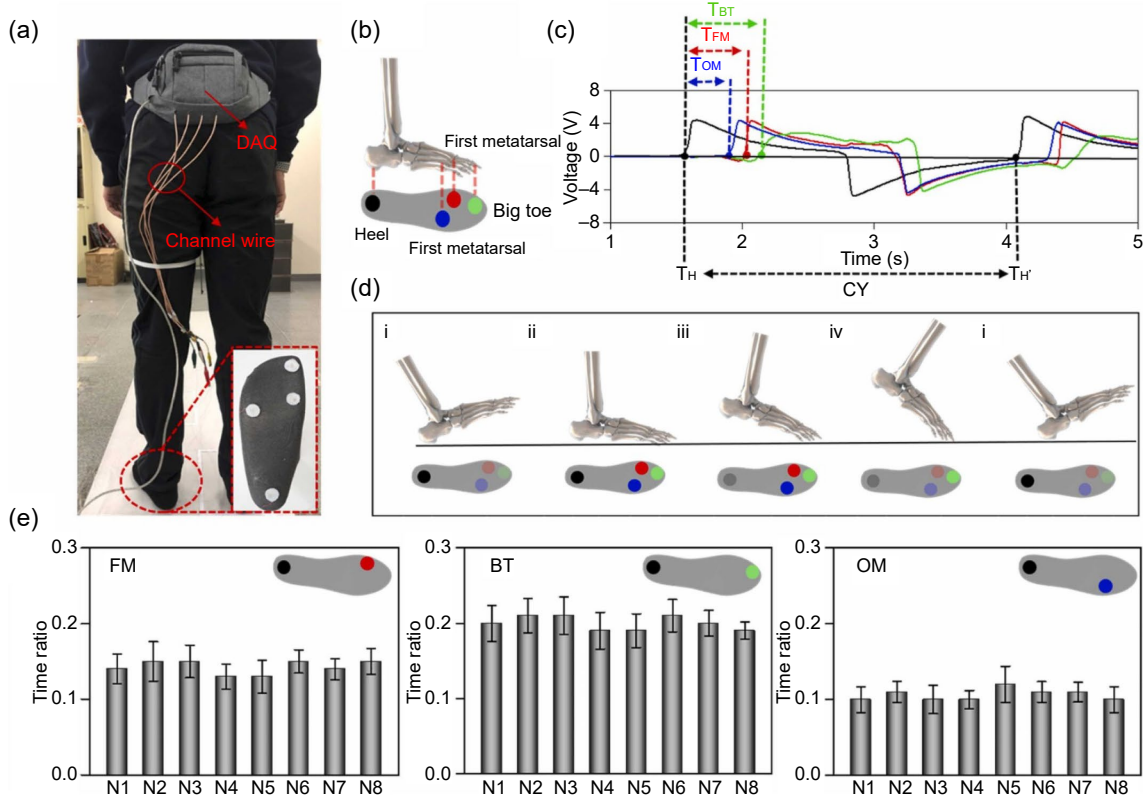


圖 3. 自供電仿生感測系統於可穿戴與實際動態情境中的操作展示。

4. 義肢內介面壓力分佈監測與使用者健康支持

除了於自然步態與一般穿戴監測情境中展現應用潛力之外，自供電仿生感測技術亦成功延伸至義肢使用者的人機介面健康監測。圖 4 顯示透過將摩擦奈米發電感測 4×4 單元組構為柔性壓力感測陣列並嵌入義肢腔體內襯，可在無需傳統電池供電的條件下，即時感測殘肢與義肢內壁之壓力分佈情況，量測範圍：40–200 kPa，靈敏度：7.78 mV/kPa。此技術可協助臨床醫療人員與義肢設計者掌握配戴適配度，避免局部壓力集中導致的不適或皮膚傷害，並支持長期復健與使用狀態評估。實驗結果顯示，該平台於不同溫溼度及活動情境與受力條件下，皆能維持穩定訊號輸出與良好空間辨識能力，且經過 1 Hz，10,000 次 (接觸分離 + 彎折) 測試，且不同溫度與濕度變化下的輸出穩定，具備適合長期監測所需之耐久性與可靠性，顯示其於輔具優化與義肢照護領域具有重要應用潛力。

5. 智慧分析與個人化健康資訊提取

在訊號解析與智慧辨識層面，圖 5 顯示自供電仿生感測平台在更精細、甚至涉及細微生理活動的應用中，仍能維持良好的訊號品質與辨識效能。裝置可取得具結構化特徵的時間

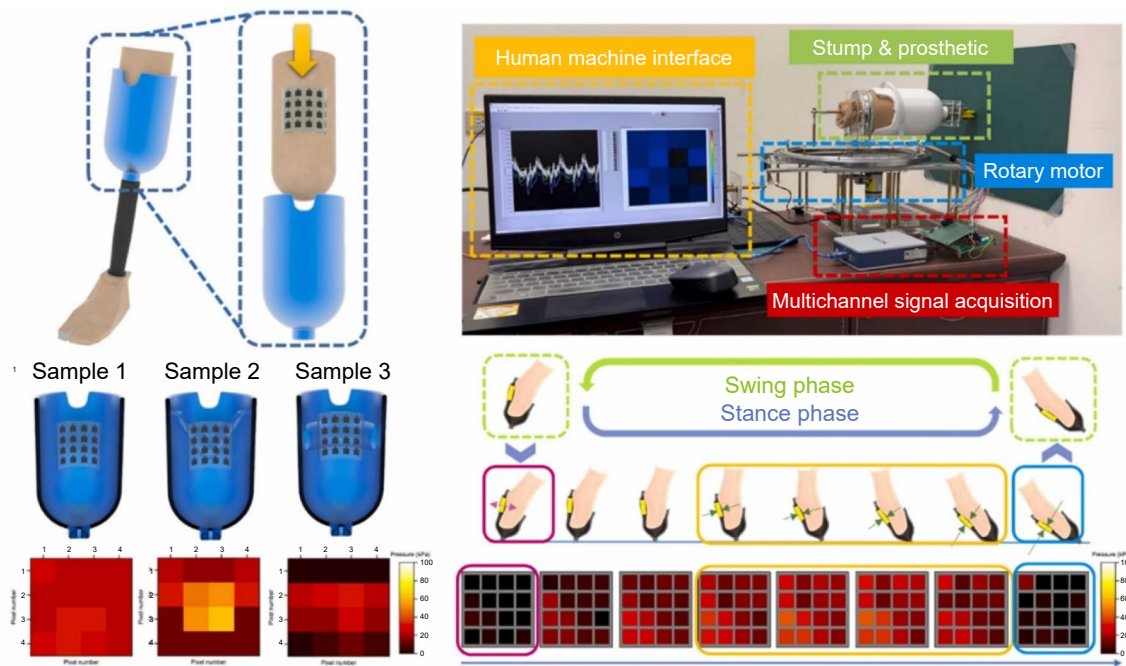


圖 4. 自供電壓力感測陣列於義肢內介面之應用展示。

訊號，並透過時間頻率分析、特徵工程與機器學習方法進行模式識別。結果顯示，不同使用者、不同行為或不同訊號來源通道，皆可在智慧分析模型中展現使用者身分驗證 97.06% 準確度的辨識與 94.70% 詞彙分類能力，同時具備延伸至行動運算、物聯網與遠距應用之潛力。此成果顯示，自供電感測訊號並非僅止於「電壓輸出」，而能進一步成為可支援智慧服務與決策分析的重要資料來源。

這些代表性成果從材料設計、仿生結構工程、系統整合到智慧資料分析，完整呈現了自供電仿生感測平台的技術深度與應用廣度。不僅證明其在能源自主、長期穩定與使用者順應性方面的優勢，更顯示其在複雜行為辨識、個體化健康資訊擷取與智慧化生醫感測應用上的發展潛力，為下一階段朝向智慧健康照護與精準醫療應用邁進奠定重要基礎。

可穿戴之摩擦奈米發電感測裝置於人體活動過程中直接將機械能轉換為電訊號，並透過資料擷取系統與機器學習模型進行訊號處理與特徵辨識，進而萃取與功能狀態相關之資訊。此平台展現了由能源自主、訊號感測到智慧分析之完整架構，顯示自供電仿生感測技術於智慧健康監測與先進生醫感測應用中的發展潛力。

藉由仿生複製策略，將生物表面之特徵有效轉印至功能性材料中，形成具層階化與規則幾何紋理之感測界面。掃描式電子顯微鏡影像顯示結構清晰且具三維深度特性，搭配材料光譜與化學分析結果證實其具備穩定機械與表面特性。此仿生設計有助於提升接觸行為可控性、電荷生成效率與長期操作穩定性，為高性能自供電感測提供關鍵材料基礎。

感測裝置以多點方式整合於可穿戴結構中，於人體活動過程中同步產生對應之電訊號，顯示其對不同動作階段具有良好時間解析度與事件對應能力。量測結果與動態行為模型高度一致，並於不同受測者與長期操作條件下仍維持穩定輸出，驗證其耐用性與工程可靠性。結果顯示，此平台已具備朝向實際應用環境部署的技術成熟度。

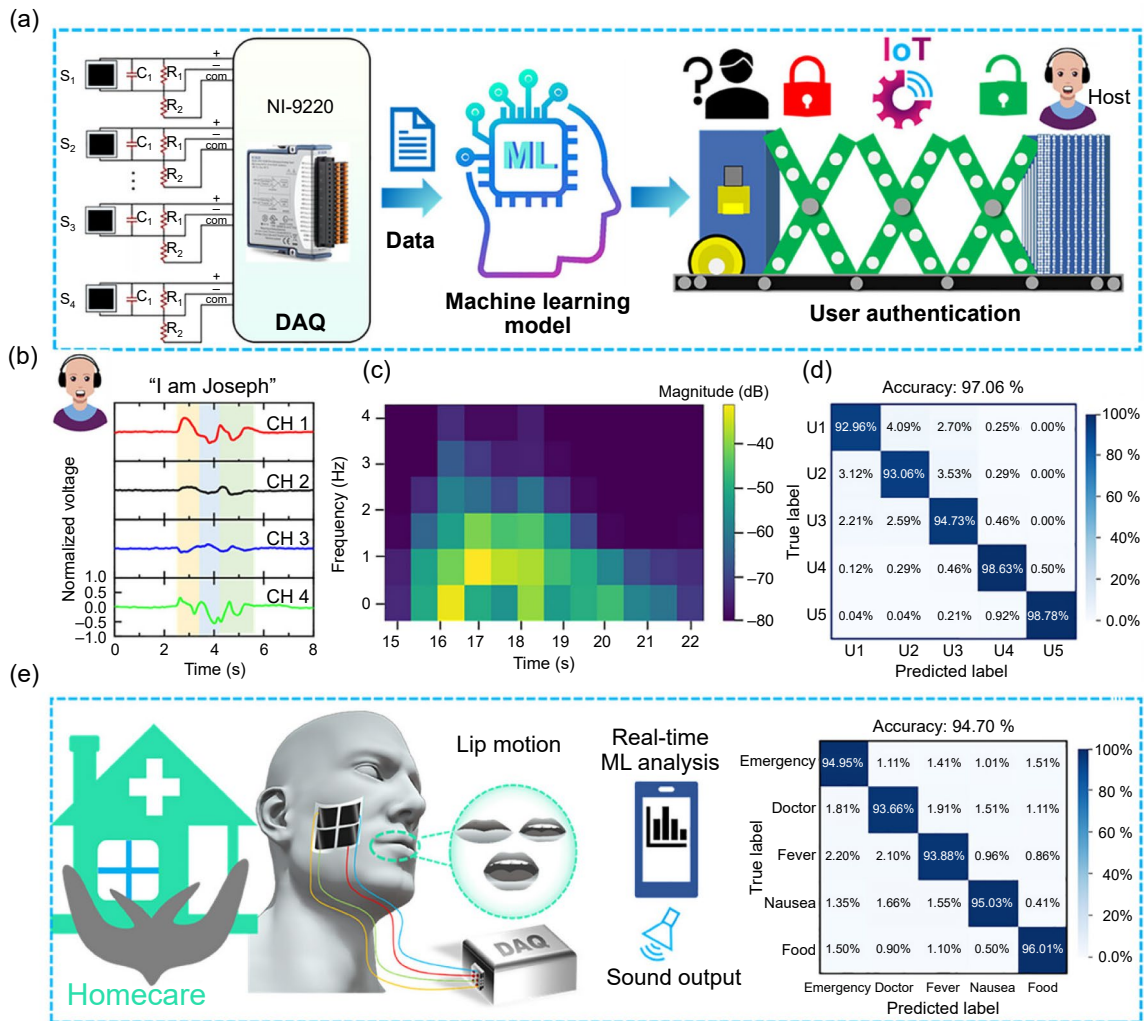


圖 5. 自供電仿生感測平台之代表性電訊號範例與智慧辨識成果。

將摩擦奈米發電元件構成柔性壓力感測陣列並嵌入義肢腔體內，可於無外接電源情形下即時量測殘肢－義肢介面之壓力分佈情況。感測系統可於不同活動階段與受力條件下提供穩定且具空間解析度之訊號輸出，並可進行壓力場重建與趨勢分析，協助評估義肢適配性與長期配戴舒適度。此結果顯示自供電仿生感測技術於輔具健康監測及義肢照護之應用潛力。

裝置可獲取具結構化特徵之時域訊號，並可進一步進行時間－頻率分析 (如 STFT)。在機器學習建模上，文獻常見兩類輸入策略：其一為端到端學習，直接以固定長度波形片段作為 CNN/LSTM 的輸入，或將波形轉為 spectrogram 作為 2D-CNN 輸入；其二為傳統特徵式學習，先對每個事件窗 (window) 萃取峰值 (peak)、均方根 (RMS)、上升/下降時間、面積 (integral/charge proxy) 與頻域能量 (FFT bands) 等統計特徵，再以 Random Forest (RF)、SVM 等分類器進行模式分類。以自供電觸覺陣列於無聲語音/吞嚥動作辨識之研究為例，系統可達身分辨識 accuracy 97.06%，並於五個詞彙之無聲語音分類達 overall accuracy 94.70%，且吞嚥復健動作分類可達 overall accuracy 98.04%，顯示自供電感測訊號具備用於智慧化辨識與居家健康照護之潛力。

六、結論：技術評估與前瞻展望

綜觀本文所整理之「自供電仿生感測平台」發展脈絡，自然啟發的微結構／材料設計、摩擦電奈米發電 (TENG) 之能量轉換機制、柔性可穿戴裝置工程，以及訊號處理與機器學習分析策略，已逐步形塑出一條可落地於健康監測的技術路徑。相較傳統需外接供電的感測系統，自供電感測以人體互動為能量來源，具備降低長期供電與維護負擔的優勢；同時，透過仿生結構提升訊號穩定度與耐用性，可在實際接觸、摩擦與長時間動作情境下維持可辨識的輸出型態。進一步結合資料驅動方法，研究已能將自發電訊號轉化為可量化的功能性指標，並在特定任務上達到高辨識效能，例如以觸覺陣列搭配機器學習進行使用者辨識 (accuracy 97.06%)、無聲語音詞彙分類 (overall accuracy 94.70%) 以及吞嚥復健動作分類 (overall accuracy 98.04%)，展現其在居家照護、復健監測與輔助溝通等應用場景的可行性。

然而，若要推進至更廣泛與長期部署，自供電仿生感測仍需面對若干關鍵挑戰：其一，跨使用者、跨場域的訊號變異與泛化能力 (包含佩戴位置、皮膚狀態、動作幅度差異) 可能造成模型性能下降，亟需以更嚴謹之驗證設計 (例如以受試者為單位之 LOSO、跨場域測試) 與資料增強策略建立可靠的泛化能力；其二，仿生微／奈米結構在製程一致性、耐磨耗與規模化製造方面仍是工程瓶頸，需結合材料配方、模具與封裝流程優化，並導入可量產的品質管控指標；其三，若系統要真正達到長期自主運作 (含運算與無線傳輸)，仍需與低功耗電子、能量管理與儲能模組整合，並同步處理資料隱私與資安議題，以符合未來醫療/照護場域的導入需求。

展望未來，自供電仿生感測平台可朝兩個方向深化：在「功能整合」面向，可結合多模態感測 (壓力、拉伸、振動、溫濕度等) 與邊緣運算，形成更完整的生理/動作狀態表徵；在「工程落地」面向，則需透過製程工程化與標準化測試 (耐久、環境穩定、跨族群/跨情境驗證)，逐步建立可比較、可驗證的性能指標體系。隨著長期資料累積與模型更新機制成熟，此類系統亦有機會進一步支援個人化健康分析、復健進度追蹤與早期風險提示等更具臨床與社會影響力的應用。

自供電仿生感測平台不僅提供感測與能量供應模式上的新選項，更是材料科學、感測工程與智慧醫療之間的關鍵橋梁；若能在泛化能力、製程量產、系統整合與合規驗證上持續突破，將有望成為下一代具自主性與可長期部署能力的智慧健康監測解決方案。

參考文獻

1. P. Parashar, L.-C. Shen, Y.-H. Lee, M. K. Sharma, B. K. Nahak, K. Kaswan, F.-C. Kao, J.-J. Hu, Z.-H. Lin, *Small*, **21**, 2503969 (2025).
2. P. Parashar, M. K. Sharma, B. K. Nahak, A. Khan, W.-Z. Hsu, Y.-H. Tseng, J. R. Chowdhury, Y.-H. Huang, J.-C. Liao, F.-C. Kao, Z.-H. Lin, *Journal of Materials Chemistry A*, **13**, 13750 (2025).
3. M.-Z. Huang, P. Parashar, A.-R. Chen, S.-C. Shi, Y.-H. Tseng, K. C. Lim, H.-Y. Yeh, A. Pal, D.-Y. Kang, Z.-H. Lin, *Nano Energy*, **122**, 109266 (2024).
4. C. Yeh, F.-C. Kao, P.-H. Wei, A. Pal, K. Kaswan, Y.-T. Huang, P. Parashar, H.-Y. Yeh, T.-W. Wang, N. Tiwari, T.-T. Tsai, Y.-F. Huang, Z.-H. Lin, *Nano Energy*, **104**, 107852 (2022).
5. K.-B. Chang, P. Parashar, L.-C. Shen, A.-R. Chen, Y.-T. Huang, A. Pal, K.-C. Lim, P.-H. Wei, F.-C. Kao, J.-J. Hu, Z.-H. Lin, *Nano Energy*, **111**, 108397 (2023).

作者簡介

吳鶴笙先生現為國立臺灣大學醫學工程所碩士生。

Ho-Sheng Wu is currently a M.S. student in the Department of Biomedical Engineering at National Taiwan University.

洪晟淳先生現為國立臺灣大學醫學工程所碩士生。

Sheng-Chun Hung is currently a M.S. student in the Department of Biomedical Engineering at National Taiwan University.

林宗宏先生為國立臺灣大學化學研究所博士，現為國立臺灣大學醫學工程學系教授。

Zong-Hong Lin received his Ph.D. in Chemistry from National Taiwan University. He is currently a Professor in the Department of Biomedical Engineering at National Taiwan University.