

## 觸覺科技人機應用近期發展趨勢

台灣亞太產業分析專業協進會 102 年認證產業分析師 林研詩

### 一、趨勢面：網宇融合逐步改變生活消費習慣，邁入 6G 時代遠距增強人類擬真觸覺互動需求浮現

隨著疫後新常態生活逐漸走向多元混合模式，遠距協作與新經濟誕生加速產業數位轉型的腳步，新興科技成就人類智慧生活方式朝向網宇融合（Phygital）時代發展，即透過數位網路（Digital）加上實體（Physical）共感的生活方式，加上近期生成式人工智慧(Generative AI, GAI) 技術躍進，結合物聯網(IoT)的延伸應用至觸覺網路(Tactile Internet, TI)，開創網宇互動、沉浸體驗之全感知擬真服務新興應用遍及智慧城市、智慧健康、智慧育樂、智慧商業、以及智慧移動等垂直場域。智慧生活透過融入即時(real-time)的觸覺回饋，不僅可協助打破時空限制進而操作遠方的物件，更可解決當事人必須抵達現場才能完成任務的舟車勞頓之苦，更可增強人類遠距智慧生活體驗。未來架構在 6G 基礎建設發展上，更可望降低延遲性，達到精準操控遠方觸覺網路的目的，拓展更多以人為本的產業運用商機。



資料來源：國際電信聯盟(ITU) (2023/06)

圖 1 2030 年 6G 網路關鍵七項新應用

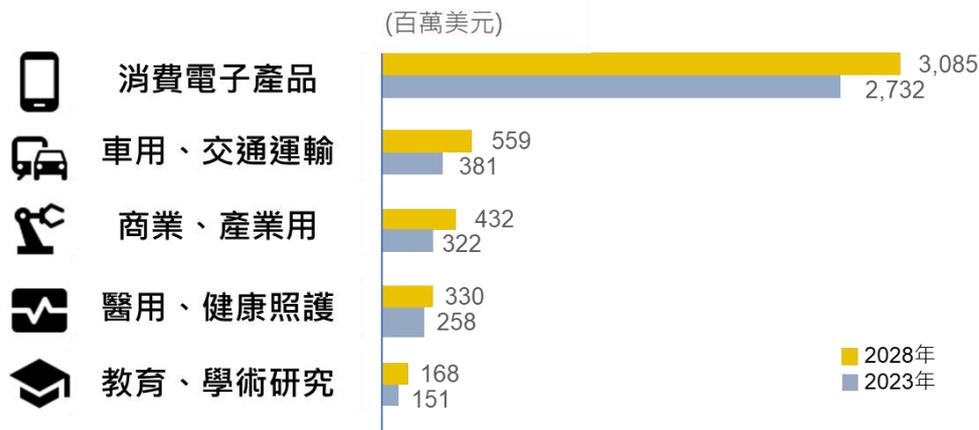
近期觸覺網路作為 6G 的關鍵技術，已引起學術界和產業界的關注，人類與遠端環境的互動，可透過觸覺網路提供感知重現（Telepresence），賦予人類五感的延伸，彌補聲光領域的不足，並達到人類增強（Human Augmentation）的目的。國際電信聯盟(ITU)和電機電子工程師學會(IEEE)等國際標準組織已經開始著手制訂 6G 時代觸覺網路相關領域的標準，透過 6G 傳輸延遲性低於 1 毫秒，超越人類的反應速度，使遠端即時觸覺回饋成為可能。加上 6G 資料傳輸率高於 10Gbps、1 平方公尺可連接 100 個裝置的網路密度的特性，可實現遠端對於觸覺資訊的傳輸，並可完成人對人的溝通，到人對機器的全控等精密動作控制，執行高可靠性的工作，如遠距手術或遠距機械控制等，並解決未來勞動力不足問題，提供實現社會和工商業等領域即

時協作系統與創新應用，帶動遠距增強人類擬真觸覺互動的新市場需求。ITU 預估 2030 年 6G 可望為七項新興應用商用化，其中，遠距操作觸覺網路(Tactile Internet for Remote Operations, TIRO)為關鍵技術之一。

## 二、市場面：早期資金投入、智慧穿戴四大垂直應用高成長

根據 Markets and Markets 預測，2023 年全球觸覺科技市場規模約 42 億美元，至 2028 年將可達 50 億美元，年複合成長率為 3.7%。其中細分市場規模最大為消費型市場，預估至 2028 年可增加至 30.85 億美元，市場主要驅動力為觸覺技術日益融入各項消費電子產品，推動觸覺技術需求，包括手機、平板電腦和其他可穿戴技術等消費電子設備的使用不斷增加，例如智慧手錶、智慧手環、健身追蹤器等，已透過融入觸覺科技提升產品功能。除消費型市場為最大應用市場外，預估 2028 年觸覺回饋科技應用高成長利基市場，包括四大垂直應用場域，依序為車用及交通運輸(Automotive & Transportation) 5.59 億美元，商業及產業用(Commercial & Industrial) 4.32 億美元，健康照護(Healthcare) 3.30 億美元，以及教育及學術研究(Education & Research) 1.68 億美元。

**觸覺科技主要應用市場(2023-2028)**



資料來源：Markets and Markets (2023/06)

**圖 2 觸覺科技主要應用市場規模(2023-2028)**

分析觸覺回饋在四大垂直應用場域主要市場推力包括：

1. **車用及交通運輸**：隨著智慧座艙趨勢發展，使用者體驗不斷演進，廠商透過結合視覺、

聽覺與觸覺技術，以整合優勢創造多重感知環境和增進車載人機互動商機，開發 3D、透明、防窺、可撓式、觸覺回饋、擴增實境等功能導入，特別是對駕駛員施加力道、震動或各項動作模擬觸覺，提供更安全、更明智和更直覺的使用者體驗已成為智慧移動產品重要設計元素，未來透過以使用者為中心交通運輸，提供移動即服務（Mobility as a Service, MaaS）的個人化觸覺體驗，透過互動服務平台改變使用者習慣，成為整合多元運具(Multi-modes)新型態商業模式。

**2. 商業及產業用：**隨著零售與商業賣場走向虛實融合(Online Merged Offline, OMO)服務，實體商店內可透過擺放大型觸控螢幕 KIOSK 擴大坪效，讓顧客互動接觸更多商品的功能，若線上購物者可利用觸覺技術裝置，體驗產品（如衣物）的材質和紋理，增進對物品實體的理解，進而讓位於遠處的商品產生更真實的存在感，增加使用者購買意願。零售業普遍認為觸覺回饋一直是線上購物中缺失的環節，購物的觸覺體驗對顧客來說具有巨大的吸引力與積極情緒效應作用，可在人與產品、買家與賣家之間建立像徵性聯繫，創造推動購買決策的稟賦效應。產業用以沉浸體驗培訓專業人員為主，因觸覺的直接感受可避免因疏失而觸發潛藏危險，亦可確保使用者在安全的環境下模擬練習，藉以降低實際操作時的失誤率及危險性，同時節省大量的成本，並可減少常見的人為因素為操作者之經驗或者技能不足的職業傷害。由此可知，透過體驗式學習逼真且安全的數位雙生、情境模擬、虛實互動、可反覆演練並記錄分析的特色，達到提升實務工作的效能以及專業素質之效果。

**3. 醫用與健康照護：**在醫療領域上，擬真操作與觸覺回饋扮演日趨重要的角色，為基礎的醫療訓練與患者復健系統中提供重要的生理回饋機制，智慧健康用的穿戴式產品逐步發展成為雲端健康促進生態圈，帶動相關商機包括完整生理訊號感測的穿戴式裝置、行動裝置的應用軟體、健康管理加值服務，以及雲端服務系統所提供的適性化健康促進內容或課程，帶來居家照護的便利性。此外，遠距醫療照護市場，不僅是人類醫療，還包含寵物醫療，以及結合寵物穿戴科技的遠距健康應用服務商機。

**4. 教育及學術研究：**隨著 XR 教材漸趨成熟的發展，結合 AI 自主學習、遠距互動教育科技等，體驗式學習（Experiential Learning）已成為新常態育樂生活的顯學與人才養成關鍵。透過 XR 教材的豐富性結合觸覺穿戴的體驗性，對於協助提升學生或員工教育訓練之學習效果，在教育領域中所帶來變革與深度應用，運用擬真體感互動與實境科技，可建構出體驗式探索空間，改變學習的本質，引發學生自主學習達到翻轉教學的目標，並帶來構建 XR 創新育才價值。

再從早期新創資金的投入分析，根據 CB Insights 調查，觸覺回饋（Haptics）與感知統合

技術為近期穿戴裝置主要獲投項目，同時也是發展元宇宙技術應用的關鍵創新元素。主要因素在於 VR/AR 頭戴裝置技術發展上，僅視覺與聽覺的優化，仍難以創造全沉浸式體驗，需透過結合觸覺回饋體驗，提供使用者與虛擬物件間更擬真的互動，滿足消費者良好使用經驗與觸動交易決策，因此提供觸覺與感知統合的新創公司正受到資本市場追捧，觸覺相關新創企業主要以穿戴裝置推動各智慧場域的觸覺解決方案。其中，觸覺科技獲投規模最大的新創公司為美國 HaptX 公司(之前為 AxonVR 公司)，2014 年取得 120 萬美元的種子前 (pre-seed) 投資，隨後陸續取得種子輪 580 萬美元投資、A 輪資金 1,200 萬美元、美國國家科學基金會(National Science Foundation, NSF) 補助 150 萬美元等，主要投資者包含 Dawn Patrol Ventures、Mason Avenue Investments、Taylor Frigon、Upheaval Investments、Votiv Capital、Keiretsu Capital、網易等。其餘受矚目的觸覺回饋新創公司包括 VR 觸覺手套公司 SenseGlove、荷蘭模擬觸覺 Manus VR 手套設計開發公司、英國 Teslasuit 體感衣新創公司、英國 Fundamental VR 醫療培訓觸覺回饋方案公司等。由於智慧穿戴手套可透過微振動、氣動系統 (pneumatic system) 和運動追蹤結合，提供人們感受數位物件的材質、硬度和重量，或以體感衣提供全身的觸覺回饋和溫度控制。

### 三、技術面：輕便化、AI 化、擬真化發展

#### (一) 元件端-零組件朝輕便化發展，整合力覺、觸覺、浮空視覺功能

此外，國際大廠如 Meta 亦積極開發擬真回饋手套與電子皮膚，應用於消費、育樂、醫療...等場域，皆針對觸覺體驗需求缺口，持續投入相關產品應用開發資源。為了實現具有「觸感」的互動控制裝置，Meta 多方面嘗試觸覺重現的解決方案，目前需以大量觸覺感測器傳輸到穿戴裝置，再以 AI 與高效能運算技術模擬出真實的碰觸感受。例如與卡內基梅隆大學(Carnegie Mellon University)共同開發新型態的觸覺感測器 ReSkin，將做成人體皮膚的型式，厚度約 2~3mm，上層是內含磁性微粒，具有可拉伸性、柔韌性與彈性的電子材料，下層則是觸覺感測器。當 ReSkin 與物體接觸後，裡頭的磁性微粒彼此的間距會發生變化，進而產生磁場變化，再經計算分析即可得到現在正施加多少力、方向與位置等感官數據，使用壽命目前可達 50,000 次接觸使用，並具備 400Hz 的時間分辨率與 1mm 的空間分辨率。Meta 也曾經透過實境實驗室 (Reality Lab) 開發材質柔軟且輕巧的觸覺手套，手套上安裝上百個小型馬達，透過馬達的震動來模擬真實觸感，但容易產熱與過重，並且耗電，未來朝向材質更柔軟的軟機器 (Soft robotics) 與微流體技術 (Microfluidics) 進行研究，改良裝置將朝向更輕巧，快速反應發展。

品牌領導公司蘋果(Apple Inc.)於 2023 年全球開發者大會(WWDC2023)發佈首款 MR(混合實境)頭戴式顯示裝置 Apple Vision Pro，產品定位為 AI 空間運算裝置，訴求整合出更輕便的零組件系統，提供沉浸式體驗，以及無縫連接 iPhone、Mac、iPad 產品實現多工處理，但該產品的人機互動模式缺乏觸覺回饋功能，不易重現真實世界觸摸某物體時，手部接收到許多感官的回饋，這對消費者感知非常重要，目前 Apple Vision Pro 以虛擬按鍵懸停狀態(Hover)亮度明暗顯示，作為伸手觸摸虛擬內容的按壓互動模式，此方式是用其他類型的回饋來彌補缺失的觸覺感官訊息。因此，在 Apple Vision Pro 未支援手持控制器的情況下，部分開發商需針對手勢、眼球追蹤控制技術進行開發，同時將增加系統整合難度。



資料來源：工研院產科國際所 ITIS 研究團隊(2023/08)

圖 3 觸覺科技近期技術創新趨勢

此外，遊戲大廠 Sony 公司開發遊戲主機電子產品 PS5，推出的虛擬實境遊戲頭戴裝置配件- DualSense 無線遙控器，內建觸覺回饋技術，是最受矚目的新功能，即具備自動調整觸發器 (adaptive trigger) 的遙控器，為玩家帶來全新的觸覺回饋體驗。2023 年推出新一代 PlayStation VR2 Sense 控制器，持續改良技術，可藉由裝置振動、3D 音效、智慧眼動追蹤、注視點渲染、自適應扳機、觸覺回饋等，達到比前一代更擬真的沉浸感，提供玩家獨特真實的遊戲體驗。未來 SONY 也將持續研發觸覺(Haptics)、聽覺(Sound)、視覺(Visual)感知統合的產品，透過輕便化控制器、手環的設計提升操控舒適度，以打造 2030 年後網宇融合的遊戲為願景，相關零組件也朝舒適、輕巧、透氣的設計方向開發。綜上所述，隨著品牌領導廠商紛紛布局投入下一代

網宇互動系統，賦予體感裝置更輕便、GAI、擬真的功能加強遊戲互動使用者體驗，亦帶動相關零組件廠商技術蓬勃發展與創造更多市場商機。

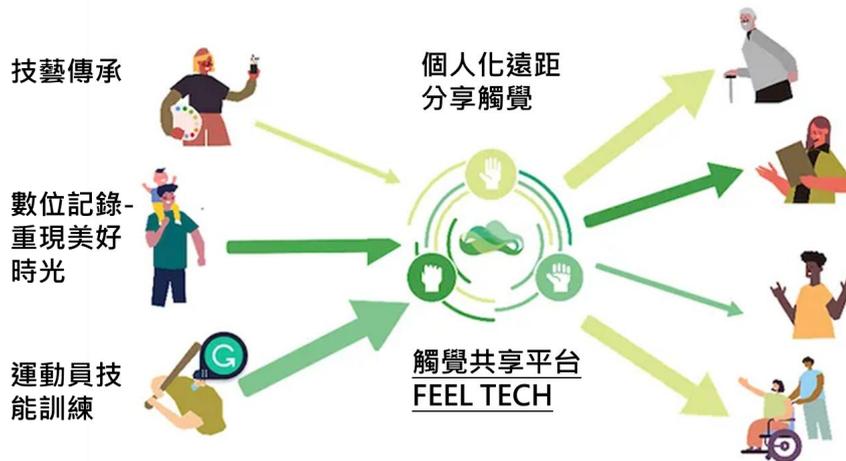
## （二）軟體端-結合生成式 AI 與機器學習融入觸覺感知系統設計發展

隨著創作者經濟蓬勃發展，加上生成式 AI 興起，結合應用於數位人物(Digital Human or Avatar)，包括虛擬偶像、虛擬網紅(VTuber)、虛擬物件成為新興媒體影音內容開發趨勢，根據市調結果，虛擬網紅互動率較真人高三倍，因此衍生虛擬物件擬真互動商機。以消費電子大展 CES 2023 為例，XR 體感配件、AI 融入沉浸體驗皆為會展亮點。在體感配件上，日本新創公司 AI Silk 與德國導電纖維 Heraeus 公司合作，開發由導電纖維製成的超輕觸覺回饋手套名為 Lead Skin，可以 AI 模擬虛擬物件操控的觸覺感受，透過測量手套內部導電纖維之膨脹與收縮電阻抗 (Electrical impedance)，並使用深度機器學習演算法預測手套使用者手指運動所預期達到的動作，觸覺回饋可應用在與虛擬偶像的握手會上，粉絲們不再需要排長隊等待。另一間 Gelsight 公司則是開發 "軟質觸覺" 技術，配合 AI 相機辨識圖片資訊，再以機器學習演算法，調整軟質材料凝膠的細微凹凸變化，提供材質觸覺重現功能，涵蓋軟硬度、粗糙度、平整度等特徵。此外，著名的機器人焊接公司 YASKAWA，也在德國 Automatica 2023 自動化展，展出結合 AI 和深度機器學習的力觸覺感測手臂，AI 化機器人皮膚可調整力觸覺回饋控制，進行汽車拋光作業、鈹金件瑕疵檢測與修補。代表結合生成式 AI 與機器學習融入觸覺感知系統設計，逐漸成為新產業趨勢。

## （三）消費應用端商模創新-觸覺擬真互動商機、多人共享觸覺

在未來觸覺科技消費應用創新領域上，MWC 2023 通訊會展上，日本廠商 NTT Docomo 展示的「人類擴張基礎建設」，匯集 6G 技術對未來觸覺共享平台的應用情境為矚目焦點，觸覺科技可共享人類感官，傳達情感、傳承技藝等。雖然以往共享觸覺的技術雛形已經存在，但傳統共享觸覺的機器體積過於龐大且成本高昂，NTT Docomo 大幅改良設備，透過戴在手指上的 FEEL TECH 技術為更多人創造體驗的機會，該技術通過電壓元件識別觸覺，再通過致動器來重現體感震動，並將震動與視覺圖像結合、共享。NTT Docomo 認為觸覺共享可提供言語無法表達共同觸覺帶來的驚喜感受，例如感受到嬰兒粉嫩小手的觸感、寵物皮毛的溫暖，或者與對方擊掌的感覺。未來更多共享觸覺潛在應用包括，可跨越時間與空間場景的“數位感覺記錄數據化”，例如職業網球運動員可分享如何握拍，有助於運動技能學習。對於樂器、工藝品、遊戲等也是如此。若可透過數位觸感瞭解熟練演奏者的感覺，教學者就能傳達出難以用語言表

達的微妙細微差別。又或者人類用身體來感受世界，應用在家庭記錄小孩出生時的感受，長大後向孩子傳遞溫暖、共享觸覺回憶經歷，並在與他人互動的過程中成長。共享觸覺可解決目前社交媒體過於專注於視覺和聽覺，因僅靠圖像和文字完成的交流，長期忽略了觸覺與其它感受的人際交流問題。



資料來源：工研院產科國際所 ITIS 研究團隊(2023/08)

圖 4 NTT DOCOMO 共享觸覺增強人類平台應用情境

#### (四) 產業應用端突圍-人機協作提升工安、技術傳承、生產力效益

觸覺科技在製造業應用上，除了以數位雙生系統進行職業培訓外，亦可直接應用於生產流程，幫助設計師能夠在虛擬空間中以多角度觀察設計，檢視產品是否符合需求、並以網宇互動技術將數據、規格、說明與指示等文字敘述疊加在現實情境之中，幫助員工在操作器械時得到說明指示或困難協助。在人機協作上，亦有結合機器視覺與力觸覺科技的解決方案發展中，例如日本企業開始研究以觸覺功能增值機器人方式，維持產業競爭力，讓本來只用在金屬加工領域的工業機器人，追加柔軟物體處理能力，轉用到農業、食品加工、以及醫療看護，觸覺科技已被日本機器人業者視為維持領先優勢的關鍵技術，成為跨製造與消費市場的重點。例如日本三菱電機將機器手臂感測器透過模擬觸覺，轉換成 Visual Haptics 遠距控制系統、防碰撞智慧預警系統等，因人們抓握或移動物體時，主要是根據觸摸物體時感受到的視覺和觸覺來移動雙手，遠距協作機器人操作原理也是如此，操作員根據機器人的攝影鏡頭視覺訊息以及感測器接

收的觸覺訊息進行操作，解決以往傳統操作員必須佩戴特殊設備的專用界面傳輸觸覺，造成沉重負擔與不適技術問題。另一類技術，如日本慶應義塾大學(Keio University)設立新創 Motion Lib 所設計的觸覺多用途晶片 ABC-Core，由單一晶片及其專屬軟體負責每根手指的受力感測、施力計算、目標影像運動管理、通訊控制等用途，機器人控制系統不需加裝額外控制套件，整套技術方案稱為 Real Haptics，提供真實振動回饋。慶應大學相關研究成果已與日本 Shibuya 精機(Shibuya Seiki)合作在柔軟水果處理設備上，不需人力便可處理易碰傷的柳橙、桃子、蔥，還能自動發現與揉捏確認品質，淘汰生病長蟲腐爛產品等。另外尚有食品包裝檢測、高危險作業人機協作、建築塗佈水泥作業等產業應用，已逐步導入觸覺科技提升生產力效益。

## 四、結論

近期觸覺科技發展已從「觸感」到「感觸」，主要效益包括解決網宇互動在消費端應用-看的到摸不到的問題，不僅可重塑消費者沉浸式購物體驗與商業模式，並可提升遊戲場景中的身歷其境感，為諸多消費性電子產品提供加值服務。而在產業端的人機互動應用-已然成為企業加速投入工業 5.0，落實數位科技與永續發展的利器。特別是我國正面臨少子化、高齡化衝擊勞動市場，中高齡者的勞參率低於 OECD 平均，國內製造業產線目前面臨高度依賴技術人力及技術經驗傳承等問題，不僅需要自動化解決產業缺工困境，把人的五感融入機械協作，傳承老師傅的經驗，更能務實解決製造業產線面臨的問題。因此隨著領導廠商紛紛投入網宇互動觸覺科技的發展，賦予沉浸體驗裝置更輕便、GAI、擬真的功能，創造多元沉浸和擬真體驗的技術解決方案，不僅可帶動相關零組件廠商技術蓬勃發展，也有助於加速智慧製造整合系統服務的輸出與外銷，並有機會進一步將相關經驗運用到各種產業，加速商業、教育、醫療培訓活動和文化體驗等諸多領域的開發和應用，值得作為我國產業在軟硬體加值解決方案之發展方向，並促成我國廠商在全球產業中扮演更重要的關鍵角色。

(本文作者為工研院產科國際所執行產業技術基磐研究與知識服務計畫產業分析師)

原文出處：ITIS 智網 <http://www.itis.org.tw/>