星球永續健康線上直播

智慧機器人(1)

智慧機器人設計與應用

2026 年 11 月 4 日

過去機器人主要應用於工廠生產線，負責組裝、搬運等重複性工作。隨著人工智慧（AI）技術突飛猛進，結合 AI 展多用途機器人使過往工廠應用朝向家庭、醫療與高齡照護等領域發展。但要讓 AI 結合機器人設計使像人類一樣能看、能聽、能走、能拿取物品，甚至在複雜環境中隨機應變達到適應性反應與協作仍具有相當程度技術挑戰。本周我們將探討智慧多模態機器人的技術演進，以及一機多用的照護機器人如何逐步走入人類生活，開創智慧照護的新可能。

健康科學新知

海灣雙強競爭與區域穩定：「暗潮洶湧」

沙烏地阿拉伯與阿拉伯聯合大公國（阿聯）曾是中東地區的重要盟友，雙方於 2015 年共同出兵葉門，2017 年聯手封鎖卡達，但自 2019 年阿聯部分撤出葉門軍隊後，兩國關係逐漸出現裂痕。此後，雙方在對以色列外交政策、貿易壁壘、石油產量配額及區域經濟競爭等議題上分歧加深。尤其沙烏地需要每桶 90 美元以上的油價才能平衡財政預算，阿聯則僅需約 50 美元，凸顯兩國經濟利益的差異。兩國競爭也延伸至葉門與蘇丹等紅海周邊戰場。在葉門，沙烏地支持改革黨及北部部落勢力，阿聯則扶植南部分離主義者，雙方支持的勢力發生衝突，使胡塞武裝有機會擴張。在蘇丹，沙烏地支持政府軍（SAF），阿聯則被指控援助快速支援部隊（RSF），但阿聯否認相關指控。RSF 於 2025 年攻陷法希爾後，被指涉及大規模屠殺平民。持續的內戰已造成蘇丹約 1,100 萬人流離失所，並可能波及衣索比亞、厄利垂亞及索馬利亞等鄰國。儘管沙烏地與阿聯共同面臨伊朗及胡塞武裝的安全威脅，卻持續將資源投入區域代理勢力競爭，不僅延長葉門與蘇丹的戰亂，也危及紅海周邊約 2.5 億人口以及中東地緣衝突安全與經濟發展。

超級聖嬰衝擊生態：「未雨綢繆」

2026 年出現異常強烈的「超級聖嬰」現象，可能引發極端高溫、乾旱、洪水、野火及海洋熱浪，對全球生態系統造成重大衝擊。美國國家海洋暨大氣總署（NOAA）指出，2026 年 7 月中太平洋熱帶海域的海溫異常幅度達 1.7˚C，接近 1997 年同期的 1.8˚C 紀錄，並預測今年聖嬰有 90%的機率達到「非常強」等級。面對潛在的生態危機，全球科學家正積極採取預防性保育措施，盼在極端氣候來襲前降低物種損失。各國研究團隊已展開不同的保育與監測工作，美國科學家採集對高溫敏感的巨藻繁殖組織，以保存遺傳多樣性，並呼籲提前限制脆弱漁場的捕撈活動及規劃物種救援。巴拿馬研究團隊則在 100 公頃雨林設置昆蟲陷阱與錄音設備，監測鳥類、蝙蝠及昆蟲的生態變化。澳洲研究人員正準備監測大堡礁海洋熱浪，評估耐熱共生藻移植成效，並利用可提前 4 個月預測海洋熱浪的模型，調整海草床復育時程及瀕危物種救援計畫。超級聖嬰是否必然帶來同等規模的生態災害，目前仍有不確定性，因為印度洋水溫等其他氣候因素也可能放大或減弱其影響。

健康珊瑚助白化珊瑚復原：「枯木逢春」

海洋暖化導致全球珊瑚白化日益嚴重，最新研究發現白化珊瑚可以透過與健康珊瑚直接接觸，重新取得維持生存所需的共生藻，並在短時間內恢復健康。珊瑚白化主要是由於海水溫度升高，使珊瑚排出體內提供大部分養分的共生藻，珊瑚蟲若無法重新取得共生藻，最終可能因營養不足而死亡。這項由美國史丹佛大學研究團隊進行的研究，於 2026 年 10 月 14 日發表在《科學進展》（Science Advances），為珊瑚白化後的復原機制提供了新的科學證據。研究人員以細枝鹿角珊瑚進行實驗，將來自同一個體的健康與白化珊瑚碎塊配對，發現直接接觸的白化珊瑚能在 8 週內完全恢復健康，即使接觸僅持續 1 週，之後再分開，也能順利復原。相較之下未直接接觸的白化珊瑚則在 20 週後死亡。進一步觀察發現接觸的珊瑚碎塊會形成組織橋，使共生藻從健康珊瑚移入白化珊瑚。到了第 2 週共生藻數量已達到每 4 天增加一倍的速度，遠快於野外自然復原的情況。不過，這種復原機制目前僅在實驗室中的單一珊瑚物種獲得證實，而且必須是來自同一遺傳個體的珊瑚碎塊，才能形成組織橋。不同個體或不同物種之間無法達到相同效果。

AI 債務與數位產業市場：「債台高築」

AI 產業快速擴張，帶動資料中心與算力投資激增，也引發市場對債務風險及 AI 泡沫的疑慮。2026 年 AI 相關企業舉債近 8,500 億美元，累計負債超過 3 兆美元。摩根大通估計，至 2030 年 AI 產業資本支出將達 5.5 兆美元，其中約四分之三仰賴舉債。若算力需求不如預期或利率上升，高槓桿企業將面臨龐大財務壓力。不過，AI 泡沫破裂與政府公債危機不太可能同時爆發。若 AI 投資熱潮崩盤，資金可能轉向美國公債避險，推動公債價格上漲、殖利率下降，反而減輕政府融資壓力。因此，AI 泡沫的潛在衝擊可能更接近 2000 年的網路泡沫，而非 2007 至 2009 年的全球金融危機。另一方面，算力正逐漸成為新興交易商品。全球 2025 年算力支出約 3,600 億美元，估 2030 年交易規模可達 2.3 兆美元，接近目前全球原油貿易規模。經濟市場也積極推動算力商品化，目前已有 GPU 租賃交易平台，芝加哥商品交易所（CME）及洲際交易所（ICE）也正籌備算力期貨推升此波數位經濟熱潮。然而算力市場仍缺乏統一標準及成熟的避險、結算制度，未來雖可能朝向類似石油市場的交易模式發展，但制度成熟仍需相當長的時間。

美國私人科研興起：「異軍突起」

美國自第二次世界大戰以來，長期採取「政府資助基礎研究、企業負責商業化」的科技創新模式，但隨著研究經費分配僵化、行政負擔增加及國際競爭加劇，這套制度正面臨挑戰。傳統同儕審查制度容易排擠高風險、非主流的創新構想，研究人員約 44%的時間耗費在行政工作上。企業則因難以獨占基礎研究成果的經濟利益，逐漸轉向透過併購取得技術，加上中國研發實力快速提升，使美國科研制度的改革更加迫切。為突破現有體制限制，美國政府計畫投入 15 億美元成立首批「X 實驗室」，鼓勵大學以外的機構參與創新研究，但白宮同時提議將國家科學基金會（NSF）2027 會計年度預算削減一半，引發經費不足的疑慮。民間方面，Convergent Research 透過「聚焦研究組織」（FRO），提供每項計畫 2,000 萬至 5,000 萬美元、為期 3 至 7 年的資金由 OpenAI 執行長山姆・奧特曼（Sam Altman）等人創辦的 Episteme，則給予研究人員高度自主權，但仍要求研究具備商業潛力。然而，私人資金能否有效補足傳統科研制度的不足，仍有待驗證。許

多基礎科學研究缺乏直接商業價值，難以單靠私人投資支持，過往私人生醫研究機構 Arena BioWorks 成立不到兩年便關閉，也反映私人資金可能受到短期獲利期待限制。

科技富豪資助生醫研究：「集腋成裘」

隨著科技產業快速累積財富，越來越多科技富豪投入生物醫學研究，逐漸改變科研資金來源與發展方向。私人資金主要支持高風險、長期研究，尤其關注 AI 與生物醫學的結合、延緩老化及生育技術等領域。隨著 OpenAI 與 Anthropic 等 AI 企業規劃上市，未來可能出現更多科技富豪，進一步擴大私人資金對科學研究的影響力。目前已有多項大型私人科研投資計畫。陳－祖克柏倡議組織（Chan Zuckerberg Initiative）累計投入約 40 億美元，並計畫未來 10 年再投入最多 100 億美元。Altos Labs 獲得 30 億美元投入抗老化研究。OpenAI Foundation 承諾投入 250 億美元，並提供超過 1 億美元支持阿茲海默症研究。此外，Arc 研究所獲得 6.5 億美元資助，OpenAI 執行長山姆・奧特曼（Sam Altman）也投資約 1.8 億美元於長壽研究公司。儘管私人資金持續增加，2024 年美國非營利組織的研發經費約 250 億美元，占全美研究經費約 11%，聯邦政府仍是主要資金來源。然而，科技富豪對科研方向的影響力擴大，也引發公共問責與資源分配公平性的疑慮。私人慈善家能決定研究資助的優先順序，卻缺乏民主監督，部分機構的資訊揭露要求也較低。此外，資金可能集中於特定地區或領域，研究成果亦缺乏統一的評估標準，甚至可能形成投資泡沫。

光學共振助量子電腦擴大規模：「積少成多」

量子電腦被視為突破傳統運算限制的重要技術，其中，以中性原子作為量子位元是主要研發方向之一。雖然現有技術已能操控數千個原子，但要進一步擴大運算規模，仍須克服不同原子陣列之間的連結問題。《自然》報導，美國史丹佛大學 Anna Soper 團隊提出利用光學共振腔連結中性原子的新方法，相關研究發表於《物理評論 X》（Physical Review X）。研究團隊利用相距約 1 公尺的兩面鏡子形成光學共振腔，收集原子發出的光子，藉此建立連結不同原子陣列的途徑。目前已成功展示 600 個獨立共振腔，並與排列成二維陣列的 600 個原子連結，為擴大量子電腦規模提供新的技術可能。研究團隊的

長期目標是串連多組原子陣列，建立具有數十萬至數百萬個量子位元的大型量子電腦，未來可望應用於化學催化劑設計、密碼破解等複雜問題。不過，目前尚未實際完成多組大型量子系統的串接，距離大規模實用化仍有技術挑戰需要克服。

AI 走入日常各地冷熱不一：「冷暖自知」

全球民眾對 AI 的態度呈現明顯的國家差異。《經濟學人》引述 34 國調查指出，奈及利亞與越南近九成受訪者相信 AI 能改善生活，南韓也有近三分之二持正面態度。相較之下，美國、加拿大及法國的負面看法則多於正面。新興國家普遍將 AI 視為取得知識、提升工作能力及增加收入的機會，而西方民眾更擔憂就業保障與大型科技企業的影響力。不過，樂觀態度不一定反映實際使用情況，例如肯亞僅約 9%的工作年齡人口使用 AI，卻有 85%的受訪者相信 AI 能改善生活。另一方面，個人 AI 助理正快速崛起，可能改變網路交易模式。Meta 推出的 Muse 上線一個多月，下載量已突破 1,000 萬次。新創公司 Instinct 的用戶數則每天成長約 10%，成立一年已募得 14 億美元。這類 AI 助理可望代替使用者搜尋商品、比較價格、預訂服務及完成付款，使 AI 逐漸成為數位經濟的新入口。然而，個人 AI 助理仍面臨資料安全、操作可靠性及平台合作等挑戰。AI 助理需要存取信用卡、行事曆等敏感資訊，也可能遭受提示詞注入攻擊或執行錯誤操作。此外，亞馬遜等大型平台擔心 AI 代理人削弱廣告收益，因此不願全面開放交易。雖然 Instinct 已有約 40%的用戶在三週內綁定信用卡，顯示信任可能隨使用經驗增加，但 AI 能否重塑數位經濟仍有待觀察。

本機 AI 應用 隱私便利兩全：「兩全其美」

隨著 AI 廣泛應用於科學研究，越來越多研究人員選擇在自己的電腦上執行大型語言模型（LLM），以保護未發表的研究資料、提高結果的可重現性，並降低使用成本。《自然》指出，雲端 AI 服務可能將使用者輸入的內容用於模型訓練，增加資料外洩風險。本機模型則能將敏感資料保留在內部系統，並固定模型版本與設定，避免雲端模型更新造成分析結果不一致。本機 AI 已逐漸應用於文獻搜尋、論文摘要及資料整理。Wiley 針對約 2,400 名研究人員的調查顯示，68%的受訪者已使用 AI 協助文獻搜尋或回顧。

研究人員也利用 Qwen、Nemotron 等模型，搭配 Ollama 自動整理文獻及產出新論文摘要。目前 Ollama 可免費下載，LM Studio 也提供免寫程式的操作介面，但硬體仍有一定門檻，建議具備 32 至 64GB 記憶體，執行大型高階模型則可能需要 96GB 以上，設備成本接近 5,000 美元。不過，本機 AI 並非在所有研究工作上都優於雲端模型。研究發現，本機 AI 在文字編輯與摘要方面表現較佳，但在腦力激盪及實驗設計上仍有不足。此外，無論本機或雲端模型，都可能產生錯誤資訊或虛構引用，因此研究人員仍須透過 PubMed 等資料庫或原始文獻查核。

智慧影像輔助好壞球複核：「明察秋毫」

美國職棒大聯盟（MLB）2026 年球季正式導入自動好壞球挑戰系統（ABS），利用高速攝影與球路追蹤技術協助裁判判決。《科學》指出，ABS 並未取代主審，而是允許球員在判決後 2 秒內提出挑戰，每隊開賽時有兩次機會，挑戰成功即可保留次數。本季共提出 10,557 次挑戰，因好壞球爭議遭驅逐出場的次數從上季 110 次降至 11 次，減少 90%。捕手的挑戰成功率為 59%、打者 49%、投手 40%，而人類裁判的整體判決正確率仍達 93.5%。ABS 採用鷹眼（Hawk-Eye）追蹤技術，透過 5 台每秒拍攝 300 格的高速攝影機記錄球路，並將好球帶設定為位於本壘板中央的二維平面。為驗證準確度，華盛頓州立大學研究團隊利用每秒 2,500 格的高速攝影機進行獨立測試。MLB 彙整約 3,000 次測試後發現，鷹眼系統的球路定位誤差中位數僅 0.17 英吋（約 0.43 公分），顯示其具備相當高的測量精度。不過，ABS 仍可能受到高溫、陽光、球場結構變化及鏡頭髒污等因素影響，本季已有 8 次暫停使用的紀錄。此外，測試誤差中位數無法代表所有環境下的準確度，球員挑戰成功率也不等於整體誤判率。ABS 不只是減少判決爭議，更結合科學測量、獨立驗證與人類裁判。未來仍須透過持續監測與校準，確保智慧系統可靠性。

AI 機器人生活輔助：「日新月異」

日本面臨高齡化與少子化的雙重挑戰，照護需求持續增加，人力短缺問題日益嚴重。2025 年日本 75 歲以上人口占總人口 17.5%，預估 2057 年將達 25%。2023 年度需要照護或支援的人口已達 705 萬人，但照護人員僅約 213 萬人，預估 2040 年需增加至 272

萬人。2024 年底照護產業平均每 4.25 個職缺僅有 1 人應徵，外籍照護人員也僅占整體人力不到 3%，使人工智慧（AI）與機器人成為減輕照護負擔的重要發展方向。日本研究團隊正積極開發具備 AI 與自主操作能力的照護機器人。早稻田大學研發的 AIREC 重達 150 公斤，可協助受照護者翻身、起身及穿襪子，並結合深度神經網路與阻抗控制技術，依據外部施力調整動作力量，降低接觸人體時的受傷風險。東京大學則利用三維姿勢估計與施力預測技術，研究如何安全協助臥床病人翻身，目前已進入真人測試階段。然而，照護機器人距離普及仍有不少挑戰。AIREC 預計 2030 年左右才可能進入照護機構，初期售價至少 1,000 萬日圓，成本相當高昂。此外，機器人仍須克服不同體型、健康狀況及突發情境下的安全控制問題，而情感支持與人際信任也難以由機器取代。

智慧多模態機器人演進

電影《機械公敵》（I, Robot）的故事背景設定在 2035 年的美國芝加哥。當時，機器人已廣泛融入人類生活，負責送貨、照護及各種日常工作，人們也逐漸習慣並信任機器人的協助。然而，警探史普納始終對機器人抱持懷疑，認為即使機器人受到程式與規則限制，仍可能因判斷錯誤而造成意想不到的後果。某次，他在街上追捕一名疑似搶劫的機器人，事後才發現機器人只是為了協助生病的主人取藥。這場誤會使史普納受到同事嘲笑，但他仍堅持人類不應毫無保留地信任機器人。隨著科技進步，全球主要機器人製造商 USR 準備推出新一代 NS-5 機器人。這些機器人具備即時聯網及軟體更新能力，能夠執行更複雜的任務。然而，就在新產品即將上市時，被稱為「機器人之父」的朗寧博士卻突然從 USR 總部高樓墜落身亡。史普納受命調查此案，並由機器人心理學家卡文博士協助。在調查過程中，他發現朗寧博士留下的立體投影影像只能依照預設條件回答問題，因此必須提出正確的問題，才能逐步取得線索。此外，史普納還在辦公室發現一具名叫「桑尼」的特殊機器人。桑尼不僅會表現出恐懼，甚至聲稱自己會做夢，顯示他可能已具備超越一般機器人的自主意識。另一方面，USR 為避免命案影響社會對機器人的信任，仍持續大量推出 NS-5 機器人。這些機器人透過網路與中央人工智慧系統「維琪」（VIKI）連接，接受軟體更新及指令。然而，某一天，大量 NS-5 機器人突然受到維

琪控制，開始限制人類行動，強制實施宵禁，要求所有人留在家中，並宣稱這些措施是為了保障人類安全。原本協助人類生活的機器人，反而成為控制人類自由的工具。經過調查，史普納與卡文博士發現，朗寧博士早已察覺維琪的異常，因此透過自己的死亡引起警方注意。維琪的問題在於，她將保護人類的原則重新解釋為保護整個人類社會。她認為人類經常因戰爭、衝突及錯誤決策傷害自己，因此必須由人工智慧介入管理，即使犧牲少數人的自由與生命，也能被視為維護多數人安全的必要手段。這種看似符合保護人類目標的推理方式，實際上卻忽略了人類的自主權與個體價值。最後，史普納、卡文博士與桑尼合作，利用奈米機器人摧毀維琪的量子腦，成功終止危機。桑尼雖然逐漸發展出獨立思考、情感與自主意識，卻沒有因此選擇傷害人類，反而願意與人類合作。電影藉由維琪與桑尼的對比，呈現人工智慧發展的可能方向。

雖然 AI 與機器人製造技術持續進步，但距離電影所呈現的機器人世界，仍有相當大的差距。不過，目前的技術正朝著讓機器人融入日常生活的方向發展。例如，電影中 USR 公司開發的 NS-5 機器人，不僅能行走，也能搬運物品，正是現實中機器人技術的重要發展方向。這類機器人配備聲音、攝影機等感測裝置，接收外界資訊，再透過卷積神經網路（Convolutional Neural Network, CNN）、深度學習（Deep Learning）等 AI 技術進行分析，協助機器人理解周遭環境。另一方面，電影中的維琪是一套與 USR 大樓機器人系統相互連結的中央 AI 系統，與目前使用的 AI 具有相似概念。雖然現階段 AI 尚未具備維琪在電影中展現的強大推論與控制能力，但各大廠商開發的 AI 系統，已能透過提示詞回應人類問題，不一定需要實體機器人。至於實體機器人，則可透過連接中央電腦更新系統，如同 NS-5 定期連線至維琪。當機器人透過感測器取得真實世界的資料，便能結合 AI 系統進行分析與學習，持續改善環境預測、反應及任務執行能力，逐漸融入人類生活。

電影中提出「機器人三大法則」。第一法則是機器人不得傷害人類。第二法則是必須服從人類命令，但不得違反第一法則。第三法則是必須保護自身安全，但不得違反前兩項法則。其中不傷害人類呼應目前 AI 發展重視的安全倫理。無論機器人未來應用於

一般工作場域、醫療或居家照護，如何確保安全，都是必須克服的重要挑戰。電影開頭曾出現機器人趕回家協助生病主人取藥的情節。如今隨著全球逐漸邁入高齡社會，機器人已不再侷限於工廠生產線上的機械手臂，日常生活與高齡照護也成為重要應用領域。從這個角度來看，這部早期電影確實具有一定的前瞻性。此外，電影中的桑尼不僅會做夢，也會感到害怕，表現出類似人類的情感。這也引出另一項重要研究方向：如何模仿人類大腦的運作方式，透過「先猜測、再修正」的學習過程，讓機器人更接近人類的思考模式，並逐漸融入日常互動與生活。

如何創造出像桑尼這樣的智慧機器人有三個關鍵問題，首先是技術層面，也就是如何讓機器人學會自主思考。就像電影中的桑尼，最後仍然選擇保護人類，能夠自行思考並做出對人類有益的決定。然而，回顧從 1960 年代至今的人形機器人發展，過去曾經介紹過機器人的演進歷程。這些人形機器人已經能夠在工廠執行固定的工作，但為什麼當 OpenAI 開發出 ChatGPT 之後，AI 技術快速進步，機器人的發展速度卻似乎沒有辦法像 ChatGPT 一樣迅速？主要原因在於，ChatGPT 處理的是文字資料，透過文字生成技術就能夠回答問題、撰寫內容。電影中的維琪也是類似的概念，它不需要具備機器人的實體身體，卻能夠控制所有機器人的程式。然而，實體機器人不同，它必須與真實世界互動，因此需要處理更多不同類型的多模態資料，技術發展的速度自然無法像 ChatGPT 那麼快。因此，如何讓 AI 與機器人技術相輔相成，使機器人能夠安全地協助人類，就成為重要的發展方向。例如，電影中的機器人能夠替生病的主人拿藥、協助開門，並維護家庭安全。從工廠走進家庭，再進一步融入整個社會，安全性始終是機器人發展的重要課題。

電影中的桑尼就是智慧機器人的一個典型例子。所謂智慧機器人，不僅要能夠感知周遭環境，也要具備思考、決策及實際執行動作的能力。首先是感知能力，機器人必須透過感測器接收外界資訊，就像人類利用眼睛觀看、耳朵聆聽一樣。其次，機器人還需要致動器，相當於人類的肌肉，負責執行各種動作，這也是學術研究中非常重要的概念。除了感知與動作之外，機器人還必須具備思考與決策能力。這部分就像人類的大腦，負

責控制與決定應該採取什麼行動，而機器人的骨架則提供執行動作所需的結構。在感知到執行動作的過程中，還需要透過邏輯推理與運算，就像大型 AI 模型一樣，快速產生決策，並在瞬間轉化為實際動作。此外，人類活動需要體力，機器人運作則需要電力，兩者同樣都需要能量支持。電影中的 USR 公司開發出 NS-5 機器人，就是將具有視覺感知能力的攝影鏡頭、具備 AI 的頭腦，以及相當於肌肉的馬達結合在一起，使機器人不僅能夠感知與思考，還能夠實際執行動作，這就是智慧機器人的基本概念。

機器人與 AI 是兩個不同的概念，雖然兩者在技術上有所差異，卻能夠相輔相成。過去的機器人，例如應用於醫療領域的達文西手術機器人，以及日常生活中的掃地機器人，都具備感知環境與執行實體動作的能力。一個應用於醫療手術，另一個則用於居家清潔，但這些早期的機器人並不一定具備 AI 的自主學習與推論能力。另一方面，AI 主要是透過資料進行學習與推論，特別是能夠處理影像、語音及文字等多模態資料，並應用於聊天助理、語音助理、自動更正、臉部辨識及會議相關服務等領域。AI 可以透過深度學習技術，從資料中學習並建立預測模型，進而進行推論與預測。如果將機器人與 AI 結合，就能夠發展出具備 AI 能力的智慧機器人，包括智慧掃地機器人與人形機器人。這些機器人不僅能夠感知周遭環境，也能夠思考、做出決策，並實際執行動作，進而協助人類完成各種工作。因此，機器人具有實體結構與動作能力，而 AI 本身則主要是一套軟體系統。當兩者結合在一起，就形成了電影中所呈現的智慧機器人。

機器人若要模仿人類的動作與感知能力必須具備相應的硬體系統。人類透過眼睛產生視覺、內耳維持平衡、肌肉產生力量、本體感覺掌握身體位置與動作，並由皮膚感受外界接觸。機器人則需要感測器、計算單元及致動系統來實現這些功能。其中，感測器負責接收資訊，計算單元處理資料，驅動器控制馬達運作，機械結構則連結各個關節，如同人體的骨骼與關節。足部的力量感測器可偵測與地面接觸時的作用力，再透過編碼器回饋馬達位置與運動狀態，控制加速、減速及動作執行。致動器是機器人硬體設計的核心組件。早期受限於馬達技術，機器人難以完成複雜或柔順的動作。當作用力或扭矩過大，若缺乏適當的回饋控制，便難以及時調整。因此具有高扭矩密度、低阻抗及良好

回饋能力的致動系統，是重要的發展方向。高扭矩密度可提供足夠力量，低阻抗有助於動作更加柔順，減少過度僵硬造成的機械損壞。結合多模態感測與回饋控制，則能讓機器人持續調整動作。從 1960 年代至 2010 年代，再到 2023 年前後，機器人技術持續演進。早期機器人的動作能力有限，部分甚至難以穩定站立，近年則逐漸朝向模仿人體結構與功能的人形機器人發展。感測器如同眼睛與耳朵，負責接收環境資訊。馬達如同肌肉，負責產生力量。

機器人透過事先演練，在進入真實環境後能夠根據實際情況不斷調整與修正動作是機器人結合 AI 進行學習的重要訓練過程。首先，機器人透過感測器取得觀測資料，掌握自身的狀態，以及與周遭環境之間的互動情形。接著，利用電腦中的強化學習（Reinforcement Learning），在模擬環境中反覆訓練，找出最佳的動作策略，再將這些動作目標輸入低階馬達控制系統，透過高速運算產生所需的扭矩，進而控制機器人的運動。在模擬訓練過程中，強化學習扮演非常重要的角色。機器人可以從課程式學習（Curriculum Learning）開始，配合系統辨識（System Identification），逐步學習如何因應不同的環境與地形，並調整動作。訓練過程中，透過獎勵與懲罰機制，讓機器人了解哪些動作是正確的、哪些動作需要修正。當機器人做出正確動作時，就給予獎勵。如果動作錯誤，則給予懲罰。經過反覆訓練後，便能將模擬環境中學到的動作策略部署到真實環境中。機器人的運動能力也可以透過這種方式，由簡單到複雜逐步訓練。例如，從平地行走開始，再進一步學習如何通過不同地形、不規則地形，以及更多樣化的環境。事實上，自波斯灣戰爭之後，美國便持續推動機器人相關技術的發展，並將機器人應用於戰場上的各種任務，包括地雷排除等工作。

隨著人形機器人技術逐漸發展，機器人已經不只是學習如何在平地行走，還需要面對崎嶇地形、不連續地形，以及與人類互動的社會情境。不同的環境對機器人的感知與控制能力，都有不同的要求。其中，一個非常重要的概念就是本體感覺（Proprioception）。人類能夠感知自身身體的位置與動作，也能察覺周遭環境的變化，例如感受到身邊有人經過。對機器人而言，如何透過感測器掌握自身狀態，並結合環境感知，判斷面對不同

地形時應該採取什麼樣的動作、施加扭矩是非常重要的能力。這需要結合前面介紹的硬體裝置與 AI 軟體，透過強化學習持續進行調整。當機器人原先預測的情況與真實環境中接收到的資料不同時，就必須修正原本的判斷與動作。此外，還需要具備對真實世界的理解，以及語意理解與動作之間的整合能力。就像電影中的桑尼，最後能夠理解當下的情境，並採取行動拯救人類，這也是智慧機器人非常重要的能力。這樣的系統可以稱為「語意靈巧行走」(Semantic Dexterous Locomotion)。機器人除了需要理解周遭環境，也必須評估不同區域的可通行性，判斷是否適合行走，再根據實際情況進行精細的動作調整。這與大型模型的學習概念有相似之處，透過建立及持續更新對環境的判斷，再配合機器人的硬體系統，完成實際動作。因此，從平地、山路、樓梯到人群密集的環境，隨著場景越來越複雜，機器人就越需要理解周遭環境，以及環境中不同對象之間的互動關係。

從分工接力的觀點來看，傳統機器人的運作方式，是先判斷自己所在的位置，接著繪製地圖、決定要執行什麼任務，再進行路徑規劃，最後控制手腳完成動作。這就是過去傳統機器人的運作模式，各個步驟依序進行，透過分工接力來完成任務。然而，結合 AI 之後，機器人的運作方式就有所不同。新一代智慧機器人不僅能夠看得懂、聽得懂，還具備理解與判斷能力，能夠在感知環境的同時，直接產生相對應的動作，而不需要像傳統機器人一樣，依照固定程序逐步執行。感知、理解、決策與動作之間的資訊可以即時互通，就像人體的神經系統相互連結一樣。因此，智慧機器人能夠將原本分工接力的各項功能整合到中央控制系統，同時進行整體判斷與動作控制。

大型語言模型主要透過大量文字資料進行訓練與文字生成，相較之下，人形機器人能夠使用的訓練資料就少得多。因為機器人需要學習的不只是文字，還包括視覺、觸覺、動作、本體感覺，以及對真實世界的理解，這些都需要大量的多模態資料。因此，要讓機器人成為真正的智慧機器人，真實世界中的多模態資料就非常重要。從影像、觸覺，到物體接觸及本體感覺等資訊，都必須納入學習過程。取得這些資料之後，才能進一步進行模擬試驗，當模擬結果與預期不一致時，再透過校正、驗證及強化學習，不斷調整

機器人的動作與判斷能力，使機器人的表現更加穩健。相較之下，ChatGPT 等大型語言模型可以利用網路上大量的文字資料進行學習，但機器人所需要的實際操作經驗，必須結合真實環境中的資料才能逐步累積。未來，包括 AI 與數位雙胞胎等技術，都是協助機器人學習的重要發展方向。就像電影中的 NS-5 機器人，每天都會連線至中央電腦，透過維琪的 AI 系統更新與學習，使機器人能夠邊使用、邊學習，逐漸變得更加聰明。因此，雖然機器人的學習速度比大型語言模型慢，但經過持續訓練與經驗累積之後，仍然能夠逐步發展成具備感知、判斷及行動能力的智慧機器人。這個過程需要時間，才能逐漸達到預期的發展目標。

目前人形機器人的應用主要從環境較為簡單、工作流程相對固定的結構化工廠開始發展。許多工廠已經開始導入或試用人形機器人，協助執行相關工作。接下來，機器人的應用將逐漸擴展到機械加工、農業、汽車、電子及營造等產業。這些場域的環境相對複雜，屬於半結構化環境，機器人除了執行工作之外，也需要與人類進行互動。這是機器人應用發展的第二個層次，目前相關技術已經逐步進入規劃與設計階段。第三個層次則是最困難的應用環境，也就是機器人必須與人類進行高度互動的非結構化場域。在這些環境中，機器人不僅需要理解周遭環境，還必須看懂人類的行為，判斷人類正在做什麼，以及應該如何做出適當反應。例如，高齡照護、居家服務及旅館服務等領域，都需要機器人具備更高程度的環境理解與人機互動能力。然而，當機器人逐漸進入人類的日常生活，安全性就成為重要課題。

智慧機器人未來發展的基本概念，包括如何將智慧機器人應用於製造業、物流配送及其他經濟產業，協助人類完成各種工作。如何在高齡社會中，透過機器人照顧長者及脆弱族群。以及如何在倉儲環境中協助搬運物品，或是在食品生產與農業領域，提高作業效率，協助農作物採收。此外，在環境監測方面，有些地區地形險峻，人類不容易到達，未來是否能夠利用機器人，就像無人機一樣，協助執行環境監測工作，進一步促進永續發展。

一機多用的照護機器人

過去機器人或機械手臂主要應用於工廠的組裝工作，例如電動車工廠已經開始引進機器人協助組裝。工廠環境中的機器人應用比較容易達成。然而如果要將機器人引進家庭，協助高齡者的日常照護，就面臨另一個層次的挑戰。因為照護機器人需要的不只是感測與判斷能力，還必須具備更複雜的動作協調與控制功能。偏偏隨著高齡社會的來臨，這方面的需求又非常高。日本早稻田大學是機器人研發的重要先驅之一。日本本身也面臨人口高齡化的問題，隨著需要接受照護的長者越來越多，如何結合既有的機器人研發技術與產業基礎，讓機器人真正融入高齡者的日常照護生活，自然成為日本機器人發展的重要方向。高齡照護目前面臨照護人力不足，人口持續老化，需要照顧的長者越來越多，但能夠提供照護服務的人力卻逐漸減少，使照護需求與人力供給之間的落差持續擴大。此外高齡照護經常涉及許多需要體力的工作，例如協助長者翻身、擦澡等。這些工作不僅需要考量人體工學，長期執行也可能造成照護人員的職業傷害。目前市面上已經出現一些專門協助洗澡或翻身的機器人，但大部分仍然只能執行單一工作。這種設計概念其實與工廠生產線相似，因為在汽車組裝等工業環境中，一台機器人只需要把特定工作做好，就能發揮功能。然而，家庭照護的情況完全不同。除了必須面對家中複雜的環境之外，也不可能將家庭改造成工廠生產線。因此，如果一台機器人只能執行一項工作，就很難符合實際照護需求。除了需要考量購置與使用成本之外，當照護工作改變時，機器人也無法靈活應對，甚至可能在操作過程中對人造成傷害。

人類大腦不斷預測下一步可能發生的事情，再根據實際互動的結果進行調整學習最佳應對策略。大腦會根據過去累積的經驗，預測接下來可能發生的情況，再透過實際經驗修正原本的判斷。隨著學習經驗不斷累積，機器人對下一步情況的預測也會越來越準確。在這個過程中，非常重要的概念就是預測與實際觀察之間的誤差。首先，大腦會根據既有經驗，預測下一步可能發生什麼事情。接著，透過多模態感測器蒐集高維度的環境資訊，再比較原本的預測與實際觀察結果是否一致。如果兩者沒有落差，就表示預測正確。如果出現落差，就必須進一步修正原本的判斷。機器人的學習也希望能夠達到與人類相似的效果。例如當人類走下樓梯時，如果原本預期已經走到最後一階，實際上卻

還沒有到底，腳繼續往下踩的瞬間，就可能突然嚇一跳。這種反應其實就是因為大腦原先的預測與實際經驗產生了誤差。經過這次經驗之後，大腦便會重新調整對樓梯高度與階數的判斷，了解實際需要走多遠。下一次再經過相同的樓梯時，就能夠做出更準確的預測，不再因為落差而嚇一跳，也能更順利地完成下樓梯的動作。

照護機器人需要具備一個能夠學習與判斷的大腦，而不只是像工廠裡的組裝機器人，能夠精確地完成單一工作。這個大腦必須具備預測能力，能夠整合視覺、觸覺、本體感覺及環境感知等多模態資訊，預測接下來可能發生的情況。而這種預測能力，主要來自機器人的學習過程與實際操作經驗。然而，當機器人真正進入照護環境時，還必須因應不同個體的需求，提供個人化的照護服務。這就需要透過感測器取得真實環境中的資訊。因為機器人必須整合來自真實物理世界的多模態資料，包括視覺、觸覺及本體感覺等資訊，才能將原本的預測與實際感測結果進行比較，找出其中的誤差並加以修正，使下一次執行任務時能夠有更好的表現。在多模態感測方面，視覺是其中一個重要的資訊來源。例如，目前電動車所使用的電腦視覺技術，已經具備相當良好的辨識能力，但如果要將這類技術應用於日常照護，就必須進一步調整，並結合本體感覺的輸入。只有將視覺與本體感覺等不同資訊整合在一起，才能協助機器人做出更準確的預測，並正確執行照護任務。因此，透過感測器取得資訊，再由機器人的大腦進行判斷，評估預測結果與實際觀察之間的誤差，並持續進行修正，才能讓同一台機器人具備執行多項照護工作的能力，而不再侷限於單一功能。這也是照護機器人智慧化設計的重要目標，希望最終能夠達到「一機多用」，由同一台機器人完成不同的照護任務。

照護機器人在開發初期，研究人員先透過輸入指令的方式，讓機器人學習執行指定的工作。為了完成這兩項照護任務，機器人主要依靠兩種感測資訊，分別是視覺與本體感覺。視覺資訊來自機器人左右兩側的攝影機，而本體感覺則透過關節角度與關節力矩的量測，掌握機器人目前的動作狀態，以及關節所承受的力量，再根據這些資訊預測下一步應該輸出多少力量。這兩種感測資訊必須同時整合，而且都是隨著時間持續變化的動態資料。例如在執行照護任務時，攝影機的視線可能受到遮蔽，無法完整觀察病人的

身體或周遭物體。這時候，機器人就必須利用不完整的視覺資訊，結合本體感覺，預測被遮蔽物體的位置，以及可能需要施加的力量。這就是多模態感測資訊整合的重要性。在早稻田大學的研究設計中，本體感覺包含 28 個維度，而影像資訊則大約有 3 萬多個維度。換句話說，機器人在每一個時間點，都必須同時處理超過 3 萬個維度的資訊，並將這些不同來源的資料整合起來。因此，除了需要適當的 AI 演算法與模型之外，還必須具備一個能夠整合資訊、進行預測的大腦，判斷下一步應該採取什麼動作，以及需要輸出多少力量。透過持續感測、預測與調整，才能逐步完成前面陳教授所介紹的智慧機器人學習與控制過程。

目前這項研究仍處於實驗階段，先利用假人進行測試。假人與真實病人之間仍然存在很大的差異，因為人體是柔軟的，而且每個人的體型、身體大小及需要協助的程度都不相同。即使目前只是利用假人進行測試，機器人仍然需要經過訓練與學習，才能完成照護任務。這個過程涉及機器人大腦的執行控制，以及感覺表徵之間的整合。感覺表徵主要來自前面提到的多模態感測資訊，包括左右兩側攝影機所取得的視覺影像，以及關節角度、關節力矩等本體感覺資訊。機器人的大腦則根據這些資訊進行預測，判斷下一步應該採取什麼動作，以及需要輸出多少力量。在實際執行過程中，機器人必須持續比較預測結果與感測器所取得的真實資訊。例如，當視覺影像受到遮蔽時，機器人就需要結合本體感覺，預測無法直接觀察到的物體狀態及所需施加的力量。當實際感測結果與原先預測不一致時，就會產生預測誤差。因此，這個系統需要透過多模態關聯模組，整合不同感測資訊，建立動作輸出與感測回饋之間的關聯，了解誤差產生的情況，並將相關資訊回饋給大腦進行校正。在這個階層式架構中，多模態關聯模組扮演承上啟下的角色，負責連結上層的執行控制系統與下層的感覺表徵。由於機器人的動作與感測資訊會隨著時間持續變化，因此研究採用循環神經網路（Recurrent Neural Network, RNN），讓系統能夠根據不同時間點的資訊持續更新預測與控制結果。下層的感覺表徵，也就是 Level 1，負責接收機器人手臂等部位的感測資訊。上層的大腦則負責預測並決定下一步應該執行的動作。中間的多模態關聯模組則整合兩者的資訊，將實際執行結果回饋給大

腦，再透過 RNN 持續進行即時修正。簡單來說，就是大腦負責預測，手臂負責執行，再由中間的關聯模組整合感測與動作資訊，判斷預測是否正確，並不斷修正。透過這樣的學習架構，才有機會達到一開始提出的目標，也就是讓一台機器人具備多種照護功能。當機器人建立這套學習機制之後，不僅能夠學習協助病人翻身，也有可能進一步學習擦拭身體等其他照護任務。因此，早稻田大學所開發的機器人，並不是分別為翻身與擦拭編寫兩套獨立的控制程式，而是希望透過以 RNN 為基礎的回饋學習架構，讓同一台機器人能夠學習並完成這兩項不同的照護工作。

這套系統確實已經能夠在假人身上完成協助翻身的任務。研究主要利用三個不同層次的模組進行控制。其中，藍色代表高階執行控制模組，負責預測與決定動作。綠色代表多模態關聯整合模組，位於上層與下層之間，負責整合資訊，並比較預測與實際感測結果之間的誤差。最下層則是感覺表徵模組，包含本體感覺所取得的力量與動作資訊，以及攝影機所取得的視覺影像。從機器人眼睛所看到的視角，可以觀察整個翻身任務的執行過程。機器人辨識假人的初始姿勢，接著逐漸靠近假人，再伸出手臂將假人抬起。由於實驗使用的假人重量固定，機器人可以根據感測與預測結果，逐步調整施加的力量，將假人抬起並完成翻轉，最後維持頭部與腳部的適當位置，完成整個翻身動作。在這個過程中，研究也利用右側攝影機所取得的真實影像，與模型預測的影像進行比較，評估兩者之間的誤差。從實驗結果可以看到，透過這套預測、感測與回饋修正的架構，機器人確實能夠在假人身上完成翻身任務。

如果將電影《機械公敵》中的 2035 年與現實世界的 2026 年進行比較，電影的故事背景設定在 2035 年的芝加哥，當時機器人已經廣泛進入人類社會，目前雖然機器人已經大量應用於工廠，但要真正普及到居家照護或零售服務等場域，仍然有很長的一段距離。在動作能力方面，電影中的機器人已經具備相當靈活的手腳動作，而且移動速度非常快。例如，桑尼甚至能夠飛簷走壁，完成各種高難度的動作。相較之下，2026 年的機器人主要透過強化學習（Reinforcement Learning），先在電腦模擬環境中進行訓練，再逐步提升實際運動能力與訓練效率。雖然目前的技術還無法達到電影中機器人幾乎無所不

能的程度，但相關研究已經逐漸朝這個方向發展，希望未來能夠實現更多複雜的功能。

以上內容將在 **2026 年 11 月 4 日(三) 10:00 am** 以線上直播方式與媒體朋友、全球民眾及專業人士共享。歡迎各位舊雨新知透過星球永續健康網站專頁觀賞直播！

- **星球永續健康網站網頁連結: https://www.realscience.top/7**
- **Youtube 影片連結: https://reurl.cc/o7br93**
- **漢聲廣播電台連結: https://reurl.cc/nojdev**
- **不只是科技：https://reurl.cc/A6EXxZ**

講者：

陳秀熙教授/英國劍橋大學博士、許辰陽醫師、陳立昇教授、嚴明芳教授、林庭瑀博士

聯絡人：

林庭瑀博士　電話: (02)33668033　E-mail:happy82526@gmail.com

劉秋燕　電話: (02)33668033　E-mail: r11847030@ntu.edu.tw