星球永續健康線上直播

智慧機器人(2)

智慧足式機器人研發

2026 年 11 月 11 日

機器人結合人工智慧發展具備感知環境、自主判斷及靈活移動能力。然而要像人類或動物一樣，能夠穩定行走、跨越障礙、上下樓梯，甚至在複雜地形中保持平衡，仍面臨許多技術挑戰。近年來足式機器人的運動能力不斷提升，也為工業巡檢、災害救援及醫療照護帶來新的應用機會。另一方面結合人體動作與智慧控制的外骨骼技術，也逐漸朝向個人化發展，協助改善行動能力與身體功能。本週我們將延續智慧機器人專題，探討足式機器人如何克服穩定行走的挑戰，以及量身打造的個人化智慧外骨骼技術與應用發展。

健康科學新知

搖擺選民助民主黨大勝:「民心向背」

美國拉丁裔與亞裔正成為左右選舉結果的關鍵搖擺選民。兩族群占合格選民比例已達 21%，政治立場較不固定，且更重視物價、就業及住房等經濟議題。2024 年總統大選，拉丁裔與亞裔明顯轉向支持川普（Donald Trump）成為贏得選舉助力，但隨著生活成本上升及強硬移民執法引發不滿，支持傾向再度轉向民主黨。研究顯示，約 34%的拉丁裔及 30%的亞裔具有中間或左右混合政治立場，顯示族群認同已不再是預測政黨支持的可靠依據，也使兩黨必須更加重視中間選民的實際需求。2026 年 11 月 3 日美國期中選舉，民主黨奪回參眾兩院，眾議院得票領先共和黨約 13 個百分點，創 1976 年以來最大勝幅。民主黨不僅在德州、堪薩斯州及部分南方州取得重大勝利，也獲得年輕選民、拉丁裔及部分原先支持川普的選民轉向支持。其中，30 歲以下選民轉向民主黨的幅度達 21 個百分點，18 至 24 歲男性更達 32 個百分點。新加坡亞洲新聞台（CNA）分析指出，民主黨掌控國會後，未來 2 年美國對中國的貿易、科技限制及印太安全政策可能面臨更多政治角力。國會可能加強監督川普的關稅政策、對中國採取更強硬立場，並重新

檢視延宕的 140 億美元對台軍售。然而美國總統職權仍可掌握外交談判、軍事行動與關稅政策的重要主導權，國會未必能根本改變白宮政策。

美國的選舉制度涵蓋總統、聯邦參議院、聯邦眾議院及地方議員等不同層級。總統每四年選舉一次，採選舉人團制度，由各州選舉結果決定選舉人票的歸屬；聯邦參議院共有 100 席，每州兩席，任期六年，每兩年改選約三分之一；聯邦眾議院則依各州人口比例分配席次，共有 435 席，任期兩年，全面改選。這樣的制度設計使參議院與眾議院分別反映各州平等代表權及人口比例代表權，也讓選民能夠定期透過投票表達對政府施政的態度。美國政治長期由民主黨與共和黨主導，但真正可能改變選舉結果的往往是政治立場較不固定的中間選民。這些選民重視物價、交通、醫療、基礎建設及社會福利等民生議題，當生活條件改變時，也可能調整投票選擇。尤其聯邦眾議院每兩年全面改選，對民意變化相當敏感。例如，原本甲方以 510 票領先乙方 490 票，只要 11 位選民轉向，結果就會變成甲方 499 票、乙方 501 票，足以翻轉選舉結果，顯示少數關鍵選民可能對政治局勢產生決定性影響。從歷史角度來看，政治制度的演變也反映人民政治角色的轉變。中國古代從世襲制度、九品中正制到科舉制度，主要著重於統治權的傳承或官員選拔，而非由人民直接選出政治代表。直到近代民主政治逐漸發展，人民才透過選舉產生民意代表，並藉由監督與質詢政府參與政治。

西班牙高鐵再傳重大事故:「信任危機」

西班牙高速鐵路再度發生重大事故。繼今年 1 月 18 日發生高鐵出軌事故，造成 46 人死亡後，10 月 28 日，在距離先前事故地點不遠的托雷多（Toledo）南方，又發生一起列車事故，造成 69 人死亡。兩起事故合計造成 115 人罹難，也讓西班牙交通部長奧斯卡・普恩特（Óscar Puente）請辭，引發民眾對鐵路運輸安全的信任危機。10 月 28 日的事故起因於鐵路號誌系統故障，自動控制系統無法正常運作，因此改由人工調度。然而，行控人員仍下令國營 Renfe 高速列車繼續行駛，結果 17 分鐘後追撞一列停駛中的民營 Iryo 列車，造成重大傷亡。這起事故凸顯人工管制與緊急應變機制的重要性。當自動號誌系統故障、改由人工調度時，相關安全確認程序卻未能確實落實，顯示鐵路運輸

在緊急應變及人員管理方面，仍有待進一步調查與檢討。這起事故也對歐盟帶來警訊。歐盟長期致力於建立跨國整合的鐵路運輸網絡，希望透過統一號誌系統，提升跨境運輸的效率與安全性。然而，由於各國既有鐵路系統不同，加上政治及預算因素，推動進度持續延宕。截至 2024 年底，歐盟統一號誌系統已啟用的路線約 12,400 公里，僅涵蓋約 10%的跨歐洲鐵路網絡。歐盟原訂 2030 年將部署長度擴大至 40,000 公里，而整體規劃的鐵路網絡約為 63,000 公里，目前距離目標仍有相當大的差距。此外，歐盟預算草案甚至擬將相關建設基金較原案削減 14%，使未來的推動面臨更大挑戰。這兩起重大事故不僅暴露西班牙鐵路號誌系統及緊急應變管理的問題，也反映歐盟推動跨國鐵路整合所面臨的困難。接連發生的重大傷亡事故，更加深西班牙民眾對鐵路安全的疑慮。我們希望相關單位能儘速完成調查、釐清事故原因，並改善號誌系統與緊急應變機制，避免類似悲劇再度發生。

歐洲太空科技難以擺脫美國:「太空戰略」

2026 年 10 月，烏克蘭接連遭遇星鏈（Starlink）衛星網路受限及美國飛彈預警情報不足等問題，凸顯歐洲國防安全對美國太空技術的高度依賴。《經濟學人》（The Economist）指出，歐洲目前在衛星通訊、太空情報與飛彈預警，以及火箭發射能力等三大領域仍仰賴美國。在衛星通訊方面，星鏈已擁有超過 1 萬顆衛星，歐洲主要競爭者 OneWeb 卻僅約 600 顆，在通訊容量、終端設備成本及服務規模上均有明顯差距。歐盟雖規劃投入 150 億歐元，建置由 348 顆衛星組成的 IRIS² 通訊系統，但首批衛星預計 2029 年才會發射，短期內仍難以取代星鏈。太空情報與偵察方面，芬蘭新創企業 Iceye 透過低成本小型雷達衛星，提升情報蒐集能力及衛星系統的抗損能力，但飛彈預警仍是歐洲的主要弱點之一。在火箭發射方面，2025 年美國 SpaceX 的 Falcon 9 火箭共發射 165 次，每次商業發射費用約 7,000 萬美元；歐洲亞利安火箭即使獲得政府補助，發射費用仍超過 9,000 萬美元，發射頻率也遠低於美國。為提升自主發射能力，歐洲太空總署（ESA）推動 9 億歐元的發射載具挑戰計畫，並逐步採用固定價格採購模式，鼓勵新創企業參與競爭。歐洲若要降低對美國及馬斯克（Elon Musk）旗下企業的戰略依賴，除了強化自主火箭

發射能力，也必須整合各國衛星通訊需求。目前歐盟、德國、法國及英國分別推動衛星計畫，可能造成重複投資與資源分散，因此有必要透過共同採購、統一技術標準及跨國衛星互通機制，擴大通訊覆蓋範圍並提升系統韌性。

中國-美國 AI 競爭:「緊追在後」

美國人工智慧(AI) 公司 Anthropic 與 OpenAI 近期指控中國 AI 企業利用「蒸餾」（Distillation）技術模仿其模型輸出，涉嫌侵犯智慧財產權，並要求美國政府介入。蒸餾是利用先進 AI 模型產生的回答與推理結果，訓練較小或能力較弱的模型，使其以較低成本快速提升能力。中國 AI 模型目前約落後美國頂尖模型 3 至 6 個月，蒸餾已成為中國彌補先進晶片與運算資源不足的重要方法。Anthropic 曾發現 5 家中國企業在 5 個月內蒐集超過 1.8 億則模型訊息，並透過加強防堵措施，使資料蒐集量減少 90%至 99%。然而，蒸餾也促進低成本 AI 模型發展，增加市場競爭，讓消費者與開發中國家能以更低價格取得先進 AI 技術。社論認為，美國不應僅為保護企業商業利益而全面禁止蒸餾，因為中國模型若持續依賴美國的技術成果，反而可能難以真正超越美國。美國前沿模型開發者必須投入大量資源進行強化學習（Reinforcement Learning），透過反覆嘗試提升推理與解題能力。中國企業雖可藉由蒸餾快速追趕，卻可能因此缺乏自主研發及突破性創新的能力。中國字節跳動（ByteDance）創辦人張一鳴便主張減少對蒸餾的依賴，即使短期犧牲模型競爭力，也要建立自主技術能力。AI 蒸餾也涉及智慧財產權與安全治理的爭議。美國企業擔心中國透過蒸餾取得昂貴的研發成果，甚至推出缺乏安全防護的高性能模型，但社論亦指出美國 AI 企業本身也大量使用網路資料訓練模型，相關智慧財產權界線仍有爭議，全面禁止蒸餾也可能損害市場競爭與消費者利益。

AI 衝擊數學研究與驗證:「審慎求證」

AI 已能在數月內為數百道數學難題提出證明，OpenAI 近期更公開 722 份手稿，涉及 372 個數學問題家族。菲爾茲獎得主陶哲軒（Terence Tao）因此提出「數學 2.0」（Maths 2.0）的概念，認為數學界正從重視率先解題的「證明稀缺」時代，轉向重視理解、解釋及研究洞見的「證明充裕」時代。然而，AI 產生的證明可能需要數學家花費數月才能理

解，也對研究計畫、學術評價制度及年輕數學家的培養帶來挑戰。AI 快速解決數學難題，也引發科學家是否會失去發現新知成就感的討論。數學家史蒂芬·斯托蓋茲（Steven Strogatz）擔憂，AI 可能減少年輕研究者投入學術的意願。不過，陶哲軒等學者認為，完成證明並不代表研究結束，理解研究成果、整理知識及提出新問題同樣重要。正如 AlphaFold 加速蛋白質結構預測後，研究者仍能探索藥物開發及生理機制，數學研究也可能從追求解題速度，轉向更深入的理解與應用。然而，AI 生成證明的可靠性仍有疑慮。目前科技公司利用 Lean 證明輔助系統，將 AI 生成的自然語言證明轉換為形式化程式碼，再由電腦驗證邏輯。但 Lean 只能檢查程式碼，無法確認轉寫內容是否忠實反映原始命題。研究人員檢查 OpenAI 一份長達 180 頁的證明時，僅審查其中 2 頁，就發現 2 處命題遭到弱化。此外，Lean 本身也曾出現漏洞，AI 可能利用系統缺陷取得錯誤認證。因此，AI 雖能加速數學研究，但電腦認證不代表證明絕對正確。未來數學家仍須重視研究成果的理解與解釋，並負責驗證證明的有效性，維持對 AI 系統的監督與判斷。

業餘者用 AI 破解歷史密碼:「方興未艾」

AI 正協助破解塵封數十年甚至數百年的歷史密碼，讓缺乏密碼學背景的一般人也能參與解碼。2026 年 9 月，彭博公司（Bloomberg）員工 Carter Leffen 利用 OpenAI 的 GPT-6 Astra 模型，成功破解一封 1941 年 7 月 10 日發送、長達 85 年未解的德軍恩尼格瑪（Enigma）加密訊息。AI 自行編寫程式模擬密碼機，在 10 小時內測試超過 40 億組設定，最終還原 82 個字元的密文，並獲得密碼學家確認。數天後，資安工程師 Carter Church 也利用同一模型，透過圖片辨識、歷史金鑰搜尋及模擬退火法（Simulated Annealing），在約 6 小時內破解一封 1809 年寄給拿破崙（Napoleon）麾下將領的軍事密信，成功還原部隊位置資訊。這些案例顯示，大型語言模型（LLMs）不僅能辨識歷史文件中的加密符號，還能整合既有密碼學知識、自動編寫解碼程式，並透過大量運算尋找正確金鑰，大幅降低歷史密碼破解的技術門檻與時間成本。過去需要專業研究者長時間操作的工作，如今一般使用者也能透過 AI 完成部分解碼程序。然而，AI 的成功仍高度依賴既有研究成果，例如恩尼格瑪密碼已有成熟的破解演算法與歷史資料，而缺乏語

言紀錄或相關研究的罕見密碼，仍然難以破解。不過，密碼學專家提醒，AI 可能產生看似合理、實際卻錯誤的解碼結果，也就是所謂的「幻覺」（Hallucination），因此不能僅憑文字通順就認定破解成功。近期大量業餘愛好者提交 AI 解碼成果，也增加專家的查證負擔。專家建議，解碼結果必須符合歷史背景，並經過密碼學家或歷史學者驗證。

智慧助手洩漏研究構想:「權衡利弊」

隨著 AI 廣泛應用於科學研究，研究人員將未發表的論文、數學證明及實驗資料交給 AI 處理，可能面臨資訊外洩與研究成果歸屬的風險。2026 年 9 月，OpenAI 與 Anthropic 相繼宣布在數學及生物學領域取得突破，部分研究人員質疑，相關成果可能與他們先前使用 AI 工具處理的未公開研究有關。OpenAI 表示，內部調查已排除使用者資料影響研究成果的可能；Anthropic 則強調，相關模型並未使用使用者對話進行訓練。雖然目前沒有證據證實兩家公司挪用研究成果，但事件仍引發學術界對研究隱私與智慧財產權的疑慮。專家指出，研究資訊外洩不僅可能發生於模型訓練，也可能來自對話紀錄的彙整分析（Aggregate Analysis）。AI 公司可透過分析大量使用者的提問內容與頻率，掌握特定領域的研究方向，甚至推測科學難題是否接近突破。即使資料經過匿名化，冷門研究仍可能因特殊的提問模式而暴露研究線索。此外，模型可能記住部分訓練資料，而關閉訓練設定也不代表對話不會被保存或使用。為降低風險，專家建議研究人員優先使用學校簽約的企業帳號，確認合約是否禁止將研究對話用於模型訓練及其他分析用途。若使用個人帳號，應關閉資料訓練設定，並留意回饋紀錄與安全審查的例外條款。研究結束後，可保存必要紀錄並考慮刪除平台資料，但已納入模型訓練的資訊不會因此消失。對於高度敏感的研究，則可在自有設備部署開放權重模型（Open-weight Model），避免資料傳送至外部平台或改以傳統方法進行研究。

發光觸控纖維織成衣袖螢幕:「穿戴科技」

未來的衣服不僅能穿在身上，還可能像智慧型手機一樣顯示影像、感應觸控，甚至執行簡單運算。研究團隊開發出結合發光晶片與觸控感測功能的智慧纖維，將電子元件直接整合進纖維內部，再編織成可互動的衣袖螢幕。不同於過去將電子面板附著在布料

表面的方式，這項技術採用由下而上（Bottom-up）的製程，讓布料保有柔軟、彈性與透氣特性，同時具備顯示與感測功能。研究人員利用精密焊接及加熱拉伸技術，製造出最長 10 公尺、直徑約 1 毫米的纖維，使單條纖維便能辨識觸碰位置並控制發光晶片。研究團隊進一步將 54 條纖維編織成顯示螢幕，每條纖維包含 96 顆可獨立控制的發光晶片，能播放影片、顯示文字與圖案，並支援多點觸控。結合麥克風、揚聲器、溫度及光線感測器等多模態纖維後，衣袖還能播放影音、無線交換資料及執行簡單運算，甚至可作為計算機使用。實驗顯示，智慧衣袖仍保有一般布料的透氣與伸縮特性，經過 50 次溫和機洗及 1,000 次彎折後，功能依然正常，展現一定的耐用性。不過，這項技術目前仍處於原型階段，互動功能相對簡單，控制電路與電池也尚未完全整合進衣物，仍須依賴外部設備。未來若能與現有織造、針織及刺繡製程結合，並進一步開發利用體熱或身體動作供電的柔性纖維，便有機會製造各種形狀與尺寸的智慧電子布料。這項研究顯示，電子裝置不再只能依賴傳統硬式螢幕，未來日常衣物也可能成為兼具顯示、感測與運算功能的互動介面。

足式機器人智慧穩步前行挑戰

電影《極樂世界》描述 2154 年的未來社會，當時地球因人口過剩及環境嚴重污染，已不適合人類舒適地生活。富裕階層因此在地球上方建立一座大型太空站「極樂世界」，裡面擁有清新的空氣、優美的環境及先進的醫療設備。居民只要躺進高科技醫療床，機器便能自動掃描、診斷並治療疾病。然而，經濟條件較差的人只能留在地球，從事機器人製造、物資運送等工作，維持太空站的運作。由於地球醫療資源不足，許多居民希望透過偷渡進入極樂世界，獲得更好的生活與醫療照護。電影中，一名嚴重骨折的小女孩便透過偽造身分編碼，成功使用太空站的醫療設備，雖然最後遭到遣返，但疾病已獲得治療，顯示未來醫療科技雖然進步，卻仍受到社會階級與身分制度的限制。主角馬克思曾因犯罪留下紀錄，在假釋期間受到警察機器人及智慧系統的嚴格監控。機器人假釋官透過演算法分析他的犯罪紀錄與行為，判定其再犯機率高達 78.3%，反映未來人工智慧可能被應用於司法與犯罪風險評估。然而，這類系統也可能因過度依賴數據與演算法，

而忽略個人的實際處境及改過自新的機會。後來，馬克思在機器人工廠找到工作，卻因設備故障，在主管要求下進入爐室處理問題，意外暴露於高劑量輻射。醫療機器人掃描後判定他只剩五天生命，卻無法提供有效治療，只給予維持身體基本功能的藥物。為了活下去，馬克思決定前往極樂世界，尋求高科技醫療設備的協助。馬克思找上地下組織尋求偷渡機會，但對方要求他先取得極樂世界智慧系統的重開機程式。為了完成任務，地下組織替他安裝一套能與人體神經系統連結的外骨骼裝置，藉此增強肌肉力量、提升活動能力，並進行神經資料傳輸。馬克思透過神經連結技術，將儲存在阿瑪代公司執行長卡萊爾大腦中的程式下載至自己腦中。過程中，他遇見青梅竹馬費芮，得知費芮的女兒瑪蒂達罹患末期白血病，由於地球醫院無法提供有效治療，只能依靠極樂世界的醫療床才有機會康復。因此，馬克思逐漸從原本只想拯救自己的生命，轉變為希望讓更多無法取得醫療資源的人獲得治療。最後，馬克思成功進入極樂世界的智慧中樞，利用取得的程式重新啟動並改寫身分辨識系統，使所有地球居民都被認定為合法公民，得以使用原本僅提供給太空站居民的醫療設備。雖然馬克思最終犧牲生命，但系統改寫成功後，醫療飛艇開始前往地球，為缺乏醫療資源的居民提供治療。

機器人與外骨骼雖然屬於不同發展方向，但在技術上具有許多共同之處。人類之所以能夠靈活活動，是因為大腦、神經系統、肌肉與骨骼之間能夠相互協調。機器人若要模仿人類的動作，同樣必須具備相對應的感測器、控制系統、致動器及機械結構，而外骨骼也需要這些功能，才能與人體動作相互配合。過去在電影中經常出現輪式機器人，也就是利用輪子進行移動的機器人。然而，輪式機器人一旦遇到樓梯、障礙物或複雜地形，便容易受到限制，這也是足式機器人逐漸受到重視的重要原因。

相較於輪式機器人，足式機器人能夠跨越障礙、攀爬樓梯，並適應不同地形。例如，目前已有足式機器人能夠攀爬工廠樓梯進行巡檢，也能進入地下洞穴執行探勘任務。這些工作過去往往需要投入大量人力，甚至必須讓人員進入危險環境，而透過足式機器人執行相關任務，便有機會降低人員暴露於危險環境的風險。此外，足式機器人透過主動懸吊與動態穩定系統，能夠在相對有限的空間內運作，並適應不平坦的地面。與無人機

相比，足式機器人也具有不同的優勢。無人機需要持續消耗能量以維持飛行，且通常受到載重能力與續航時間的限制。相較之下，足式機器人可以在地面長時間運作，背負較重的物品，甚至能夠在移動的同時操作物體。另外，人類生活的環境，包括樓梯、走道、門檻及各種工作空間，大多是依照人類或其他足式生物的活動方式設計，因此足式機器人在這些環境中，也較容易與人類共同工作。

隨著足式機器人技術不斷進步，人形機器人的發展也逐漸受到重視。足式機器人雖然能夠行走、跨越障礙及適應複雜地形，但如果只有四隻腳，缺乏像人類一樣靈活的手臂與手掌，就較難完成拿取物品、搬運及其他精細操作。由於人類生活與工作的環境原本就是依照人體結構設計，因此人形機器人若能模仿人類的行走與操作能力，就有機會直接進入這些環境執行工作。例如，在物流、製造業及餐旅服務等領域，人形機器人可以協助搬運物品、執行簡單的組裝工作或提供送餐服務；在醫療照護方面，則有機會協助病人移動、搬運物品及運送藥物。然而，人形機器人要真正普及，仍然面臨許多阻礙。首先是價格昂貴，根據相關研究，2024 年人形機器人的平均售價最高可達 20 萬美元，對一般家庭或中小型機構而言，是相當大的經濟負擔。其次是耗能高、續航時間短。人形機器人需要同時控制多個關節與馬達，才能維持身體平衡並完成動作，因此必須消耗大量能源。此外，安全性也是重要問題，尤其在人類居住的環境中，一旦機器人因控制失誤而發生碰撞或跌倒，就可能造成傷害。第三個問題是訓練資料不足。人形機器人需要大量高品質的真實世界資料（Real-World Data, RWD），才能學習如何在不同環境中完成任務。另一個值得注意的現象是，人形機器人的外觀容易讓人高估其實際能力。由於外型與人類相似，容易使人認為它能夠像人類一樣靈活工作，但實際上，目前許多動作仍然受到限制。因此，人形機器人並非萬能。對於搬運、重複組裝等特定工作，其他型態的機器人有時反而更有效率。

足式機器人的研究從 1970 年代就已發展，早期主要依靠人工建立數學模型，讓機器人維持靜態平衡，接著逐漸發展到動態控制及全身運動控制。最早的機器人必須依照工程師事先設計的規則移動，包括計算每個關節的位置、馬達所需的力量，以及維持身

體平衡的方法。到了 2000 年代，人形機器人的研究開始快速增加，控制技術也持續進步，而近十年來，四足機器人的研究更是明顯成長。其中一項重要的轉變，就是控制方法逐漸從人工建模轉向 AI 與強化學習。過去必須事先設定機器人的每個動作，但隨著強化學習技術的發展，機器人可以透過反覆練習，逐漸找出更好的運動策略。這與先前介紹的 AlphaGo 具有相似概念。AlphaGo 透過大量訓練與強化學習，逐步改善決策能力；足式機器人則利用類似的方法，學習如何行走、保持平衡及適應不同地形。除了 AI，機器人也必須具備良好的硬體設備。例如，致動器的功能類似人體肌肉，能夠產生力量並帶動關節活動。此外，機器人還需要不同層級的控制系統，包括負責快速調整馬達與關節動作的底層控制，以及負責運動規劃與自主導航的高階控制。透過這些系統相互配合，足式機器人逐漸從早期只能維持簡單平衡，發展到能夠快速移動、跨越障礙及執行複雜動作。

目前足式機器人發展利用強化學習讓機器人在電腦模擬環境中反覆練習。機器人首先會觀測目前的狀態，包括身體位置、關節角度、移動速度及周圍地形等資訊，這些就是強化學習中的狀態（state）。接著，AI 根據目前的狀態，透過控制策略（policy）決定下一個動作（action），例如哪一隻腳應該向前移動、馬達需要產生多少力矩，以及如何維持身體平衡。當機器人執行動作後，系統便會根據結果給予獎勵（reward）。如果機器人成功向前行走、保持平衡或跨越障礙，就能獲得較高的獎勵；反之，如果跌倒、失去平衡或無法完成任務，獎勵就會降低。透過反覆練習，機器人便能逐漸改善控制策略。更重要的是，這些訓練不一定需要在真實世界中進行，而是可以先透過電腦模擬環境累積數千小時的經驗。在模擬過程中，可以持續改變地形、摩擦力、機器人重量及其他環境參數，讓機器人學習如何應對不同情況。待訓練完成後，再透過準確的致動器模型，將學習到的控制策略移植到真實機器人上。這就是所謂的從模擬到真實（Sim-to-Real）的強化學習。

雖然強化學習大幅推動了足式機器人的發展，但隨著機器人逐漸朝向人形機器人，或需要執行更複雜的特定任務時，便面臨真實世界資料不足挑戰。大型語言模型之所以

能夠快速發展，其中一個重要原因，就是可以利用大量文字、影像與影片資料進行訓練。然而，當機器人需要學習特定任務時，情況便有所不同。例如，機器人要學習在工廠搬運物品、於複雜地形行走，或協助病人完成特定動作，都需要相對應的真實世界資料。從資料金字塔來看，最底層是大量的網路規模資料與模擬資料，這些資料數量較多，取得成本也相對較低。往上則是人類或動物的動作模仿資料，以及特定任務的真實世界資料，隨著資料的專一性提高，取得成本也逐漸增加。最上層則是機器人在真實環境中執行任務、接受評估，以及進行線上學習與適應所產生的資料。這類資料最接近實際應用，但數量也最少。因此，機器人發展的一項重要挑戰，就是如何建立資料的正向循環。所謂正向循環，是先將機器人部署到真實環境中，透過實際操作蒐集資料，包括成功完成任務的經驗與失敗案例，再利用這些資料改善模型，使其能夠處理更多任務與不同形式的資訊。模型改善後，進一步優化模擬環境與基礎設施，再重新部署至真實世界。這樣便形成一個資料飛輪（Data Flywheel），使資料的品質與數量持續提升，模型也能不斷進步。然而，如果缺乏足夠的真實世界資料，就難以建立這樣的回饋機制。即使目前可以利用圖形處理器（GPU）加速模型訓練，並在模擬環境中產生大量不同的訓練情境，仍然會面臨模擬與真實環境之間的落差。因為真實世界的地形、環境條件及各種不確定因素，往往比電腦模擬更加複雜。如果無法利用真實資料持續校正模型，模擬訓練的效果就可能受到限制。因此，未來機器人的發展不僅需要更好的 AI 模型，更重要的是如何取得高品質的真實世界資料，並建立持續學習與改善的機制。

模擬資料究竟能否取代真實世界資料？模擬資料的優點是成本較低且相對安全。例如，機器人可以在電腦模擬環境中反覆練習行走，即使跌倒，也不會造成設備損壞或人員受傷。然而，模擬環境與真實世界之間仍可能存在落差。相較之下，真實世界資料雖然較為準確，蒐集成本卻相對較高，而且可能存在地域差異。例如，利用中國資料訓練的醫療 AI 模型，應用於歐盟時，可能因人口特徵、醫療環境及資料分布不同，而需要重新校準。機器人也面臨相同問題，即使在特定環境中完成訓練，轉移至其他地形或環境時，仍可能無法維持原有表現。因此，較可行的方法是利用真實世界資料校準模擬環

境，再結合兩者建立混合式訓練策略。這也與研究團隊目前發展的數位雙胞胎（Digital Twin）概念有關，透過建立接近真實世界的模擬環境，並持續利用實際資料校正，以提升模型的準確性。

由於人形機器人的真實世界資料相當有限，因此透過其他與機器人技術相關的裝置，協助建立資料並訓練模型為可能解決方案。其中外骨骼就是一個值得注意的發展方向。從足式機器人、機器狗到人形機器人，都需要學習如何控制關節、維持平衡，以及在不同環境中完成動作。這些技術與外骨骼具有高度關聯性，因為外骨骼同樣需要透過感測器、控制系統與致動器，協助人體完成動作。對於足式機器人，可以先在電腦模擬環境中累積數千小時的訓練經驗，再將學習到的控制策略移植到真實機器人上。同樣的概念也可以應用於穿戴式外骨骼，先透過大量模擬訓練建立控制策略，待技術成熟後再應用於實際穿戴裝置，以減少反覆調整所需的時間。如果進一步將外骨骼應用於中風患者，則必須考慮個別患者的步態差異。由於中風患者的行走能力、肌肉力量及步態特徵各不相同，因此不能僅依靠一套固定的控制規則，而是需要讓外骨骼在實際使用過程中持續學習與調整。換句話說，就是先在模擬環境中進行大量訓練，再利用少量真實世界資料進行微調，使外骨骼逐漸適應不同使用者的需求。這也是接下來將介紹的智慧外骨骼技術。

外骨骼是穿戴在人體外部「機器肌肉」。先前介紹機器人時曾提到，機器人要能夠移動，就需要致動器（Actuator）。致動器的功能類似人體肌肉，能夠產生力量並帶動關節活動。外骨骼也是利用相同原理，將致動器安裝在人體外部，協助完成原本需要肌肉出力的動作。例如，這套髖關節外骨骼，就是將馬達安裝在髖關節旁邊，協助大腿向前或向後擺動。整套裝置重量約為 4.5 公斤，外型類似一條科技腰帶，可以直接穿戴在身上，而且不需要連接外部電線，因此也能在戶外使用。此外，兩側大腿各配備一個感測器，可以隨時偵測大腿的動作。當使用者開始移動時，感測器便會蒐集相關資訊，再由控制系統根據這些資料，判斷何時啟動馬達，以及需要提供多少輔助力量。這與機器人的控制原理相當類似。機器人需要透過感測器掌握目前的狀態，再由控制系統決定動作；

外骨骼則透過感測器偵測人體動作，進而提供適當的輔助力量。因此，外骨骼的主要目標，就是協助使用者在行走、跑步及爬樓梯時減少肌肉負擔，使動作更加省力。

外骨骼並非近年才出現的技術，日本等國家很早就開始研究穿戴式外骨骼，希望透過機械輔助改善人體的活動能力。然而，在 AI 與機器人控制技術尚未成熟之前，外骨骼面臨的一項重要問題，就是每位使用者都需要耗費相當長的時間進行個人化調整。例如，使用者第一次穿戴外骨骼必須先在實驗室進行試穿，由研究人員測量其動作，再逐步調整馬達的控制參數，整個過程可能需要 24 至 64 分鐘。如果要將外骨骼帶到戶外使用，還可能需要額外花費約 60 分鐘重新調整。此外，行走、跑步及爬樓梯屬於不同的動作，每一種動作都可能需要另外設計控制規則。當使用者從行走轉換為跑步，或開始爬樓梯時，研究人員可能就必須重新調整控制程式。這個過程不僅耗費時間，也需要專業人員協助，甚至必須使用昂貴的代謝量測設備，才能判斷外骨骼是否真正減輕使用者的身體負擔。因此，過去的外骨骼雖然已經具備一定的輔助能力，但由於個人化調整程序繁複、成本較高，也限制了這項技術的普及。

隨著 AI 與機器人模擬技術的發展，外骨骼的訓練方式也逐漸改變。目前可以先在電腦中建立虛擬人體模型，讓 AI 在模擬環境中學習如何控制人體動作與外骨骼。雖然現階段仍無法完整模擬人體所有的關節與肌肉，但已經可以建立包含 50 個關節活動方向及 208 條肌肉的虛擬人體模型。模型不僅能夠模擬不同關節的活動，也能模擬肌肉在動作過程中需要產生的力量。接著，再將外骨骼裝置納入電腦模擬環境，讓虛擬人穿戴外骨骼進行訓練。類似電影《阿凡達》所呈現的情境，在電腦中建立一個能夠模仿人體動作的虛擬身體。這種訓練方式最大的優點，就是虛擬人即使跌倒一百萬次，也不會真正受傷。因此，可以讓 AI 在模擬環境中反覆練習，持續調整控制策略，找出較佳的輔助方式，而不需要讓真人承擔反覆試驗的風險。

在電腦中建立虛擬人體模型後，接下來就是讓虛擬人學習如何行走、跑步及爬樓梯。這個過程可以想像成由三個 AI 系統共同協作。第一個是「動作教練」，負責讓虛擬人模仿真人的動作，包括行走、跑步及爬樓梯，使虛擬人的關節活動與身體姿勢盡可能接近

真實人體。第二個是「肌肉指揮家」。由於虛擬人體模型包含 208 條肌肉，因此每當虛擬人執行動作時，都必須決定不同肌肉需要產生多少力量。肌肉指揮家的工作，就是協調各條肌肉的出力，使虛擬人能夠順利完成動作。第三個是「外骨骼助手」，負責觀察大腿的動作，並判斷外骨骼應該在何時提供輔助，以及需要提供多少力量。這三個系統會在電腦模擬環境中共同訓練，讓虛擬人學習完成各種動作，同時使外骨骼掌握適當的輔助方式。訓練完成後，真正需要安裝到實際外骨骼裝置上的，就是已經學習完成的「外骨骼助手」。

AI 學習控制外骨骼過程類似電玩遊戲計分機制，表現越好，就能獲得越高的分數。透過強化學習，可以讓外骨骼在模擬環境中反覆嘗試不同的控制方式，再根據執行結果給予獎勵。整個訓練過程主要考慮四個目標。首先是減輕人體肌肉的負擔。由於外骨骼的主要功能是協助人體出力，因此當外骨骼提供適當的輔助力量時，人體肌肉所需產生的力量便能減少。研究人員可以透過模擬環境中的肌肉出力，估算人體完成動作時所需付出的力量。第二個目標是降低外骨骼本身的能源消耗。雖然外骨骼能夠提供輔助，但馬達運作同樣需要消耗能源，因此必須避免在不必要的時候出力，而是在適當的時間提供適當的輔助力量。第三個目標是提升動作的順暢度。如果外骨骼提供的輔助力量忽大忽小，或是施力時機不正確，就可能使使用者感到動作不自然，甚至出現卡住的情況。因此，外骨骼必須學習配合人體動作，使整個行走過程更加平順。最後一個重要目標是維持身體平衡，避免跌倒。無論外骨骼能夠提供多少輔助力量，如果無法維持身體平衡，就難以安全使用。因此，整個強化學習過程，就是讓外骨骼同時考慮肌肉負擔、能源消耗、動作順暢度及身體平衡，逐漸找出較佳的控制策略。

當外骨骼在電腦模擬環境中完成訓練後，接下來就是將學習到的控制策略應用於真實世界。然而，電腦模擬與真實人體之間仍然存在差異。第一個原則是 AI 只能依據真實世界中能夠量測的資料進行決策。例如，在電腦模擬環境中，可以掌握每一條肌肉所產生的力量，但在真實世界中，外骨骼無法直接量測所有肌肉的力量。因此，外骨骼助手在訓練時，就必須主要依靠大腿感測器能夠取得的資訊來判斷動作。至於肌肉力量等

在模擬環境中可以取得、但實際裝置無法直接量測的資訊，則只能用於輔助訓練，不能成為外骨骼實際運作時必須依賴的資料。第二個原則是先前介紹的三個 AI 必須與虛擬角色共同訓練。也就是說，不能只讓外骨骼助手學習如何提供輔助力量，還必須確認虛擬人能夠順利完成動作，並維持身體平衡、避免跌倒。只有當整個系統都能正常運作時，外骨骼助手才能獲得較高的獎勵。第三個原則是在每一回合訓練中隨機改變條件，例如調整機器重量、關節摩擦力及虛擬人體的肌肉力量。這就像運動員在不同天氣與場地條件下反覆練習，讓 AI 不會只適應某一種固定環境，而是能夠應對不同情況。

透過 AI 訓練方式，可以大幅提升外骨骼的開發效率。研究顯示，只需要使用遊戲用顯示卡，經過約 8 小時的電腦訓練，就能完成外骨骼控制策略的模擬訓練。訓練過程不需要進行人體實驗，也不必讓使用者反覆穿戴外骨骼，接受長時間的參數調整。當 AI 在模擬環境中完成訓練後，就可以將學習到的控制策略直接安裝到實際的外骨骼裝置上，不需要像過去一樣，為每位使用者重新設計控制規則，也能減少繁複的個人化調整程序。這是現代 AI 與機器人技術結合後所帶來的一項重要進步。從足式機器人、四足機器人到人形機器人及穿戴式外骨骼，雖然外觀與應用目的不同，但在感測、控制、強化學習，以及從模擬到真實世界的技術上，都具有密切的關聯。足式機器人與外骨骼可以視為 AI 與機器人技術相互結合、持續發展的不同應用方向。

量身打造個人化智慧外骨骼

目前機器人發展最需要的就是真實世界資料。如果能結合模擬情境與數位雙胞胎技術，在電腦中建立類似《阿凡達》的虛擬人體模型，再搭配外骨骼技術，就有機會應用於日常生活，特別是中風患者的步態輔助。然而，外骨骼要真正進入醫療領域，仍面臨許多挑戰，其中最重要的就是輔助時機與輔助力量的個人差異。人體行走包含不同的步態相位，正常人的各個動作能相互協調，維持流暢步態；但中風患者可能因單側肌肉無力或關節協調能力受損，導致步態不順暢。因此，外骨骼必須根據使用者的步態相位，在適當時間提供力量，並依照身體特徵、肌肉力量及行走速度調整輔助程度。先前曾介紹日本機場利用外骨骼協助工作人員搬運物品，減少肌肉骨骼負擔。這類裝置大多採用

以年輕、健康受試者資料建立的通用模型，適合一般工作環境，卻未必適用於中風患者。由於中風患者的患側活動範圍較小，雙腳動作也可能不對稱，因此醫療用外骨骼必須具備能即時調整的個人化模型。為了解決這些問題，外骨骼需要結合自適應學習（Adaptive Learning）與回饋控制。傳統外骨骼由工程師預先設定馬達啟動時機與輸出力量，但不同使用者的步態各異，即使同一個人，也可能因速度、疲勞或環境改變而產生不同動作。因此，智慧外骨骼必須持續感測人體動作，並即時更新控制模型。這套系統利用慣性感測器（Inertial Measurement Unit, IMU）偵測大腿動作與姿態，辨識雙腳向前擺動、接觸地面及支撐身體等步態相位，再根據個人需求調整馬達輸出。其核心技術就是結合即時感測、步態相位預測、個人化助力控制與自適應學習。

研究團隊開發的智慧外骨骼穿戴於腰部與大腿，包含腰部護具、控制背包、髖關節致動器、編碼器、慣性感測器、碳纖維框架及急停按鈕。整套裝置重約 4.5 公斤，可輔助雙側髖關節屈曲與伸展。致動器的峰值力矩為 18 牛頓米（N·m），約相當於人體髖關節峰值力矩的 40%。感測系統每秒讀取 200 次資料，並同步更新馬達力矩指令，使外骨骼能在行走過程中即時提供輔助。控制系統主要分為即時推論模組與即時適應模組。即時推論模組利用卷積神經網路（Convolutional Neural Network, CNN）分析感測資料，以 200 Hz 的頻率持續預測步態相位。即時適應模組則將最新資料存入資料佇列，透過標記器產生訓練標籤，每 5 秒更新一次模型，頻率為 0.2 Hz。兩個模組平行運作，讓外骨骼在持續提供輔助的同時，也能利用新的步態資料改善預測準確度。研究團隊最初使用 10 位健康受試者的資料進行離線訓練，建立基礎模型。當新使用者穿戴裝置後，系統便能透過實際步態資料進行線上適應，不必重新蒐集大量人工標記真實資料。

外骨骼的輔助力量必須隨步態相位改變。人體行走時，髖關節持續屈曲與伸展，不同階段所需的力矩也不同。因此，研究團隊利用力矩曲線，設定輔助力量的起始、結束時間及峰值位置。整個控制系統分為三個層級：高層控制負責估計步態相位，中層控制根據步態相位產生輔助力矩指令，低層控制則讓馬達追蹤指令並輸出力量。由於中風患者的健側與患側步態不同，雙腳必須分別感測與控制，才能提供適當輔助。步態相位預

測的準確度尤其重要。一個完整步態週期可表示為 0%至 100%。假設中風患者的步態週期為 2 秒，8%的預測誤差就相當於 160 毫秒。如果患者準備抬腳時，外骨骼延遲 160 毫秒才提供力量，就可能造成抬腳高度不足，碰到地面磁磚或門檻，甚至增加跌倒風險。因此，精準掌握輔助時機，比單純增加馬達力量更重要。

除了自適應學習，自適應外骨骼也導入跨裝置遷移學習（Transfer Learning）。當使用者更換外骨骼時，如果每次都必須重新蒐集資料、訓練模型，將增加使用者與研究人員的負擔。因此，研究團隊利用轉換矩陣，調整新舊裝置之間的感測器資料，使原本訓練完成的個人化步態模型能繼續使用。研究顯示只需要 10 步未經人工標記的真實步行資料，就能完成感測器轉換學習。轉換後的步態相位預測誤差約為 2.65%，較未轉換時降低 76.8%，顯示個人化模型可以在不同外骨骼裝置之間轉移，不必重新進行完整訓練。

另一項研究目標是降低使用者行走時的能量消耗。過去評估外骨骼是否省力，通常需要受試者在實驗室穿戴代謝面罩，量測能量消耗。然而，這種方法難以直接應用於日常生活。因此，研究團隊利用真實步行資料與自適應學習，建立個人化最佳化方法。研究首先讓外骨骼完成步態相位的自適應學習，再固定模型，調整雙腳髖關節屈曲與伸展的輔助時機。受試者使用可依步速調整的跑步機，每組參數測試 1 分鐘，取最後 15 秒的平均自選步行速度作為評估指標。接著，透過貝氏最佳化（Bayesian Optimization）及高斯過程模型，決定下一組測試參數，總共進行 24 次測試，找出能提高步行速度的輔助方式。

完成個人化模型與輔助參數最佳化後，研究團隊設計三種情境進行驗證。第一種是健康受試者的正常步態，讓 8 位健康受試者穿戴髖關節外骨骼，在跑步機上以每秒 1.2 公尺的速度行走，評估系統適應新使用者的能力。第二種是不對稱步態，讓 3 位健康受試者使用雙帶跑步機，左右跑帶分別設定為每秒 0.8 公尺及 1.6 公尺，模擬中風患者可能出現的雙腳步態差異，觀察外骨骼能否分別辨識與控制。第三種是中風患者的實際步行測試，納入 6 位中風患者，在安全吊帶及扶手保護下，以個人自選步行速度的 80%進行測試，評估系統能否適應健側與患側不同的步態特徵。

研究結果顯示，健康受試者穿戴外骨骼後，模型只需約 15 秒、3 次自適應更新，就能使步態相位預測誤差降低 40.9%，降至約 1.8%。另一項驗證試驗中，預測誤差降低 31.8%，實際輔助力矩誤差也降低 32.7%，顯示系統不需要長時間重新訓練，就能透過短時間的步行資料改善預測準確性與輔助時機。對中風患者而言，個人化學習的效果更加明顯。由於患者雙腳的肌力與動作控制能力不同，通用模型容易產生較大誤差。研究發現，患側步態相位誤差從 10.5%降至 2.9%，降低 69.6%；健側則降至 2.2%，降低 62.2%。以 2 秒的步態週期計算，約可減少 160 毫秒的輔助時機偏差，有助於提升步行時的動作協調與輔助準確性。在戶外實境測試中，自適應模型仍維持良好的預測能力，使中風患者患側的步態相位誤差降低 70.4%，顯示系統能根據真實步行資料持續調整。這項研究證明，結合 AI 與自適應學習的智慧外骨骼，能提供更精準且個人化的步態輔助，具有應用於中風復健及日常行走輔助的潛力。同時，透過持續累積真實世界的動作資料，也有助於未來足式機器人、人形機器人及智慧外骨骼技術的發展。

以上內容將在 **2026 年 11 月 11 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