

穿戴式外骨骼技術之發展現況 與腰部助力應用

國立中興大學機械工程學系 李聯旺 教授
國立中興大學機械工程學系 盧亮宇 博士生

前言

穿戴式外骨骼技術 (wearable exoskeleton) 結合了機械工程、生物力學與智慧控制，是近年來人機互動領域的重要突破。隨著全球人口高齡化與勞動力短缺問題日益嚴峻，這項技術已逐步轉化為解決醫療復健、國防增強及工業輔助等關鍵問題的實際應用。

儘管自動化設備在現代產業中已相當普及，但在物流轉運、建築施工等場域，仍存在大量無法被機器完全取代的手工作業 (Hsiang et al., 1997)。勞動者長期從事這類搬運工作，極易引發「工作相關骨骼肌肉傷害」(work-related musculoskeletal disorders, WMSDs)，這些傷害主要集中在頸肩與腰部區域 (Dos Anjos et al., 2022)。根據全球疾病負擔數據顯示，全球約有 17.1 億人受骨骼肌肉疾病所苦 (Cieza et al., 2020)。其中，因長時間負重與搬運引起的「下背痛」(low back pain, LBP) 最為常見 (So et al., 2022)。多數人在一生中都會經歷下背痛，其發病率隨年齡增長，在 30 歲左右達到高峰，

整體患病率介於 4% – 69% 之間 (Ganasegeran et al., 2014)。這類疲勞性損傷不僅嚴重影響勞工的生活品質，更對生產與運輸效率造成負面的影響 (Valentina et al., 2018)。

現代的外骨骼技術是一種人機一體化的設備，它將人的智慧與外部機械結合，為穿戴者提供助力、保護與協同動作 (Nazari et al., 2023)。其理想目標是透過減輕肌肉活動，讓穿戴者能舒適移動且不感到阻力。依其功能應用，外骨骼主要可分為兩類：一是協助傷患恢復運動機能的「復健類外骨骼」；二是針對健康人群設計，用於增強負重能力、減輕疲勞與預防工作相關傷害的「助力型外骨骼」(Ma et al., 2023)。本文將探討外骨骼技術的發展現況，並聚焦於腰部助力外骨骼的設計與應用，期能為降低職業性肌肉骨骼傷害提供具體的對策與參考。

穿戴式外骨骼技術之原理與分類

根據驅動方式與輔助部位的不同，外骨骼主要可分為以下幾種基礎類型：

（一）依動力來源分類（主動式與被動式）

- 主動式外骨骼（active exoskeleton）：又稱動力型外骨骼。此類系統透過馬達、液壓或氣動致動器主動輸出輔助力矩。其優勢在於能提供強大的輔助能量，適用於醫療復健（如精準的步態控制）或重型搬運。然而，其缺點是系統結構複雜、整體重量較重，且高度依賴電池續航力。

- 被動式外骨骼（passive exoskeleton）：又稱無動力型外骨骼。其完全不依賴電力，而是利用彈簧、阻尼器或彈性機構來儲存與釋放人體運動時產生的能量。由於免去了電池與馬達，被動式外骨骼具備輕量化、結構簡單且可靠度高的優勢。其設計關鍵在於必須建立完整的「封閉運動鏈」，以有效將重力或負載引導至大腿或地面。

（二）依輔助部位分類

- 上肢型：專注於肩、肘、腕關節的支撐，常見於工業仰角作業（如汽車裝配）或上肢復健。

- 下肢型與腰部型：針對髖、膝、踝以及腰椎設計。除了用於步態訓練，近期在照護與物流領域，專注於減輕下背部受力的「腰部助力外骨骼」需求正快速成長。全身型：整合多部位功能，但因機構設計與重量配置的複雜度極高，目前多處於軍事或特殊應用的研發階段。

腰部輔助外骨骼之設計與實務應用

針對照護與搬運需求，腰部輔助外骨骼主要透過提供額外的支撐力矩來減輕下背部負擔。依據其驅動機制，目前的技術發展可歸納為三大類：

（一）主動式（動力型）外骨骼

早期發展多以單純的馬達驅動為主，設備較重且容易限制自然運動（Contreras-Vidal et al., 2016）。然而，近年的技術已大幅躍進，並針對照護場域推出專屬設計。例如德國 Bionic 公司針對醫療照護人員推出的 Exia 腰部外骨骼，能提供高達 30 公斤的輔助力以協助病患轉移位。同時，為提升穿戴舒適性，允許彈性緩衝的「柔性驅動（如串聯彈性致動器）」成為研究熱點，實測可降低約 28% 的背部最大自主收縮（maximum voluntary contraction, MVC）（Huysamen et al., 2018）。此外，亦有採用氣壓人工肌肉（pneumatic artificial muscle, PAM）作為動力源的設計，以大幅提升設備與人體的貼合度。

（二）被動式（無動力型）外骨骼

這是目前業界應用最廣泛的形式。其原理是利用彈簧或阻尼器，在使用者彎腰（作負功）時收集並儲存能量，於起身時釋放助力（Zhang et al., 2016）。例如市售的 Leavo 外骨骼（Koopman et al., 2020）利用氣壓棒搭配彈性管，能有效將背部肌肉活動降低 35% ~ 38%。其最大優勢在於結構簡單、輕巧且無須依賴電池。

（三）主被動混合型外骨骼

結合前兩者優點，這類設計主體依靠彈簧等被動元件提供支撐，並輔以微型馬達或離合器，根據使用者的運動意圖來切換動力狀態或支撐強度（Le & Lin, 2024）。這種設計兼具低能耗、輕量化與高靈活性，特別適合需要長時間穿戴的照護從業人員。

在本土研發與實務應用方面，筆者所帶領的國立中興大學機械系研究團隊，長期深耕機電整合與先進控制技術，成功開發多款因應多元作業與特殊情境之穿戴式助力外骨骼。相關研發成果不僅多項已獲發明專利肯定，更彰顯其技術創新性與實務價值。具體成果如圖1所示，包括：針對緩解下背負擔之腰部輔助外骨骼（圖1a）；具備按需輔助導納控制之雙模式上肢外骨骼（圖1b），可靈活提供動力輔助與抗重力支撐，其特點在於能流暢順應肢體動作位移（導納控制），並僅在感測到使用者力氣

不足時才介入提供助力（按需輔助），以兼顧穿戴活動的自然度與省力保護成效；結合機構創新之仿生脊椎主被動混合型腰部外骨骼（圖1c）；以及因應軍事後勤之模組化助力系統（圖1d），旨在減輕長時間高強度搬運對上肢與髖腰部之負荷，有效降低工作相關肌肉骨骼傷病（WMSDs）風險，提升作業效率與安全性。上述成果均通過嚴謹的力學分析與肌電訊號驗證，證實其助力與抗疲勞之顯著成效，充分展現國內在穿戴式外骨骼自主研發與落地應用之豐沛量能。



圖1、穿戴式助力外骨骼研發成果

未來展望

穿戴式外骨骼正朝向「智慧化」與「輕量化」邁進。如圖2所示，未來的技術發展將緊扣四大核心趨勢。在「數據感知與控制」及「自適應控制」策略上，將融合多模態感測與深度學習演算法，結合肌電訊號以實現毫秒級的運動

意圖預測；腦機介面（brain-computer interface, BCI）的技術突破，更為精準的隨需輔助提供新契機。爲了提升「人機舒適性」，硬體方面將導入新型複合材料與3D列印技術，大幅降低設備重量與客製化門檻。此外，爲應對高工時的實際作業需求，優化「能量管理與續航」表現，將是外骨骼能真正走出實驗室、普及於照護與搬運現場的關鍵。



圖2、腰部助力外骨骼未來發展趨勢示意圖（AI生成）

結語

面對人口高齡化與勞動力短缺的挑戰，外骨骼技術的普及將帶來深遠影響。在醫療照護端，它有望重塑復健模式並降低長照成本；於產業端則能減輕負擔、緩解缺工壓力。未來，在技術從實驗室邁向大規模應用的過程中，隱私保護與倫理規範亦須同步建立。期盼外骨骼能成爲照護者的堅實後盾，真正落實「以人爲本」的科技輔具願景。

參考文獻

- Cieza, A., Causey, K., Kamenov, K., Hanson, S. W., Chatterji, S., & Vos, T. (2020). Global estimates of the need for rehabilitation based on the Global Burden of Disease study 2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet*, 396(10267), 2006-2017.
- Contreras-Vidal, J. L., A Bhagat, N., Brantley, J., Cruz-Garza, J. G., He, Y., Manley, Q., Nakagome, S., Nathan, K., Tan, S. H., & Zhu, F. (2016). Powered exoskeletons for bipedal locomotion after spinal cord injury. *Journal of neural engineering*, 13(3), 031001.

- Dos Anjos, F., Ghislieri, M., Cerone, G., Pinto, T., & Gazzoni, M. (2022). Changes in the distribution of muscle activity when using a passive trunk exoskeleton depend on the type of working task: A high-density surface EMG study. *Journal of Biomechanics*, 130, 110846.
- Ganasegeran, K., Perianayagam, W., Nagaraj, P., & Al-Dubai, S. (2014). Psycho-behavioural risks of low back pain in railway workers. *Occupational medicine*, 64(5), 372-375.
- Hsiang, S. M., Brogmus, G. E., & Courtney, T. K. (1997). Low back pain (LBP) and lifting technique—a review. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 19(1), 59-74.
- Huysamen, K., Power, V., & O' Sullivan, L. (2018). Elongation of the surface of the spine during lifting and lowering, and implications for design of an upper body industrial exoskeleton. *Applied ergonomics*, 72, 10-16.
- Koopman, A. S., Kingma, I., de Looze, M. P., & van Dieën, J. H. (2020). Effects of a passive back exoskeleton on the mechanical loading of the low-back during symmetric lifting. *Journal of Biomechanics*, 102, 109486.
- Le, D. K. L., & Lin, W.-C. (2024). Human-exoskeleton cooperation for reducing the musculoskeletal load of manual handling tasks in orchid farms. *Computers and Electronics in Agriculture*, 219, 108820.
- Ma, T., Zhang, Y., Choi, S. D., & Xiong, S. (2023). Modelling for design and evaluation of industrial exoskeletons: A systematic review. *Applied ergonomics*, 113, 104100.
- Nazari, F., Mohajer, N., Nahavandi, D., Khosravi, A., & Nahavandi, S. (2023). Applied exoskeleton technology: A comprehensive review of physical and cognitive human-robot interaction. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, 15(3), 1102-1122.
- So, B. C. L., Hua, C., Chen, T., Gao, Q., & Man, S. S. (2022). Biomechanical assessment of a passive back-support exoskeleton during repetitive lifting and carrying: Muscle activity, kinematics, and physical capacity. *Journal of safety research*, 83, 210-222.
- Valentina, V., Fabio, S., Martina, C., & Alessandro, P. (2018). Fatigue accumulation in the assignment of manual material handling activities to operators. *IFAC-PapersOn-Line*, 51(11), 826-831.
- Zhang, H., Kadrolkar, A., & Sup IV, F. C. (2016). Design and preliminary evaluation of a passive spine exoskeleton. *Journal of Medical Devices*, 10(1), 011002.

