

外骨骼搬運服之省力功效評估

Dang Khanh Linh Le、趙淑真、王獻民、林韋至

國立中山大學機械與機電工程學系 研究生、研究助理、研究生、副教授

摘要

本研究以小果番茄園的分裝搬運作業為實驗場域，將外骨骼搬運服導入，協助農民搬運裝盒成箱的小果番茄，此外並分別量測與分析穿戴外骨骼搬運服前後，背部背闊肌、豎脊肌，及手臂前三角肌的肌電訊號，評估外骨骼服在搬運過程中的省力功效差異。我們將該搬運工作分為(1)抬舉、(2)負重步行、(3)放置，以及(4)未負重步行共四種過程。在搬運作業中，(1)抬舉過程是肌力消耗最主高的動作，由數據顯示，在外骨骼搬運服的輔助下，在進行抬舉動作時，可有效降低 77.9%背闊肌、60.5%豎脊肌、40.2%前三角肌的肌肉消耗。而在進行(3)放置動作時，也可節省約 70.1%背闊肌、54.4%豎脊肌、36.0%前三角肌的肌肉消耗。在(2)負重步行過程中，因為主要使用的肌肉為手臂的前三角肌，而此肌肉的省力值可提高為 52.7%。而在(4)未負重步行時，由於無任何外加負荷，所以並無明顯的省力功效產生。最後，由量測的結果證明，我們認為此外骨骼搬運服在荷重搬運時可提供良好的省力效果，未來有很高的潛力大量的導入相關的工作場域中。

關鍵詞：外骨骼服、搬運工作、省力功效、肌電訊號

緒論

由國際勞工組織(International Labour Organization, ILO)曾經提出的數據顯示，農業是職業疾病發生率相當高的一個產業^[1]。而在農民的職業病中，有 93%是與職業性肌肉骨骼疾病(WMSDs)有關^[2]。台灣勞動部轄下的勞動及職業安全衛生研究所，在 2018 年的果農的職業衛生狀況調查報告中指出，在 110 位受訪果農中，高達 83.6%自訴出現有 WMSDs 的症狀，而發生 WMSDs 機率最高的身體部位有 5 個，分別為：下背和腰為 64.1%、膝蓋為 44.6%、肩膀為 40.2%、脖子為 37.0%，以及手和手腕的 37.0%^[3]。由此數據可知，果農發生 WMSDs 的部位很高比率皆集中在背部與上肢，因此如能減緩長期和大量集中使用背部及上肢兩處的肌力，將可有效的降低農民罹患 WMSDs 的風險^[4]。

如何有效降低背部及上肢等身體部位罹患 WMSDs 的職業風險，有諸多方法已陸續被提出，例如採用正確的姿勢與動作、改善作業環境、以機械設備取代人力作業，或是結合輔助機具的運用等等，皆能有效的降低肢體的負擔及勞動傷害。其中，將輔助機具運用在生產工作上，國際上已有數個導入的實例，主要是讓生產人員穿戴外骨骼服，透過外骨骼服上的動

力輔助構件，產生額外的輔助力量，對特定的姿勢或運動供身體支撐或保護，降低穿戴者工作時的肌肉活動負荷^[4]。例如，一企業將上肢外骨骼輔助服(Exoskeleton)導入其汽車組裝生產線上，在穿戴後，可協助裝配員減低長期舉臂安裝零件時的肌力消耗，以及人體的職業傷害風險。此外，亦有許多研究文獻針對外骨骼的功能性做探討，測試數據顯示，穿戴上肢及背部外骨骼可減緩肌力消耗。如抬舉飼料包、撿拾雞蛋及修剪鋸木等多種農事作業中，使用背部外骨骼服(Laevo V2.5)10 至 20 分鐘，可以減少消耗 65%的豎脊肌的肌肉消耗^[5]。相同地，汽車裝配人員在穿戴上肢外骨骼(Lovitrate AIRFRAME™)後，在執行抬手過肩工作時，可以降低 34%的三角肌中位數肌肉活動^[6]。所以透過外骨骼降低罹患背部及上肢部位的 WMSDs 風險，是一種具有很高潛力的工具與模式。

在眾多的農務作業中，搬運是最為常見，且體力消耗較高的工作項目，目前台灣大部分的農民還是依賴人力搬運的模式為主，雖然搬運工時不長，但由於搬運所需的肌力耗損相當大，再長期的累積後，因此也使得 WMSDs 發生的頻率大幅的提升。因此本研究規劃將一外骨骼搬運服導入農事搬運作業上，並評估驗證其對上肢與背部肌肉活動時的省力功效，協助農民降低搬運所帶來的體力消耗，以及有效的降低罹患 WMSDs 風險。

實驗設計與量測

一、省力功效量測步驟

本研究主要以小果番茄園的分裝搬運作業為實驗場域，一般而言，農民在採收完小果蕃茄後，大多於分裝區進行挑選和裝盒成箱，每箱共有十小盒小果番茄，平均每箱重量約為 6 公斤，在裝箱完成後，大多依靠人力由分裝區搬運至集貨區，等待出貨，而分裝區至集貨區距離約 5 公尺。由於小果番茄產季長達半年，幾乎每日皆需採收、分裝和搬運，而長時且繁重的搬運作業，很容易造成農民發生下背痛的職業傷害。因此，本研究將把外骨骼搬運服應用於小果番茄園的分裝搬運作業中，減少上敘的問題發生。首先，模擬農民在分裝區，將小番茄搬運至集貨場的來回動作，由測試者以穿戴、未穿戴外骨骼搬運服，各自執行搬運作業 8 次，並量測穿戴外骨骼服前、後的肌肉活動差異，實驗量測則依據 SENIAM 的協議內容進行^[7]，量測上肢肌肉的最大自主收縮(MVC)，及背部肌肉的參考自主收縮(RVC)，量化外骨骼支撐背部與上肢肌肉的效果，測試外骨骼搬運服對於降低背部肌肉活動的效果，搬運模擬作業如圖 1 所示。試驗步驟如下：

1. 抬舉：測試者彎腰將 6 公斤重的水果箱，從地面抬舉至站立姿態。
2. 負重步行：測試者抬舉 6 公斤重的水果箱，從分裝區搬運至集貨場。
3. 放置：測試者將 6 公斤重的水果箱，由站立姿態放置於地面。
4. 未負重步行：測試者從集貨場徒手步行至分裝區。



圖 1、搬運模擬作業圖。圖(a)至(d)步驟為未穿戴外骨骼省力服進行搬運作業，圖(a)為抬舉動作、圖(b)為負重步行、圖(c)則為放置中物、圖(d)為未負重步行；圖(e)至(h)步驟為穿戴外骨骼，分別測試抬舉、負重步行、放下、未負重步行進行搬運作業

二、外骨骼搬運服介紹

本研究所使用的外骨骼搬運服，外觀如圖 2 所示，主要由機構式的上肢和動力式的腰部輔助元件所構成，而穿戴方式與一般的背包穿脫方式無異，步驟簡單、快速。此搬運服的上肢手臂輔助部分設有一無動力的彈力裝置，當穿戴者抬舉物品時，透過彈力協助抬舉上臂。而在搬運服的腰部動力輔助元件，如圖二(c)所示，則由兩伺服馬達機構所組成，在穿戴者彎腰抬舉物品時，提供適時的回彈與支撐力，進而降低搬運時背部肌肉的肌力消耗。在腰部的支撐力提供，本實驗並未選擇扭矩感測自主驅動的模式，或乾式 EMG 感測器驅動模式，而是以穿戴者自主開關驅動的模式進行，如圖二(d)所示，穿戴者可以透過手套內藏的壓力感測器為開關，當進行搬運作業時，手指觸碰物品產生一壓力訊號後，腰部兩側的伺服馬達即可被驅動，並帶動固定於大腿上的連接桿，進而提供額外的輔助力協助抬升，以及穿戴者回復站立姿態。



圖 2、本文所使用的外骨骼搬運服：(a)前視圖；(b)左視圖；(c)馬達裝置圖；(d)手指壓力感測器開關手套

三、省力值量測與數據分析

本研究使用的肌電訊號量測儀為藍芽無線生理回饋儀(NeXus 10, Mind Media BV, Nederland), 將電極貼附於試測者肌肉部位的皮膚表層後, 即可收集與記錄背部及上肢肌肉收縮時所產生的肌電訊號(EMG), 並根據 SENIAM 的規範^[7], 在表面電極貼附前, 需先將量測肌肉表面的毛髮清除, 再以酒精棉片清潔皮膚, 減少雜訊訊號的產生。每個表面電極相距 20mm, 並分別固定於背闊肌、豎脊肌與前三角肌部位, 接地電極則放置在第 7 頸椎(C7)上, 接收的訊號會則會利用 80-250 Hz 的濾波器進行濾波。最後, 所量測到的 EMG 訊號均會使用 Bio Trace 軟體(V2018A1, Mind Media BV, Nederland)做數據處理與分析。為了比較穿戴外骨骼搬運服前後的差異, 本研究將前三角肌的 EMG 數值, 以最大自主收縮百分比(%MVC)的方式進行標準化, 而背部背闊肌、豎脊肌的 EMG 數值分析, 則以自主收縮百分比(%RVC)的方式進行標準化計算, 取幅度機率密度函數(APDF)的第 10、50 和 90, 並分別定義為靜態、中位數和峰值的肌肉活動^[5]。

結果與討論

圖三顯示模擬試測者穿戴外骨骼服前、後時, 進行小果蕃茄搬運作業之肌電訊號量測值, 圖三(a)為穿戴前、後之背闊肌與豎脊肌肌電訊號。如果以藍色線代表的沒穿戴外骨骼服背闊肌肌電訊號為例, 與灰色線代表的穿戴外骨骼服背闊肌肌電訊號相比較, 圖中顯示在抬舉(1)水果箱動作時, 在外骨骼服的協助下, 藍色與灰色峰值有明顯的差異。同樣地, 在放置動作(3)時, 肌電訊號也有顯著的差異。而圖三(b)則為穿戴前、後之上臂前三角肌肌電訊號, 在進行負重步行動作(2)時, 代表沒穿戴外骨骼服的藍色線, 在使用外骨骼服的協助下, 橘色線的前三角肌肌力消耗亦有明顯的降低。

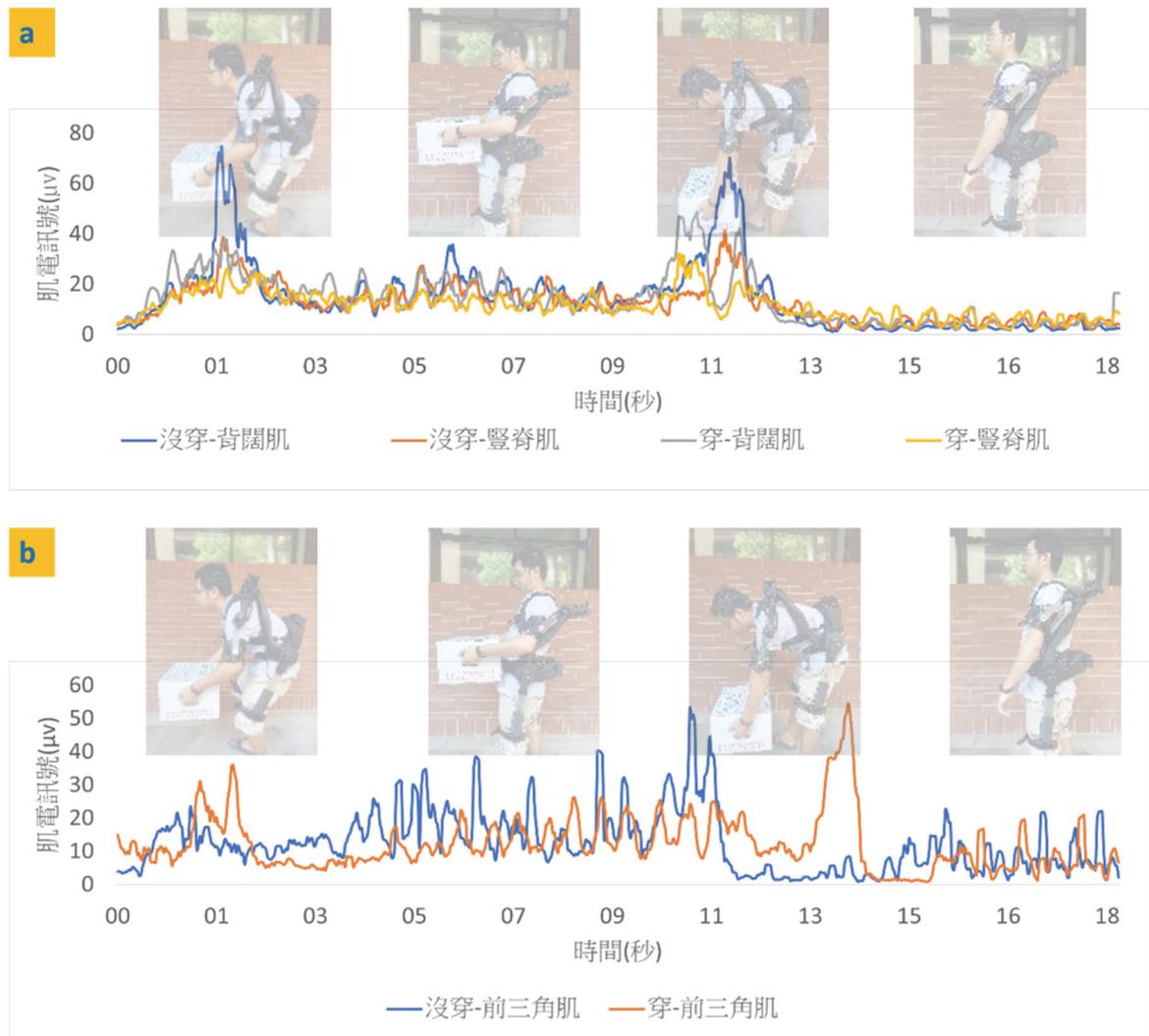


圖 3、外骨骼搬運服穿戴前、後之肌電訊號量測值：(a)背闊肌與豎脊肌之肌電訊號;(b)上臂前三角肌之肌電訊號

圖 4 (a)-(c)則為抬舉動作(1)時，穿戴外骨骼搬運服前、後的省力功效圖。在搬運抬舉(1)動作時，以中位數(50th)數值相互比較，外骨骼搬運服可以協助降低約 77.9%背闊肌、60.5%豎脊肌、40.2%前三角肌的肌力消耗。而圖 5 (a)-(c)則顯示，一樣以中位數(50th)的數值做比較，在進行放置動作(3)時，在穿戴外骨骼搬運服後，則可節省 70.1%的背闊肌、54.4%的豎脊肌和 36.0%的前三角肌肌肉消耗。由於進行彎腰搬運和置放動作時，主要的肌力消耗為背部肌肉，因此，由上述數據可知，此外骨骼搬運服可提供輔助力，協助穿戴者在進行彎腰動作後，有效的回復至站立姿勢，並且在進行重物放置時，也可提供支撐力，降低由站立到彎腰時，背部肌肉的肌力消耗。

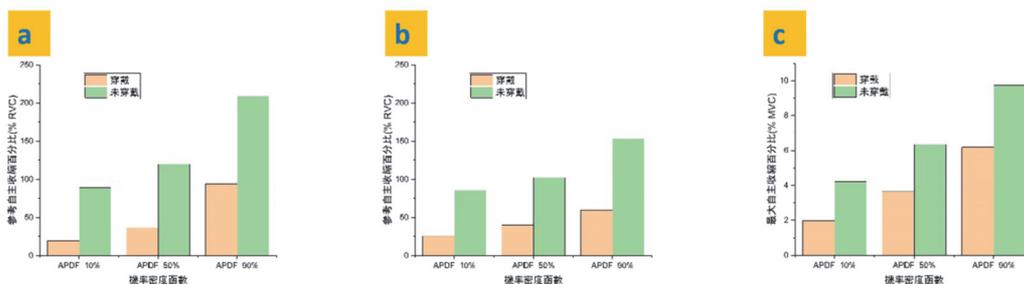


圖 4、穿戴外骨骼搬運服進行抬舉動作(1)之省力功效值：(a)背闊肌之省力功效；(b)豎脊肌之省力功效；(c)前三角肌之省力功效

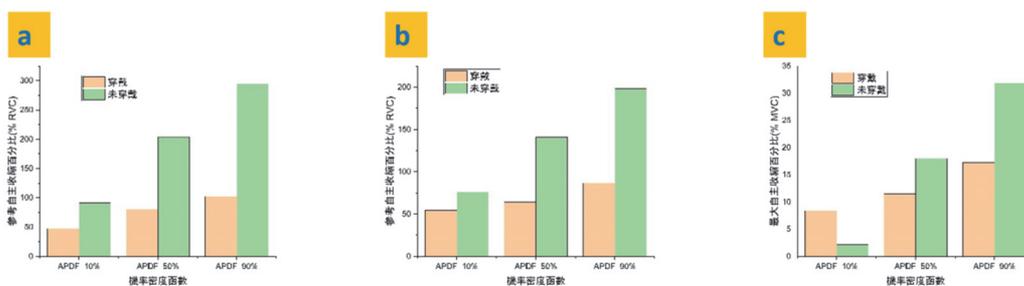


圖 5、穿戴外骨骼搬運服進行放置動作(3)之省力功效值：(a)背闊肌之省力功效；(b)豎脊肌之省力功效；(c)前三角肌之省力功效

圖 6 (a)-(c)為穿戴外骨骼搬運服前、後，進行負重步行動作(2)時，背闊肌、豎脊肌、前三角肌的肌力消耗省力功效圖。試測者在穿戴外骨骼服進行重物搬運時，由於主要是利用手臂的肌力進行重物的搬持，所以最大的肌力消耗會發生在手臂的前三角肌，因未大幅的使用到背闊肌和豎脊肌，所以腰部輔助動力裝置在協助該兩肌肉的省力功效上並不明顯，僅有約 11.6%和 10.5%。相反的，由於上肢手臂輔助彈力裝置的協助，手臂前三角肌的肌力消耗則可降至 52.7%。

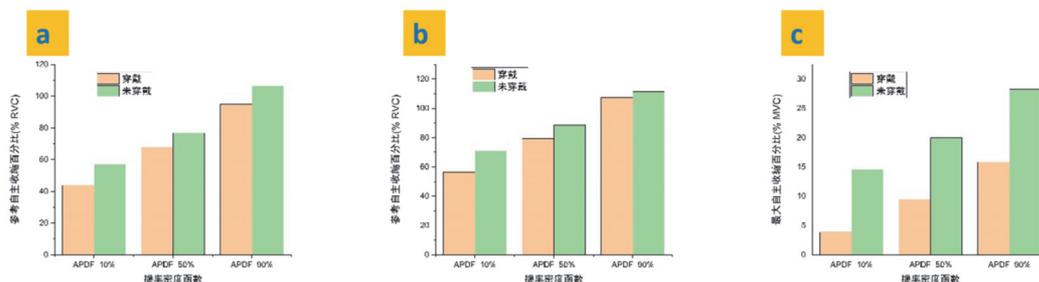


圖 6、穿戴外骨骼搬運服進行負重步行動作(2)之省力功效值：(a)背闊肌之省力功效；(b)豎脊肌之省力功效；(c)前三角肌之省力功效

在完成動作(1)、(2)、(3)動作後，當測試者進行未負重步行(4)動作時，在穿戴外骨骼服後，僅發生節省約 10%的背闊肌消耗，但出乎意料的，竟然造成豎脊肌和前三角肌的出力增加，增加的比率分別為 56.2%和 19.0%。由於在進行未負重步行(4)動作時，並無任何外加荷重，理論上不應發生出力增加的現象。因此為探究此狀況發生的原因，吾人將上肢手臂輔助彈力裝置和腰部的輔助馬達裝置分拆，重新量測個別之省力功效值。發現在分拆此兩裝置個別量測後，該兩肌肉出力增加的現象獲得明顯的改善。因此我們推測此現象的發生，有可能是因為兩機構的組裝與連結部分，設計並不完善，自由度不足，在整合一起後，反而造成穿戴者在自由行走的動作時，增加阻礙，造成額外的肌力消耗。但由負重步行動作(2)所分析出的數據，我們並未發現此現象的發生，背闊肌和豎脊肌皆呈現節省肌力消耗的結果，因此，此部分仍待後續更深入的研究與探討，未來也可將其列為本研究的研究重點之一。

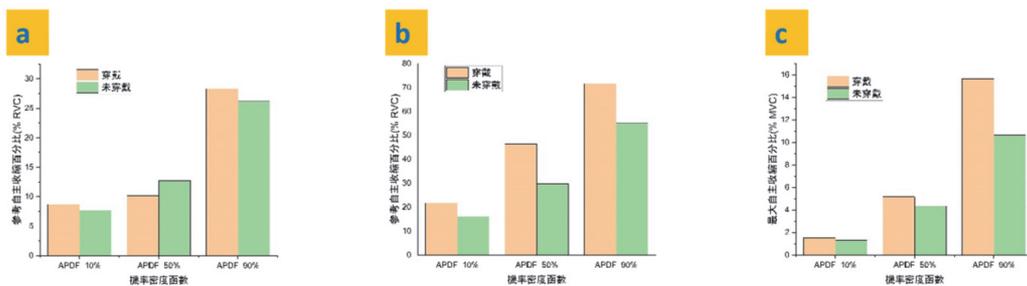


圖 7、穿戴外骨骼搬運服進行未負重步行(4)動作之省力功效值：(a)背闊肌背闊肌之省力功效; (b)豎脊肌背闊肌之省力功效; (c)前三角肌背闊肌之省力功效

結 論

綜合以上的研究數據，此外骨骼搬運服在進行搬運抬舉(1)、負重步行(2)、重物放置(3)等三種不同作業時，可以提供上臂及背部肌肉輔助力量，協助降低在搬運時肌力的消耗。以進行抬舉(1)動作時為例，可降低 77.9%的背闊肌、60.5%豎脊肌和前三角肌 40.2%的肌肉負荷；當進行負重步行(2)動作時，前三角肌的肌力消耗，則可節省 52.7%。因此，我們認為此外骨骼搬運服在不同的搬運動作時，可以分別提供不同肌肉部位輔助力量的功能。所以吾人相信此外骨骼搬運服應有很高的應用潛力，外來農民可以使用於農事作業中，減輕他們在農事作業中的肌力消耗，亦能降低農民罹患 WMSDs 的風險，進而提升工作後的生活品質。

誌 謝

作者要感謝這項研究得到了中華民國農業委員會的支持[項目編號 109AS-11.3.1-ST-a1 和 110AS-8.3.1-ST-a1]。

參考文獻

1. Howells R. The Robens Report. *Ind Law J (Lond)*. 1972;1:185-196.
2. Bernard C, Tourne M. Musculoskeletal disorders in agriculture. *Rev Prat*. 2007;57(11 Suppl): 45-50.
3. 勞動部勞動及職業安全衛生研究所；"農作物栽培業從業人員職業衛生狀況調查研究—以果樹栽培為例"；108；何雨芳、賴嘉祥
4. De Looze MP, Bosch T, Krause F, Stadler KS, O'Sullivan LW. Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics*. 2016;59(5):671-681.
5. Thamsuwan O, Milosavljevic S, Srinivasan D, Trask C. Potential exoskeleton uses for reducing low back muscular activity during farm tasks. *American Journal of Industrial Medicine*. 2020;63(11):1017-1028.
6. Iranzo S, Piedrabuena A, Iordanov D, Martinez-Iranzo U, Belda-Lois J-M. Ergonomics assessment of passive upper-limb exoskeletons in an automotive assembly plant. *Applied ergonomics*. 2020;87:103120.
7. Hermens HJ, Freriks B, Disselhorst-Klug C, Rau G. Development of recommendations for SEMG sensors and sensor placement procedures. *Journal of electromyography Kinesiology*. 2000;10(5):361-374.