

2024 台灣數位雙生學會學生作品競賽
參賽企劃書

髖關節外骨骼暨 AR 交互運動輔助裝置
Hip Exoskeleton and AR Interactive Motion Assistance
Device

團隊成員

賴宏達、劉智翔

指導老師

陳右穎老師

學校系科

國立陽明交通大學 生物醫學工程學系

中華民國 113 年 11 月 11 日

1. 作品名稱

髖關節外骨骼暨 AR 交互運動輔助裝置

Hip Exoskeleton and AR Interactive Motion Assistance Device

2. 設計動機

長時間的體力活動不僅會導致肌肉疲勞，還可能在運動過程中帶來安全和健康風險。這一現實促使我們思考如何利用技術來解決這個問題。因此，我們提議開發一種外骨骼系統，以增強各年齡層的體力。該系統旨在減少特定肌肉的使用強度，並延長需要消耗體力的活動時間，例如長距離徒步旅行和爬樓梯。通過減輕肌肉壓力，我們希望提高這些活動的安全性，使人們能夠自信地參與各種運動，從日常的爬樓梯到更具挑戰性的體能活動。對於像深蹲這類的靜態活動，該系統還能監測肌肉使用情況，**提供運動保護**。

為實現這一目標，我們計劃利用 **AR 眼鏡結合虛擬教練**，為用戶提供**沉浸式的運動體驗**（圖 1）。

此外，我們打算將多個肌電圖（EMG）貼片整合到外骨骼設備中，並使用控制芯片來監控關節角度和 IMU 信息，並在 AR 界面上實時顯示肌肉力量狀態。此設計不僅便於用戶了解自身的肌肉狀況，還能在疲勞或動作不當時激活關節限制和增強力量的功能，提供警示。該外骨骼的設計便攜，像電動滑板車一樣，可以無縫融入日常生活。因此，我們專注於開發髖關節外骨骼，選擇髖關節是因為它在直立行走等活動中具有重要作用。所謂的「**髖鉸鏈**」動作從髖關節開始，依靠腿部和下背部的力量來支撐身體和外部重量。我們的電機控制策略將採用強化學習模型來適應用戶的步態，旨在減輕特定肌肉的負擔。



圖 1. 使用者佩戴 AR 眼鏡並穿戴外骨骼，與虛擬教練一起運動。

3. 開發軟硬體

3.1 開發用硬體

3.1.1 外骨骼系統

3.1.1.1 髖關節外骨骼

目的：該外骨骼裝置旨在協助用戶進行步行或爬樓梯等體力活動，通過提供動力輔助來減少肌肉疲勞、延長活動時間並提升安全性。因此，該裝置設計有兩個自由度以適應髖關節電機。設計示意圖和實物樣品展示如圖 2 和圖 3 所示。

使用材料：

- 主結構材料：輕量且高強度的鋁合金，以確保裝置穩定性並減少使用者負擔。

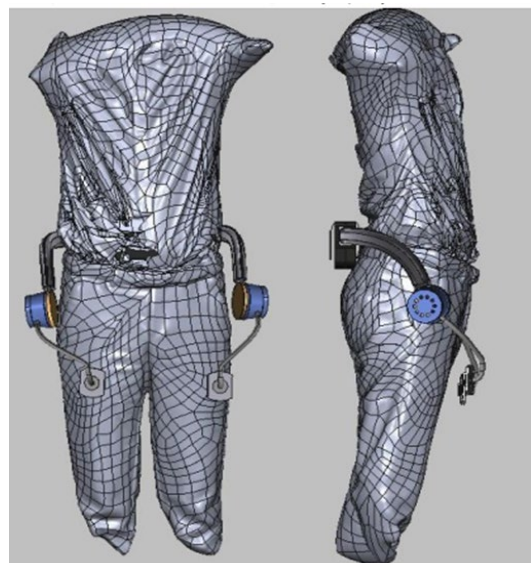


圖 2. 設計示意圖

- 接觸皮膚的部位：例如腰帶和大腿帶，採用透氣、彈性且抗過敏的醫療級材料，以確保長時間穿戴的舒適性。
- 動力部件外殼：使用工程塑料製成，用於保護內部電機免受外部影響。

尺寸和重量：

- 整體設計：裝置設計緊湊，尺寸適合大多數成人體型，並可通過可調節的肩帶進行微調。
- 髖部動力單元直徑：約 7 公分，厚度約為 4 公分。
- 總重量：整個裝置的重量保持在 5.5 公斤以下，確保使用者能長時間穿戴而不會感到過度負擔。

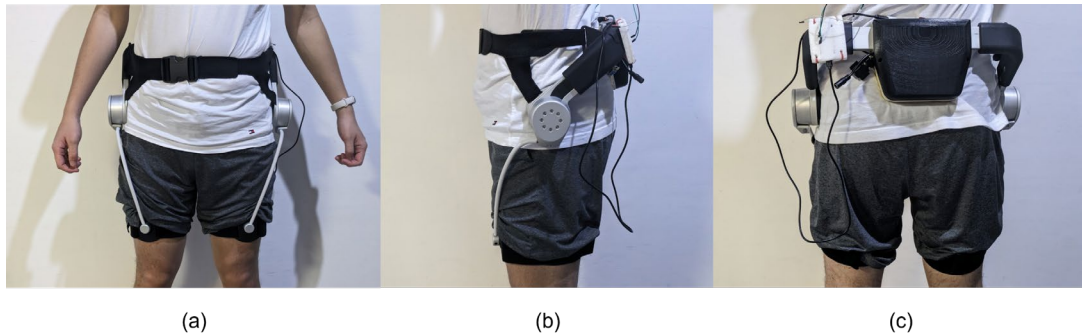


圖 3. 實物樣品展示 (a) 正面視圖 (b) 側面視圖，左側為正面 (c) 背面視圖

3.1.1.2 肌電圖 (EMG) Cygnus 接收器和電極貼片

我們的系統輔助仰賴精確捕捉肌電圖 (EMG) 信號來達成。這些信號由肌肉收縮產生，通過高靈敏度且抗噪的感測器準確檢測到。隨附的軟體能實時處理這些信號，將人體肌肉活動轉換為可控的外骨骼動作，以提供復健支持或增強身體功能。該系統實現了人類意圖與機器精確度之間的無縫連接，為使用者帶來更高的自主性和效率。

連接至計算機的接收器尺寸為 6.40 cm x 2.54 cm x 1.50 cm，設計精簡而具功能性，便於與 EMG 系統無縫整合。相對地，連接至 EMG 線路的接收器尺寸為 6 cm x 4.78 cm x 1.83 cm，展示了該系統的緊湊且高效的元件架構。此外，用於捕捉肌電信號的電極貼片為正方形，尺寸為 3.53 cm x 3.53 cm，確保了貼附在皮膚上時的精確度和舒適性。

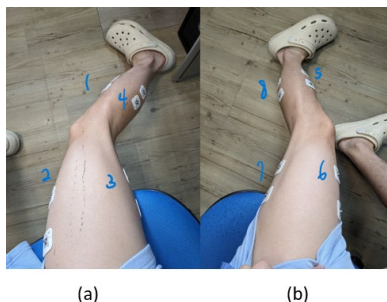


圖 4. EMG 貼片的實際貼附位置，
(a) 右腿位置和 (b) 左腿位置。

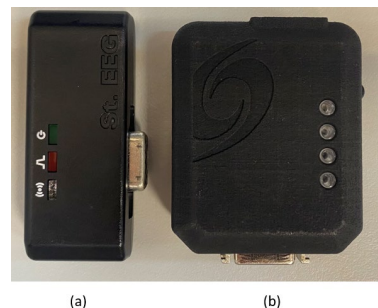


圖 5. (a) EMG Cygnus 接收器和 (b) 電極貼片收集器。

3.1.1.3 NodeMCU-32S

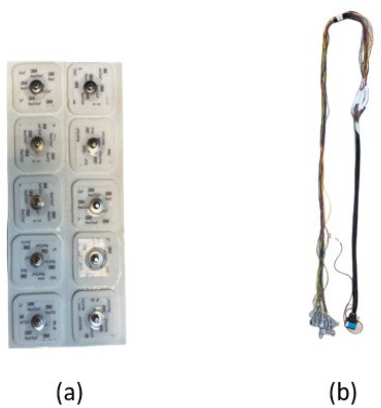


圖 6. (a) EMG 電極貼片 (b) 測量線

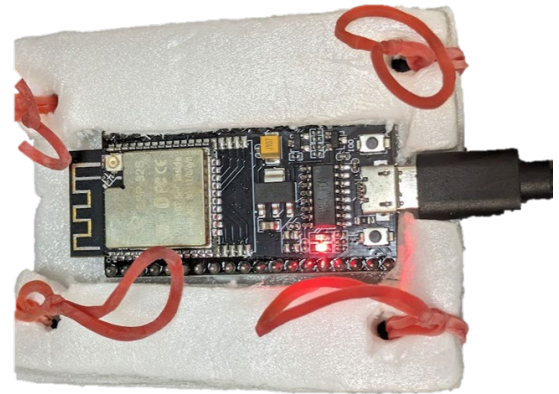


圖 7. 用於與外骨骼整合的 ESP32 NodeMCU-32S 開發板及臨時的膨脹聚苯乙烯 (EPS) 保護平台。

3.1.1.4 STM32F415 微控制器



圖 8. STM32F415 微控制器安置在預製的塑料外殼內，緊鄰電源用以控制，並設有外部電源端口以提供外部電力並容納 ESP32。

3.1.2 VR 眼鏡

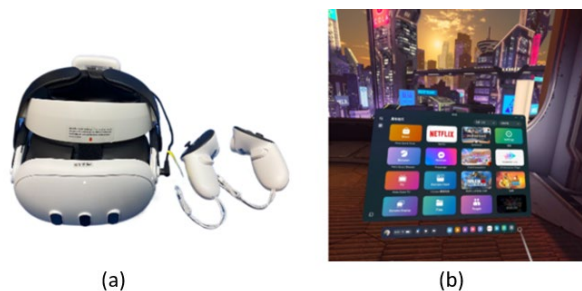


圖 9. Quest 3 的外觀 (a) 和內部 (b) 展示。

資訊	製造商	Meta
	裝置類型	Standalone VR
光學系統	光學	Pancake lenses

	視覺	Binocular
	IPD 範圍	58-71 mm 硬體可調（手動調整）
	環境透視	雙鏡頭 18 PPD 彩色透視相機
顯示系統	顯示類型	2 x LCD 雙目顯示
	子像素排列	RGB 條紋 每個像素有 3 個子像素
	顯示解析度	每眼 2064x2208
	刷新率	120Hz
影像	可見視場	水平 110° 垂直 96°
	峰值像素密度	25 PPD
設備	重量	515 g ，含頭帶
	材質	塑料，泡棉面部接口
	頭帶	可調柔性布帶
追蹤系統	追蹤類型	6 自由度內建追蹤，通過 4 顆集成相機
	深度感測器	支援
	身體追蹤	支援
控制器	控制器	2 個 Meta Quest Touch Plus 控制器，6 自由度
	手指追蹤	通過電容感測器支援手指和拇指的部分追蹤
連接性	端口	USB Type-C, 充電接點
	有線影片	USB Type-C Oculus Link
	無線影片	WiFi streaming Virtual Desktop, AirLink
	WiFi	WiFi 6E
System	作業系統	Android
	晶片組	Qualcomm Snapdragon XR2 Gen 2
	CPU	Octa-core Kryo (1 x 3.19 GHz, 4 x 2.8 GHz, 3 x 2.0 GHz)
	GPU	Adreno 740
Battery	電池壽命	2.2 小時
	充電時間	2.3 小時 附 18W 電源適配器

3.2 開發用軟體：

Arduino C, Python, ESP32 FreeRTOS, Pytorch, C API, BTSerial, WiFi, UnityAR, TensorboardX

3.3 執行環境系統需求：

windows/linux、

android

4. 系統架構

4.1 系統方塊圖（圖 10）

4.2 使用手冊

穿戴外骨骼系統：

為了系統的最佳部署，建議採用協作式安裝方式，先從髖關節外骨骼開始，然後再進行 EMG 貼片的安裝。此初步步驟有助於後續貼片的準確放置。外骨骼應貼合於使用者背部，確保其海綿墊與背部直接接觸，並使雙電

機精確對齊於髖關節位置。對齊後，緊固腰帶完成固定。裝置的金屬桿需貼合於大腿上，並用彈性帶固定以避免在行走過程中發生位移。

下一步驟是 EMG 貼片的安裝，需仔細放置以確保準確性。每個貼片需固定在相同的肌肉群上，並保持特定的間距，通常為兩到三指寬。貼片應貼附於雙腿的脛骨前肌和腓腸肌，以及大腿的股直肌和股外側肌，每塊肌肉貼兩個貼片，共計十六個貼片。脛骨前肌位於小腿外側，腓腸肌則由兩塊扇形肌肉組成，當小腿肌肉收縮時可見，這兩組肌肉的貼片安裝相對簡便。大腿部位的兩組肌肉需要更精確的識別方法：股直肌可於腿完全伸直時於大腿中央位置辨識；至於股外側肌，建議使用者坐在椅子上，採俯臥姿勢並嘗試抬起小腿，助理則提供反向阻力防止抬起。此動作可顯現出股外側肌，位於大腿後側外側位置。

使用 VR 眼鏡和介面操作說明：

使用者須佩戴 Meta Quest 3 VR 頭戴裝置，並啟用透視模式，以實現增強實境 (AR) 效果。啟動我們的 Unity 應用程序後，介面會呈現兩種運動模式：平地步行和標準深蹲動作。用戶可使用原廠提供的控制器來進行介面互動，通過將控制器指向介面上的按鈕來選擇不同的選項。在每種運動模式中，會提供兩個可供選擇的按鈕：一個是動作提示音，另一個是虛擬教練示範。動作提示音按鈕會播放正確的動作提示音，用戶可暫停播放，再次按下則繼續播放。虛擬教練按鈕則會在現實場景中顯示三維人形模型，演示正確的動作姿勢。用戶可以按下按鈕來觀看動作示範，再次按下則暫停虛擬教練的演示。

為確保介面不影響用戶在運動過程中的視野，我們開發了窗口縮放功能。用戶可按下控制器上的「B」按鈕，根據需求調整界面大小，達到理想的顯示效果。此整合旨在透過結合身體鍛鍊與互動式虛擬指導，提升用戶體驗，實現科技與健身的無縫結合。整體的用戶流程見圖 13 流程圖。

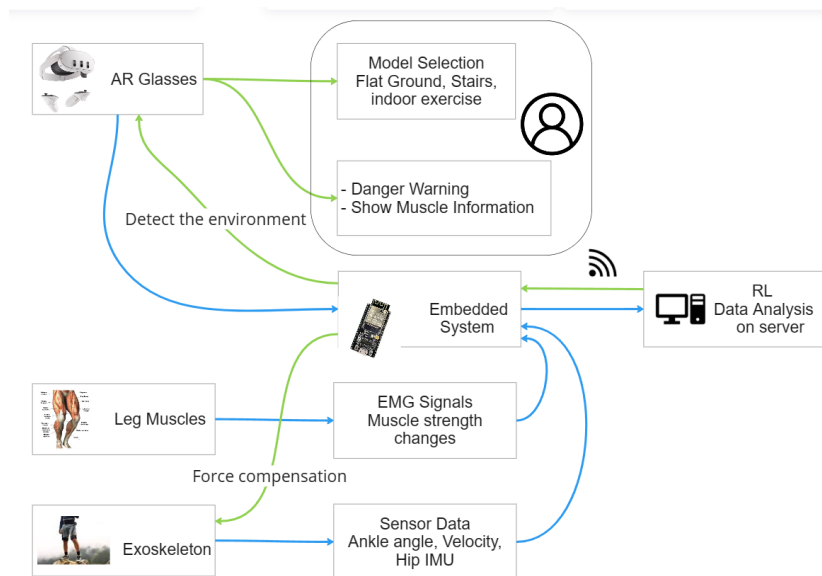


圖 10. 輔助外骨骼控制系統

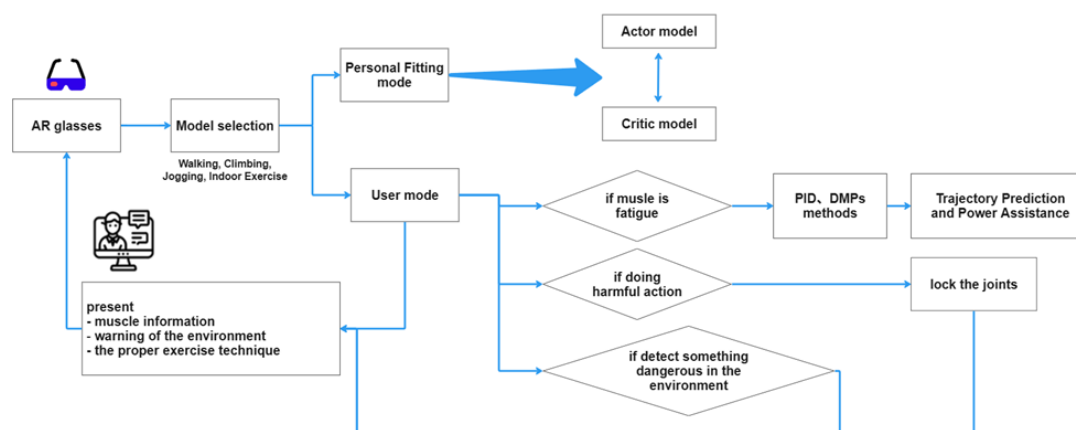


圖 11. 用戶工作流程

4.3 詳細設計數據文件

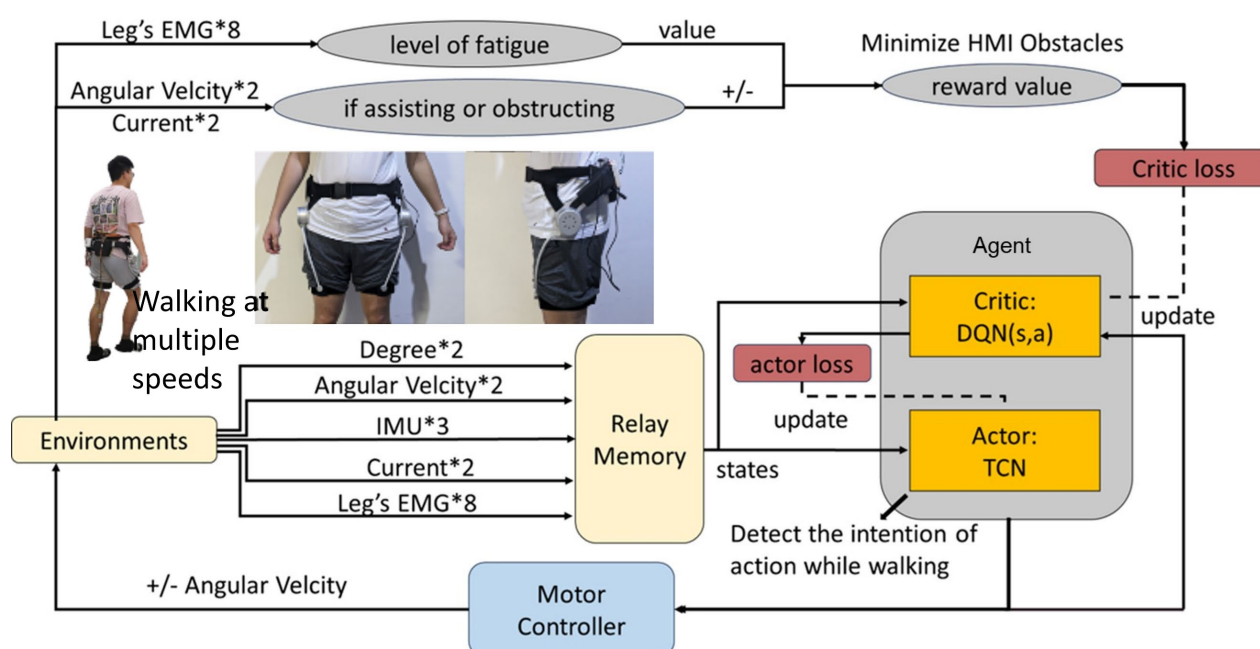


圖 12. 模型迭代算法：即時外骨骼控制及優化算法。如果沒有連接，可以將不同的權重加載到 Actor 中，以提供個性化的輔助和保護解決方案。

4.3.1 ESP32 IoT AI 邊緣運算方案

Wi-Fi dongle、UART 通訊、MCU 多工管理、客戶端 COMMAND 及資料串接

透過 ESP32 S3 NodeMCU 設置了 Wi-Fi 通信，還通過 UART 與 STM32F415 微控制器建立數據交換連結（STM32F415 微控制器直接管理外骨骼的一個關鍵組件—R14 電機諧波減速器編碼器驅動板，一個集成的大型空心伺服連接模組）。此 MCU 啟動伺服器，允許客戶端通過 Wi-Fi 連接，透過 FreeRTOS 管理雙核心進行兩項並行任務：一個處理來自 Wi-Fi 客戶端的命令，另一個從 STM32F415 獲取數據。系統需要以 20Hz 的頻率處理信號傳輸和接收。

4.3.2 伺服器端數位訊號處理：

WebSocket 數據接收、數據結構接收、信號處理功能、肌肉強度級別計算

4.3.3 DRL 框架：

環境設置、觀察和動作空間、步驟函數、重置函數、獎勵計算、渲染和日誌記錄。

使用 ptan 庫模塊化開發並節省開發如 Experience (Exp)[24] 等框架的時間，該腳本將功能封裝為與 OpenAI Gym 介面兼容的環境 (ENV)，以期未來能夠以虛擬進行訓練。

4.3.4 人工類神經網絡

DDPGActor、D4PGCritic、AgentD4PG

此程式使用 PyTorch 實現、並加入探索噪聲。

4.3.5 d4pg_train_sync.py

探索與經驗收集、儲存與採樣、目標和回歸計算、策略更新、固定目標網絡 (fixed target networks)

直接計算期望通常不可行，因為這需要對所有可能的狀態和動作組合進行積分，這在大多數情況下計算量過於龐大。因此，這些算法通常採用採樣方法(1)來估計這些期望值。

$$\text{ReplayBuffer} = \{(s_t, a_t, r_t, s_{t+1}, d_t)\}_{i=1}^N \quad (1)$$

4.3.6 AR 建置場景設置、語音、運動安全專家系統

我們使用 Unity 開發了一個針對 Meta Quest 3 的應用，並結合了多種庫，如 XR Plugin Management、XR Core Utilities、AR Foundation、Oculus Integration 和 Meta XR All-in-One SDK，來設計一個虛擬教練應用。首先，利用 Meta Quest 3 上的空間偵測來構建周圍平面和環境的表示。隨後，使用 AR Foundation 的 AR Plane Manager 來適當配置這些平面。完成平面偵測後，導入運動員模型和動畫，並為其配置剛體和碰撞體，以實現模型站立在偵測到的平面上的目標。這樣的設置允許模型與環境之間的互動，以及模型與使用者之間的互動。此外，我們還增強了動畫邏輯和控制，確保模型的動作能夠真實模仿現實中的運動員動作。下一階段涉及設計控制面板，讓使用者可以匯入語音介紹和選擇模型。最後，通過操控桿射線投射和按鈕輸入，使用者可以選擇希望跟隨虛擬教練進行的動作，從而實現沉浸式的運動訓練。透過 Wi-Fi 串流，我們還將外骨骼的狀態導入應用，並實現了一個運動安全評估專家系統，提供語音提醒。

5. 系統功能展示畫面

5.1 虛擬介面展示：[Exoskeleton VR UI youtube video](#)

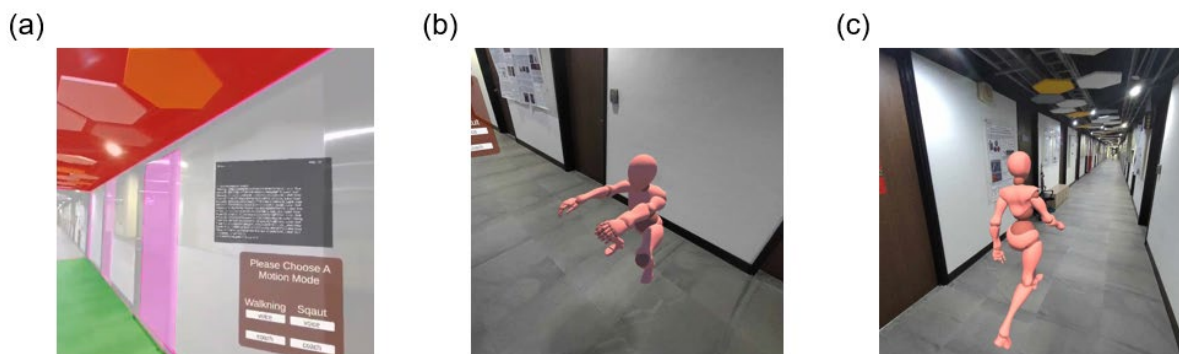


圖 13. 以 Meta Quest 3 展示的 Unity 應用程式。(a) 平面偵測與控制面板 (b) 與虛擬教練一起做深蹲 (c) 與虛擬教練一起走路

5.2 實際配戴畫面及外骨骼輔助狀況：[exoskeleton v1 support youtube video](#)

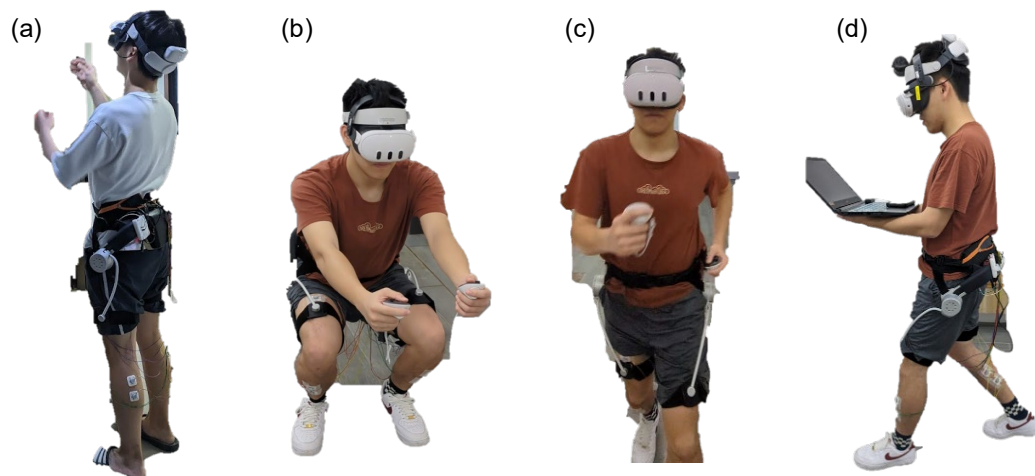


圖 14. 搭配外骨骼與 Meta Quest 3 的展示。(a) 選擇模型 (b) 進行帶有動作監控的深蹲 (c) 與虛擬教練一起跑步 (d) 使用桌面作為伺服器來訓練模型的步態

5.3 項目原型

在本項目中，我們針對管理 EMG 線纜和確保外骨骼電源不影響移動性所面臨的挑戰進行了解決。我們使用了一個腰包來有序存放線纜並進行數據傳輸，以確保運動的自由度。為防止裝置電量不足，我們在腰包中增加了一個移動電源，以輔助外骨骼的內部電源。ESP32S 則被穩固安置在定制尺寸的聚苯乙烯泡沫中，並安裝在外骨骼的滑軌模組上，既便於 Wi-Fi 傳輸，又提供了穩定性和保護。

儘管本項目目前仍處於原型階段，外觀可能尚未完美，但在功能性上已經取得了顯著進展。我們期望在未來的版本中進一步提升便利性，並改善包裝整合，以展示我們對創新思維和實際問題解決的承諾。

6. 結語

我們開發了一個互動式運動輔助裝置的初步原型，將外骨骼技術與增強實境（AR）相結合。不同於醫療用途的外骨骼，我們的目標是提升一般使用者在體力活動中的力量和耐力，並降低肌肉疲勞的風險。我們希望這樣的系統可以像滑板一樣無縫融入日常生活。畢竟，人類腿部的靈活性經過多年演化，遠超過輪子在地形應對上的能力。從模型的性能來看，簡單的三層模型經過短期訓練已顯示出效果。雖然由於時間限制，目前僅訓練了步行模式，但這表明該算法框架在適配大腿步態方面的潛力。隨著 VR 眼鏡成為下一代移動設備，它提供了高度沉浸的視覺體驗，互動性遠超過智慧型手機。我們引入了虛擬教練的數位雙胞胎概念，作為運動夥伴並提供直觀的運動保護提醒，效果遠超過手機的文字警告。

7. 項目未來計劃建議



圖 23. 穿戴硬體物件於身體上的方法圖 15. 穿戴硬體物件於身體

我們計劃將 LLM 的虛擬教練對話系統集成到平台中，使用如 chatwithRTX 等方案下載至伺服器，增強虛擬教練的互動功能。我們也認識到戶外風險檢測的重要性，並計劃使運動保護系統不僅對用戶輸入有反應，也對環境線索進行響應，以提升方案的安全性和有效性。

硬體方面，為了提升使用者體驗，我們建議將無線 EMG 貼片技術整合到系統中，以便在不影響自然動作的情況下實時收集肌肉活動數據。此外，我們計劃引入 Xilinx KR260 SoM 高性能 FPGA 作為系統的運算核心，此策略將減輕伺服器的負擔，使其專注於存儲和記錄任務，同時減少 Wi-Fi 不穩定帶來的限制。預期這將提升模型推論效率和系統整體性能。此外，我們希望探索更高階的 Actor 模型，以進一步提升 EMG 特徵的捕捉能力，提高步態預測的準確性。這項研究具有改善系統在輔助用戶體力活動方面的潛力。