

# 基於 MCU 的機器學習於下肢外骨骼裝置之姿勢判別與助力時機預測



作者：莊詠安

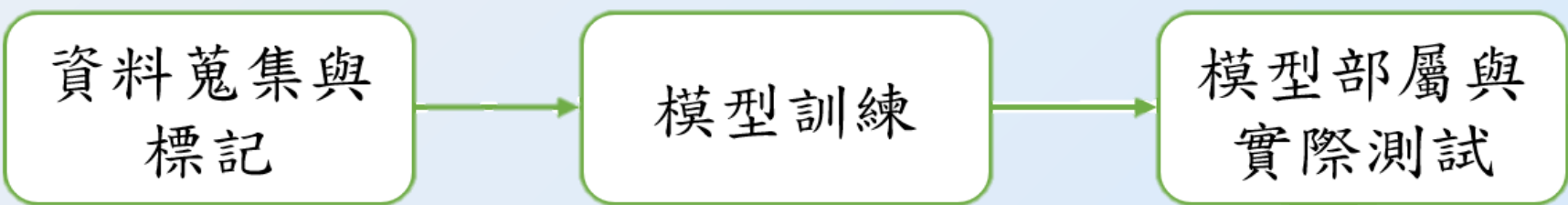
指導教授：李皇辰 教授

## 摘要

隨著高齡化社會來臨，外骨骼機器人逐漸被應用於復健、輔助行走與提升生活品質。然而現有產品往往價格高昂、穿戴不便，且在助推判斷上仍存在不精確的問題，可能造成安全疑慮。研究旨在開發一套低成本、低功耗的嵌入式助推判斷系統，專注於人體下肢動作偵測，協助外骨骼於適當時機提供助力。

## 研究流程

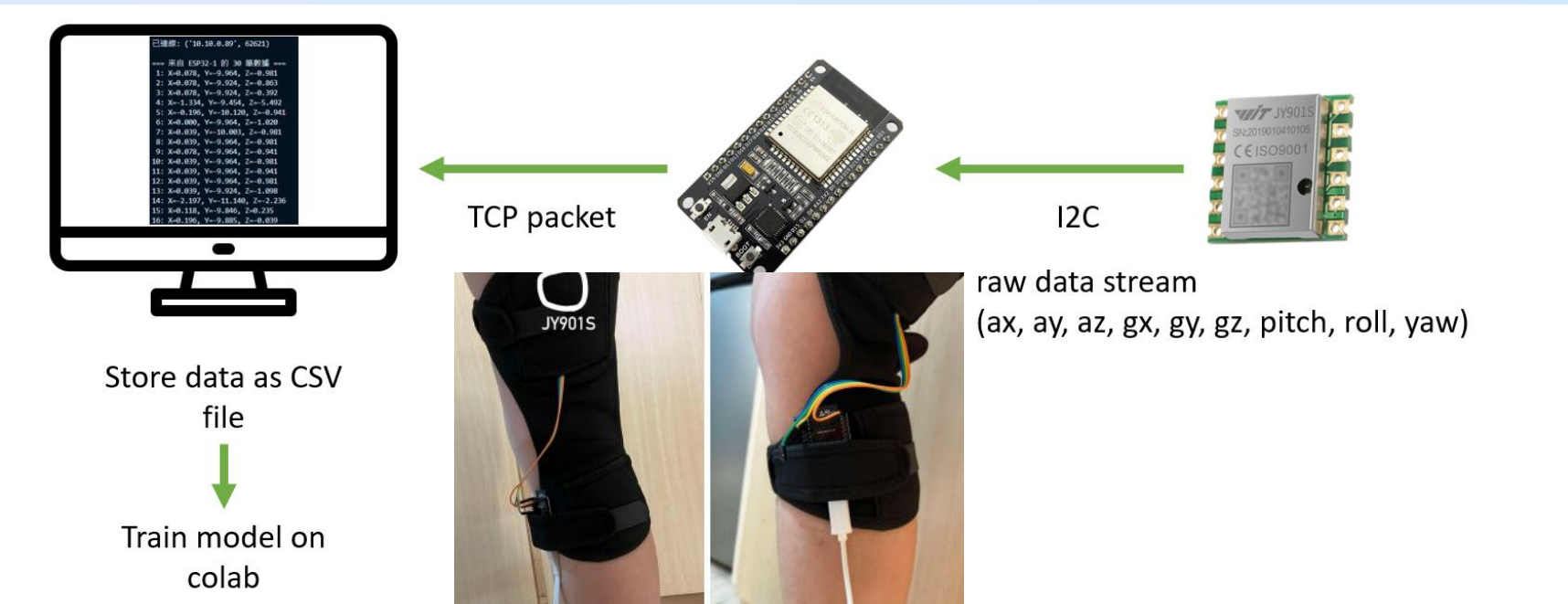
本研究流程主要分為三個階段：首先進行資料蒐集與標記，透過感測器與微控制器收集九軸數據，並於電腦端完成標記與存檔；接著進入模型訓練，在Colab進行資料前處理與機器學習模型訓練；最後進行模型部署與實際測試，將模型移植至 ESP32，進行即時推論與驗證。此三階段構成本研究的完整流程，並作為後續系統架構設計的基礎。



圖一 研究流程圖

## 硬體架構

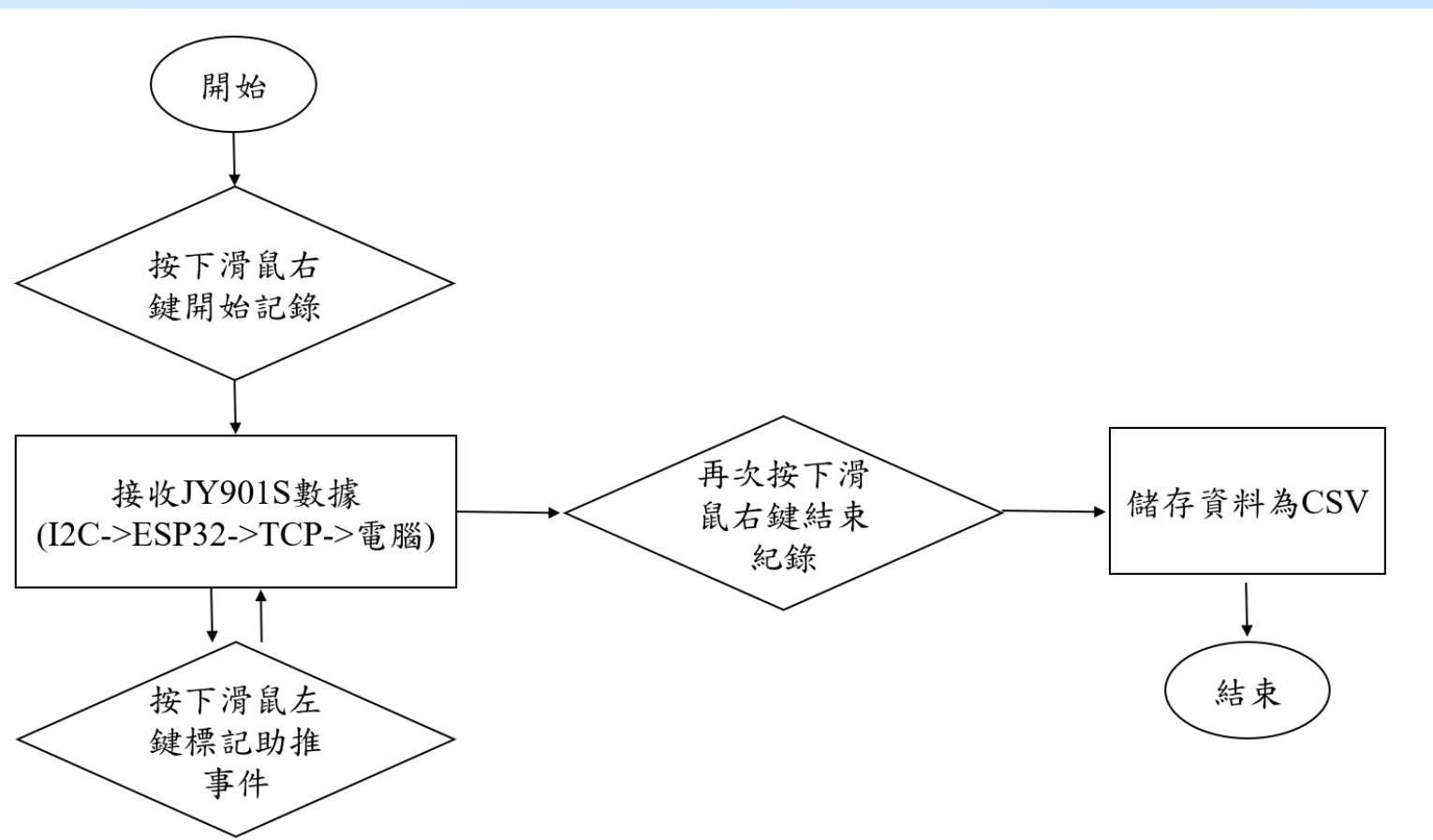
使用 JY901S 感測器讀取九項慣性感測數值，包括三軸加速度 (ax、ay、az)、三軸角速度 (gx、gy、gz) 以及三軸姿態角 (pitch、roll、yaw)。感測器透過 I2C 與 ESP32 相連，由 ESP32 即時收集並封裝為 TCP 封包傳輸至電腦，電腦端以 Python 程式接收並將資料儲存為 CSV 檔案，以利後續模型訓練，並使用護膝將JY901S綁在右腳大腿。



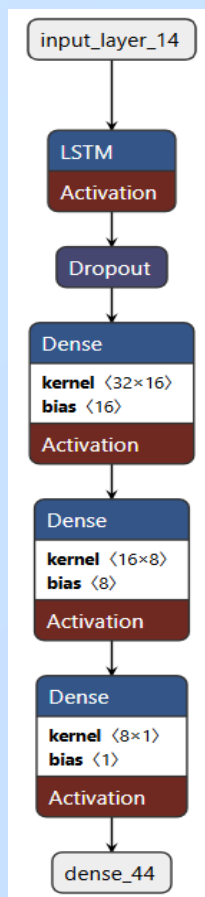
圖二 硬體架構圖

## 軟體架構

操作流程如下圖，需要與電腦端建立TCP連線，電腦上會顯示及時三軸加速度動態圖，此時可以對圖表按下滑鼠右鍵開始記錄資料，當受試者在活動時及時按下滑鼠左鍵作為輸入事件標記，使用者再次按下滑鼠右鍵，系統停止接收資料並將完整數據（含標記）存成 CSV 檔案。



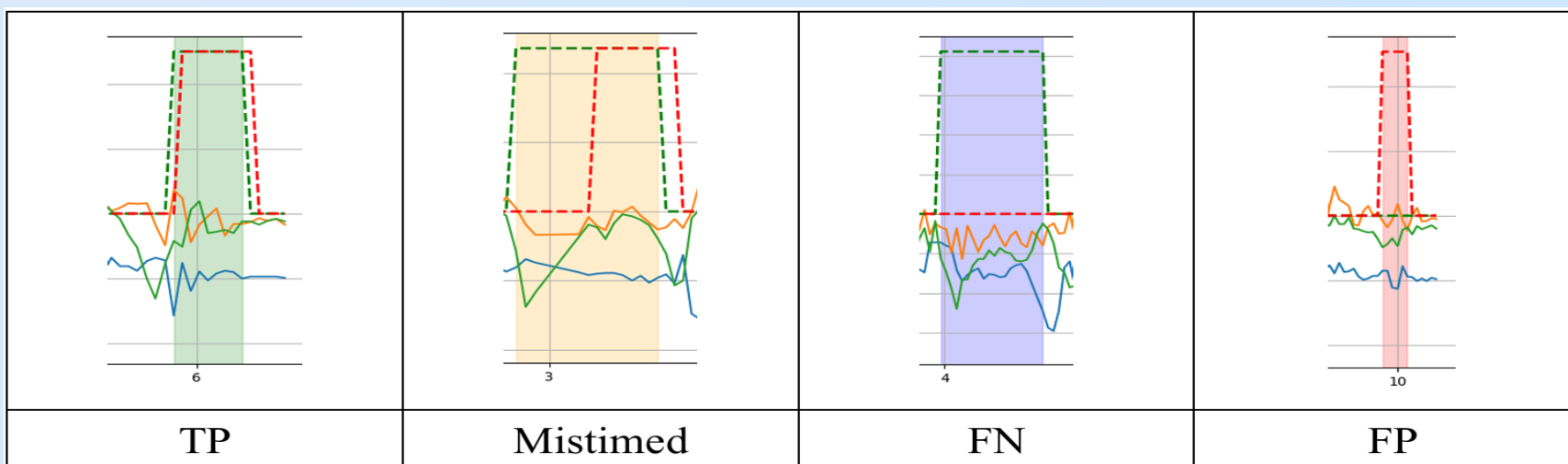
圖三 系統架構圖



圖四 模型架構圖

本研究收集選取六軸加速度與角速度作為模型輸入。資料以滑動視窗切分以保留時間動態，再經 z-score 正規化統一尺度。模型採用 LSTM（輸出維度32）擷取時序特徵，後接 Dropout(0.2) 及三層全連接層（16、8、1個神經元），最終以 Sigmoid 輸出需要助推的機率。訓練資料依受試者區分，採 K-fold 交叉驗證並以 F1-score 評估效能，最終以未參與訓練者資料驗證。使用 Early Stopping 防止過擬合，訓練準確率達約92%，驗證準確率約83%。

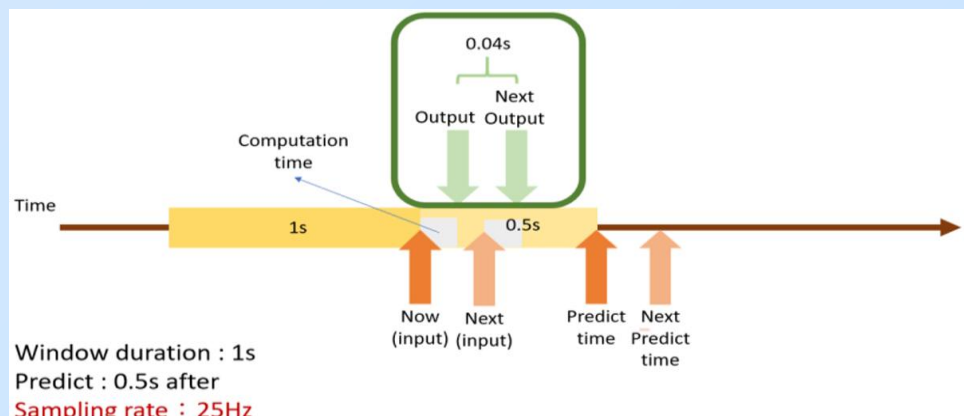
為評估模型表現，定義四項指標：TP 為正確偵測且時間誤差  $\leq 0.3$  秒；Mistimed 為偵測到但時機偏差  $> 0.3$  秒；FN 為漏偵真實事件；FP 為誤判無實際事件。下圖示意綠線為真實事件、紅線為模型預測結果。



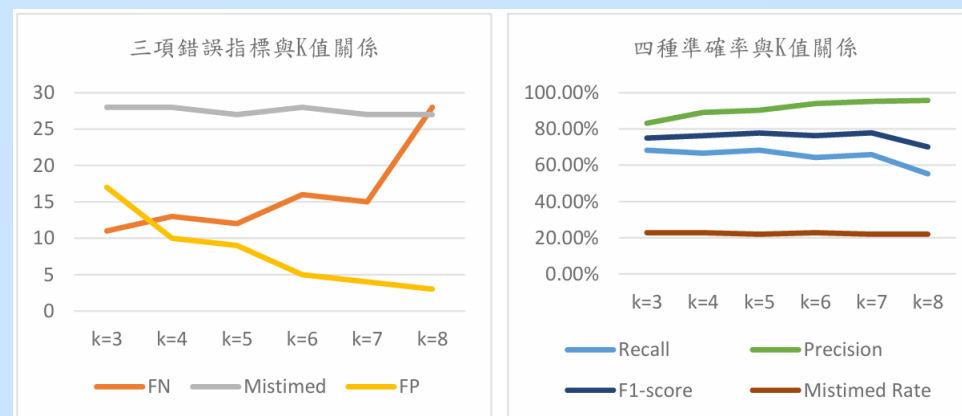
圖五 四種指標範例

## 投票機制

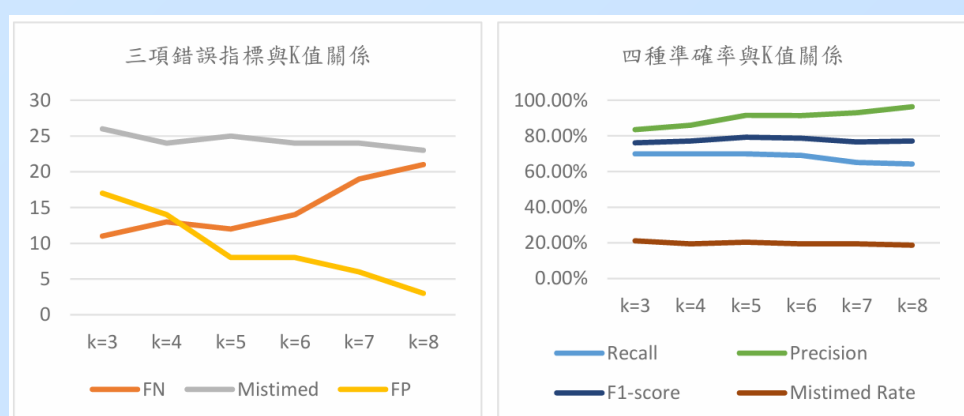
為降低假警報，模型以「前1秒資料」預測「未來0.5秒助推機率」，並比較四種平滑策略：多筆投票、滑動平均、連續k筆判定，以及雙閾值法 ( $>0.7$ 開始、 $<0.3$ 結束)。透過投票機制可有效減少間歇性誤報。



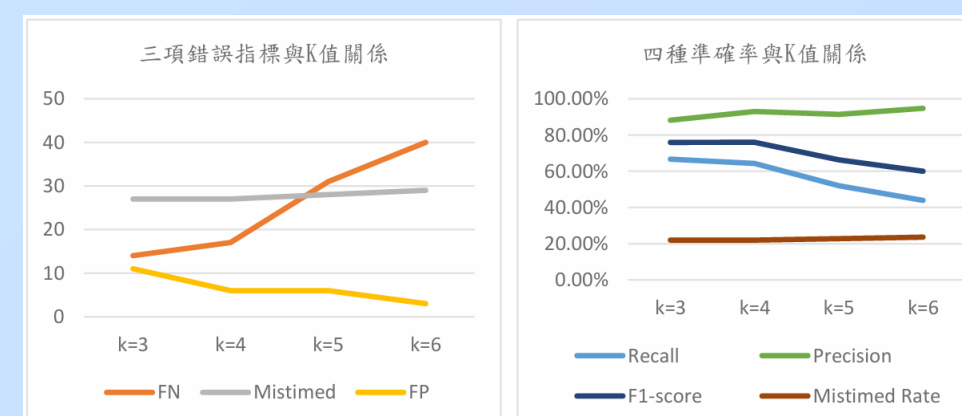
圖六 連續投票時間示意



圖七 多筆投票



圖八 滑動平均



圖九 連續k筆

個別測試完之後，將效果最顯著的滑動平均+上下閾值，稍微改變參數K後可以讓F1-score 提高到82%。

	TP	FN	MT	FP	Recall	Precision	F1-score	Mistimed Rate
k=3	87	21	15	6	70.73%	93.55%	80.56%	12.20%
k=4	88	24	11	2	71.54%	97.78%	82.63%	8.94%
k=5	80	31	12	2	65.04%	97.56%	78.05%	9.76%

## 結論

研究以ESP32搭配JY901S感測器建立下肢動作偵測系統，並利用LSTM模型判斷外骨骼機器人的助推時機。現階段已完成資料蒐集、模型訓練與初步驗證。在cross-subject分割條件下，模型於驗證集達到約83%的準確率，於獨立測試集獲得F1-score 73.68%，顯示此方法具備初步可行性。為了降低單一誤判的假警報，引入了投票機制進行後處理，初步結果顯示最佳策略可使F1-score提升至約82%，有效改善假警報對整體效能的影響。