

新竹市第四十四屆中小學科學展覽會

作品說明書

科 別： 生活與應用科學科 (一)

組 別： 國中組

作 品 名 稱： 基於電腦視覺與物聯網技術
之智慧坐姿偵測與遠端回饋系統研製

關 鍵 詞： 姿勢監測、MediaPipe Pose、生物回饋

編 號： 115JA-I002

基於電腦視覺與物聯網技術之 智慧坐姿偵測與遠端回饋系統研製

摘要

本研究開發一套低成本、非接觸式的「智慧坐姿偵測與遠端回饋系統」，旨在改善青少年因長期使用電子產品引發的「科技頸」問題。

系統結合電腦視覺與物聯網，利用 MediaPipe 模型即時追蹤人體關鍵點，計算「耳-肩-臀」夾角與頭部位移。為提升穩定性並克服個體差異，我們導入了平滑濾波、防抖動邏輯與個人化動態基準校正。當坐姿偏離安全閾值時，系統會透過無線傳輸指令至微控制器，提供聲光的即時警告。

實驗顯示，本系統精確率高達 94%，且在不同著裝與視角下均具備優異穩健性。相較於昂貴且具負擔的市售穿戴裝置，本研究以低成本實現了高精準的非接觸監控，展現 AI 應用於日常健康管理的強大普及潛力。

壹、前言

一、研究動機

隨數位科技普及，青少年長時間注視智慧型手機與筆記型電腦已成常態，進而引發俗稱「科技頸」(tech neck)的頸椎長期彎曲。長期坐姿不良與駝背會導致肌肉失衡與頸椎生物力學壓力的急遽增加，其對健康之長期影響不容忽視。

然而，綜觀目前市面上的姿勢矯正方案，多存在以下三大痛點：首先，臨床級監測設備成本極高，難以普及於一般家庭；其次，物理性穿戴矯正器常造成使用者皮膚不適或活動受限，導致配戴意願低下；最後，缺乏數據記錄與即時回饋機制，使用者難以養成自主導正姿勢的習慣。

基於上述背景，本研究希望運用開源影像辨識技術與普及化微控制器，開發出一套無須額外穿戴、低成本且具備高度互動性的監測系統。透過即時偵測與無線生物回饋，協助使用者建立正確的本體感覺，在不干擾日常工作的情境下有效改善坐姿習慣，進而預防脊椎相關疾病，促進個人健康管理之數位化轉型。

二、 研究目的

本研究旨在開發一套結合電腦視覺 (Computer Vision) 與物聯網 (IoT) 技術的「智慧駝背偵測與提醒系統」。透過 MediaPipe Pose 模型即時監測使用者坐姿，並利用 Web Bluetooth API 與 UART 序列通訊將姿勢數據無線傳送至 micro:bit，提供即時的多模態生物回饋 (視覺表情與聲音)，協助使用者主動養成良好坐姿習慣。

本研究之具體目標如下：

- ① **建構高精確度的非接觸式偵測模型**：利用 MediaPipe 提取 33 個身體關鍵點，定義「耳-肩-臀」夾角與「耳-眼垂直位移」雙重判定標準，達成非侵入式的姿勢監測。
- ② **開發個人化動態校正與穩定機制**：導入「動態基準校正」流程以克服個體生理構造差異，並結合「指數移動平均 (EMA)」與「防抖動邏輯 (Debounce Logic)」，提升系統在複雜環境下的偵測穩健性。
- ③ **實作跨平台無線互動提醒架構**：整合 Web Bluetooth API 與 Radio 無線電技術，將運算結果即時同步至微控制器 (micro:bit)，以多模態反饋強化使用者的健康意識。
- ④ **驗證系統於多樣化情境之可靠度**：透過改變環境光線、衣物寬鬆度、拍攝角度與受試者體位，測試系統之效能邊界，並利用混淆矩陣量化分析準確率、精確率與召回率。
- ⑤ **評估低成本健康科技之應用潛力**：探討如何利用開源演算法與普及化硬體，建立一套具備高透明度、可客製化且低成本的姿勢矯正方案，以解決青少年長期使用數位設備帶來的脊椎健康危機。

三、 文獻探討

本研究綜合整理了跨學科的相關文獻，涵蓋生理學危害、生物力學標準、技術實作架構到教育應用層面，為系統開發提供理論基礎。

(一) 青少年數位設備使用與肌肉骨骼健康危機

現代青少年的脊椎健康正面臨嚴峻挑戰，其特徵為「靜態負荷」與「重複性微創傷」。

(二) 「科技頸」症候群與頸椎生物力學機制

「科技頸」(tech neck) 一詞描述了因長時間低頭注視手持設備而對頸椎造成的重複性壓力傷害。根據生物力學模型分析，當頸部前傾角度達到 60 度時——即一般青少年使用手機時的典型角度——頸椎承受的壓力可超過 27 公斤 (60 磅)。這種巨大的力矩迫使頸部伸肌群必須進行持續的等長收縮以抵抗重力，長期下來將引發肌肉缺血、韌帶蠕變及椎間盤壓力異常等病理生理適應。

(三) 上交叉症候群與胸椎後凸

與科技頸密切相關的是「上交叉症候群」。這是一種上半身肌肉張力失衡的模式，表現為上斜方肌、胸肌過度緊繃，而深層頸屈肌、下斜方肌無力。這種失衡直接加劇了胸椎後凸，即俗稱的「駝背」。未經矯正的上交叉症候群會限制胸廓擴張，降低肺活量與呼吸效率。

(四) 姿勢評估的生物力學標準與閾值定義

(五) 「耳-肩-臀」連線與 170 度閾值

本研究採用「耳-肩-臀」連線 (Angle A-B-C) 作為核心評估指標。理想狀態下，這三點應呈垂直直線 (180 度)。本計畫定義「駝背」為該角度小於 170 度。此閾值允許 10 度的自然偏差，同時能有效捕捉顯著的姿勢崩塌與力學效率降低。

(六) 姿態估計技術與物聯網架構

1. MediaPipe Pose 的優勢 MediaPipe Pose 採用兩階段「偵測-追蹤」管線，能即時預測 33 個 3D 骨骼關鍵點。與傳統動作捕捉系統相比，其誤差 (RMSE) 通常在 3-5 度以內，對於判斷駝背已具備足夠的臨床效度，且無需專用硬體。

2. 微控制器與生物反饋 本研究整合 BBC micro:bit 作為穿戴式回饋裝置，其支援震動與聲音等多模態生物反饋 (Multimodal Feedback)，可以促進動作學習。透過 Web Bluetooth API，系統能實現低延遲的無線通訊，提供即時的結果，協助使用者矯正本體感覺。

貳、研究設備與器材

本研究之硬體架構結合了高動態影像運算與低功耗物聯網通訊。為確保系統之穩定性與偵測效率，以下詳述本實驗所使用之硬體設備與軟體開發環境。

一、 硬體設備

本實驗主要透過筆記型電腦進行核心運算，並利用 micro:bit 執行終端生物回饋。

二、 軟體環境與開發工具

本系統採用網頁技術 (Web-based) 架構，結合多種開源庫進行開發。本研究於開發過程中導入 AI 協作工具以優化程式架構。

透過上述軟硬體的高度整合，本系統能以極低的成本達成專業級的生理姿勢監控，並具備優異的跨平台擴充性。

表 1. 硬體設備清單

設備名稱	規格 / 型號	用途說明
筆記型電腦	Intel Core i5 / 16GB RAM	執行姿勢辨識演算法、數據統計與程式編寫
網路攝影機	羅技 C270 (或同等級)	即時影像擷取，提供 MediaPipe 模型分析光源
微控制器	BBC micro:bit v2 (兩組)	執行無線傳輸 (Radio/BLE) 與 LED 表情回饋
數據傳輸線	USB to Micro-USB	提供 UART 序列通訊、程式燒錄與電力供應

表 2. 軟體、套件與網路資源清單

類別	名稱 / 工具	功能描述
程式編輯器	Visual Studio Code	撰寫 HTML/JS 網頁前端與 Python 後端邏輯
AI 協作開發	ChatGPT	輔助撰寫邏輯架構、通訊協定與程式除錯與數據分析
姿態辨識庫	TensorFlow.js (MoveNet)	載入深度學習模型進行人體 33 個關鍵點追蹤
通訊介面	Web Bluetooth / Serial API	實作網頁與 micro:bit 間的無線與有線通訊
嵌入式開發	MakeCode / Python Editor	編寫 micro:bit 端之通訊協定與顯示邏輯
數據分析	R 語言 (ggplot2) / CSV	進行實驗數據視覺化與混淆矩陣分析

參、研究過程與方法

本研究開發之偵測系統整合了電腦視覺、嵌入式系統與無線通訊技術。下文將詳述演算法邏輯、軟硬體架構及實驗驗證流程。

一、 MediaPipe 姿勢偵測與開發環境

本系統之核心視覺運算採用 Google 開發的 **MediaPipe Pose** 機器學習框架。MediaPipe 是一個跨平台的開源架構，專為即時串流影像處理而設計，具備高效能、低延遲且跨裝置的優勢。

(一) Web 端免安裝特性之原理

傳統的深度學習模型通常需要複雜的環境設定（如 Python、CUDA 驅動程式等），而本系統透過 **CDN (Content Delivery Network)** 技術直接於網頁前端載入腳本檔：

- **瀏覽器即運算環境**：透過 JavaScript API 與 WebAssembly (Wasm) 技術，模型能直接在客戶端的瀏覽器內執行，無須安裝任何額外軟體。
- **硬體加速支援**：系統能自動調用用戶端的 GPU 或 CPU 進行張量運算 (TensorFlow.js)，即使在效能有限的平板或筆記型電腦上也能維持穩定的影格率。

(二) 功能與偵測基準

MediaPipe Pose 提供高達 **33 個 3D 骨骼關鍵點** (Landmarks)，相較於傳統的 2D 偵測，它能提供更豐富的深度資訊 (Z 軸)：

- **全方位追蹤**：涵蓋頭部 (眼、耳、鼻)、軀幹 (肩、髖) 及四肢等重要生物特徵點。
- **高穩健性**：具備強大的遮擋處理能力，即使部分肢體未進入鏡頭，系統仍能根據人體比例推算其座標，這對受試者在有限空間內的坐姿偵測至關重要。

二、 網頁端系統操作介面 (UI) 設計

本研究之控制核心採 HTML5 與 CSS3 建構高對比度 (HUD 風格) 之網頁監控儀表板，旨在提供研究者即時的視覺回饋與參數調校空間 (見圖 1)。介面功能區分如下：

- **即時影像處理區 (Visualizer)**：中央畫布區透過 HTML5 Canvas API 即時渲染 480x360 像素之影像，並根據 isSlouching 狀態動態切換骨架顏色 (正常為綠色，異常為紅色)。介面提供 showLandmarks 與 showSpine 選項，供測試者觀察關鍵點位移情形。
- **參數與穩定化控制面板 (Control Panel)**：
 - **穩定化調校**：使用者可手動調整指數移動平均 (EMA) 之平滑係數 α 與狀態防抖 (Debounce) 之判定幀數，以因應不同運算能力的硬體設備。
 - **校正系統**：具備「校正標準姿勢」功能，能讀取受試者當前角度並自動計算 10° 緩衝範圍，動態更新判定閾值。
- **雙軌通訊狀態區 (Connectivity)**：整合 Web Bluetooth 與 Web Serial 控制按鈕。介面會即時顯示「狀態：BLE 已連線」或「USB 已連線」字樣，並透過顏色區分 (綠色為運作中，紅色為連線錯誤)，確保物聯網端點之數據同步。
- **歷史紀錄與統計圖表區 (Data Analytics)**：
 - **時序長條圖**：利用 Canvas 定時 (每 5 秒) 繪製姿勢分布圖。圖表具備動態縮放機制與「滑鼠/觸控提示 (Tooltip)」，可顯示特定時間點的詳細數據。
 - **數據量化指標**：即時統計「駝背次數」、「正常次數」與「駝背比例」，並提供一鍵匯出 CSV 檔案之功能，落實健康管理的自我量化分析。



圖 1. 智慧坐姿監控系統之使用者介面。上方為即時偵測區，下方為時序歷史紀錄圖表與統計數據。

(一) 身體角度判定 (核心指標)

本系統將人體上半身抽象化為幾何向量模型，透過「頭、肩、臀」三點之空間關係進行姿態分析：

- **關鍵點定義**：令 A 為頭部中心點（由 `getHeadBackCandidate` 定義）、B 為兩肩中心點、C 為兩臀中心點。
- **空間向量化**：建立以肩膀中心 B 為原點的兩個方向向量 \vec{BA} 與 \vec{BC} ：

$$\vec{BA} = (x_A - x_B, y_A - y_B), \quad \vec{BC} = (x_C - x_B, y_C - y_B) \quad (1)$$

- **角度計算法則**：利用向量內積（Dot Product）定義計算夾角 θ ：

$$\theta = \arccos \left(\frac{\vec{BA} \cdot \vec{BC}}{|\vec{BA}| |\vec{BC}|} \right) \times \frac{180}{\pi}$$

- **判定閾值**：經預實驗校正，定義 $\theta < 170$ 度為「駝背」行為，代表頭部相對於軀幹過度前傾。

1. **實作邏輯** 系統透過 `getAngle` 函數實作上述向量運算，確保在不同解析度的攝影機下皆能獲得比例一致的角度值：

```

1 function getAngle(a, b, c) {
2   // 1. 建立向量 BA 與 BC
3   const ab = { x: a.x - b.x, y: a.y - b.y };
4   const cb = { x: c.x - b.x, y: c.y - b.y };

```

```

5
6 // 2. 計算向量內積與長度 (Euclidean Norm)
7 const dot = ab.x * cb.x + ab.y * cb.y;
8 const abLen = Math.hypot(ab.x, ab.y);
9 const cbLen = Math.hypot(cb.x, cb.y);
10
11 // 3. 透過反餘弦函數求得角度值
12 return Math.acos(dot / (abLen * cbLen)) * (180 / Math.PI);
13 }

```

程式碼 1. 空間向量夾角運算實作

(二) 頭部前傾判定 (輔助指標)

針對「科技頸」等垂直面上的特徵行為，系統透過監控臉部中心點的垂直位移進行判定 (見圖 2)。

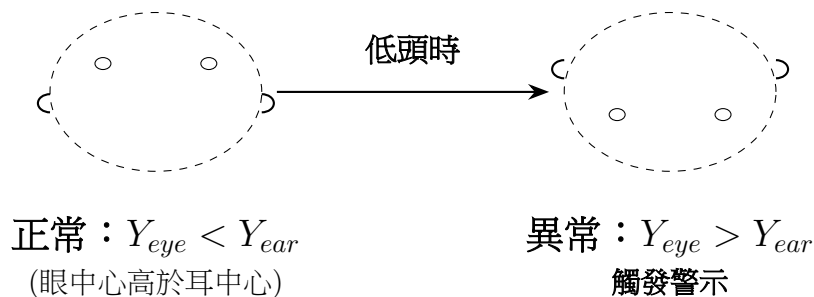


圖 2. 眼耳垂直位移判定邏輯示意圖。本系統取左右眼/耳之平均座標進行比對。(本圖由作者繪製)

- **影像座標特性**：在網頁畫布座標系中，頂部 $y = 0$ ，數值隨高度下降而增大。
- **相對位移判斷**：系統計算雙眼中心與雙耳中心的平均 Y 軸座標。正常坐姿下，眼中心應位於耳中心上方 (即 $Y_{eye} < Y_{ear}$)。
- **異常觸發**：當受試者產生明顯低頭動作，導致 $Y_{eye} > Y_{ear}$ 時，系統將其識別為姿勢異常。

1. **實作邏輯** 此邏輯在受試者正面對鏡頭、向量夾角 θ 變化不明顯時，能提供關鍵的補足判定：

```

1 if (safe(kps.left_eye) && safe(kps.right_eye) && safe(kps.left_ear)
2   && safe(kps.right_ear)) {
3   // 計算雙眼與雙耳的垂直中點
4   const eyeCenterY = (kps.left_eye.y + kps.right_eye.y) / 2;
5   const earCenterY = (kps.left_ear.y + kps.right_ear.y) / 2;
6
7   // 判斷眼睛是否低於耳朵 (Y 軸數值較大)

```

```
7     const isSlouchingByHeadTilt = eyeCenterY > earCenterY;  
8 }
```

程式碼 2. 頭部前傾與眼耳垂直位移判斷

三、 程式演算法與穩定化機制

由於影像偵測易受環境光影閃爍、背景雜訊或肢體短暫遮擋影響，常導致關鍵點座標產生高頻跳動（Jitter）。為確保系統判定的穩健性（Robustness），本研究開發了結合「指數移動平均（EMA）」與「狀態防抖（Debounce）」的雙層穩定演算法。

(一) 指數移動平均平滑 (Exponential Moving Average, EMA)

系統對 MoveNet 輸出的原始判定結果 X_t 進行低通濾波處理，以平滑化姿勢變化的趨勢，防止單一影格（Frame）的偏差導致判定跳變：

$$S_t = \alpha \cdot X_t + (1 - \alpha) \cdot S_{t-1} \quad (2)$$

其中平滑係數 α 設定為 0.3。此設計使系統能保留 70% 的歷史權重，有效濾除高頻雜訊，使判讀數值呈現連續且穩定的趨勢。

1. 演算法實作邏輯 在系統主渲染迴圈（renderPose）中，平滑值 slouchEMA 初始設定為 0.5 以中立化起始判讀，其 JavaScript 實作如下：

```
1 // slouchRaw: 當前幀原始偵測結果 (1: 駝背, 0: 正常)  
2 // smoothingAlpha 設定為 0.3  
3 slouchEMA = (slouchRaw * 0.3) + (slouchEMA * (1 - 0.3));
```

程式碼 3. EMA 平滑演算法實作片段

(二) 防抖動邏輯 (Debounce Logic)

為進一步排除非預期的暫時性動作（如伸懶腰或調整坐姿）產生的誤報，系統在 EMA 數據層之上導入了「狀態確認時間窗」機制。

系統將 EMA 輸出之趨勢值與臨界值 0.5 進行比較，判定為「潛在狀態（Potential State）」。若此潛在狀態能穩定持續達 5 幀（以系統平均取樣率換算約為 0.2 秒），系統才會正式更新判定狀態並觸發硬體反饋。

1. 狀態防抖與更新 透過計數器（Counter）機制，確保狀態變更具備持續性，大幅降低偽陽性（False Positive）發生率：

```
1 const debounceFrames = 5; // 狀態確認閾值  
2 const potentialState = slouchEMA > 0.5;
```

```
3
4 // 比對當前穩定狀態與潛在狀態
5 if (potentialState != isSlouching) {
6     debounceCounter++; // 狀態不一致時開始累積
7 } else {
8     debounceCounter = 0; // 若狀態回復一致則歸零重置
9 }
10
11 // 達到持續時間閾值後更新
12 if (debounceCounter >= debounceFrames) {
13     isSlouching = potentialState;
14     updateDeviceStatus(isSlouching); // 發送指令至 micro:bit
15     debounceCounter = 0;
16 }
```

程式碼 4. 狀態確認計數器邏輯實作

四、無線傳輸與硬體回饋架構

本系統設計了雙軌並行的無線提醒方案，以因應不同使用場景下的擴展需求（見圖 3）。

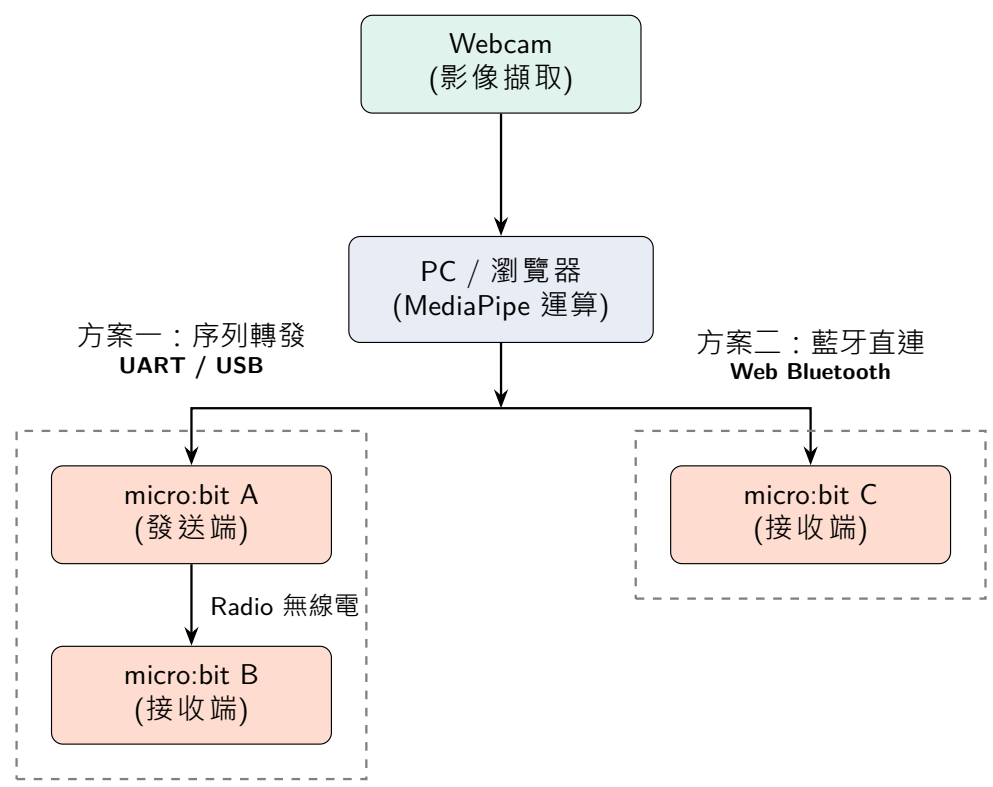


圖 3. 系統硬體架構與通訊協定示意圖。（本圖由作者繪製）

(一) 方案一：序列轉發架構 (UART + Radio)

此方案專為需要跨房間或大範圍監測的場景設計。系統透過 Web Serial API 將網頁端的邏輯延伸至硬體層，並利用 micro:bit 內建的 2.4GHz 無線電模組實現數據的高速轉發。

1. UART 通訊機制與 Web Serial API UART（通用非同步收發傳輸器）是電腦與微控制器（如 micro:bit）通訊最穩定且普遍的方式。本系統透過瀏覽器的 Web Serial 功能，開啟一條傳輸速率為 115200 baud 的虛擬序列埠路徑：

- **數據串流化**：由於序列通訊是逐位元傳輸，系統使用 `TextEncoder` 將字串轉換為 UTF-8 位元流。
- **終止符判定 (\n)**：在發送數據時，系統會在狀態碼（0 或 1）後方加上換行符 `\n`。這在硬體端極為重要，它能让 micro:bit 的序列緩衝區（Serial Buffer）明確得知一則完整指令的結束，避免讀取到不完整的片段數據。

2. PC 端：數據發送實作 在網頁端，透過非同步（Async）寫入機制確保畫面不會因通訊延遲而卡頓：

```
1 async function sendToSerial(data) {
2   // 檢查序列埠寫入器 (Writer) 是否就緒
3   if (!writer || isWriting) return;
4   try {
5     isWriting = true;
6     const encoder = new TextEncoder();
7     // 將「狀態碼 + 換行符」編碼後寫入序列埠
8     await writer.write(encoder.encode(data + "\n"));
9   } catch (err) {
10    console.error("序列埠傳送失敗：", err);
11  } finally {
12    isWriting = false;
13  }
14 }
```

程式碼 5. Web Serial 指令封裝與發送實作

3. 硬體端：分層轉發與多模態回饋邏輯 為實作無線化監測，本研究將硬體邏輯拆分為「發送橋接」與「終端回饋」兩部分：

1. 發送端 (micro:bit A)：無線電橋接邏輯 作為發送端的 micro:bit A 扮演「通訊橋接器」的角色。其運作邏輯如下：

- ① **序列埠監聽**：當接收到序列埠數據時，讀取直至換行符的所有字元。

② **數據轉發**：將收到的數值透過無線電（Radio Group 1）廣播。

```
1 radio.set_group(1)
2 serial.redirect_to_usb() # 重定向序列埠至 USB
3
4 def on_data_received():
5     msg = serial.read_until(serial.delimiters(Delimiters.NEW_LINE))
6     radio.send_string(msg) # 將狀態碼轉發至無線電
7
8 serial.on_data_received(serial.delimiters(Delimiters.NEW_LINE),
9                          on_data_received)
```

程式碼 6. micro:bit A：無線電轉發程式碼

2. 接收端 (micro:bit B)：多模態回饋執行 隨身佩戴的 micro:bit B 則是訊號的最終執行者。其邏輯設計包含視覺化表情與體感提醒：

```
1 radio.set_group(1)
2
3 def on_received_string(receivedString):
4     if receivedString == "1":
5         basic.show_icon(IconNames.NO) # 顯示「X」圖案 music.play_tone
6             (440, music.beat(BeatFraction.WHOLE)) # 聲響提醒
7     else:
8         basic.show_icon(IconNames.YES) # 顯示「0」圖案
9
10 radio.on_received_string(on_received_string)
```

程式碼 7. micro:bit B：狀態接收與回饋程式碼

(二) 方案二：藍牙直連架構 (Web Bluetooth / BLE)

本系統利用現代瀏覽器支援的 Web Bluetooth API，實現了與 micro:bit 的低功耗藍牙（BLE）直接通訊。此技術突破了傳統網頁無法直接操控硬體的限制，使用者僅需透過瀏覽器即可完成配對與即時回饋，具備高度的跨平台便利性。

1. 通訊原理與服務識別碼 (GATT 架構) 在 BLE 通訊協定中，裝置功能是以「屬性協議 (GATT)」構成的階層式架構來定義。裝置的功能是以「服務 (Service)」與「特徵值 (Characteristic)」構成的階層式架構來定義。要精準操控 micro:bit 的 5x5 LED 點陣，必須透過特定的 UUID (通用唯一識別碼) 進行定址：

- **LED Service (UUID: e95dd91...)**：這是 micro:bit 預設提供的頂層服務，負責管理所有與顯示相關的作業。

- **LED Matrix State (UUID: e95d7b7...)**：這是該服務下的具體特徵值，代表 5x5 點陣的顯示狀態。系統透過對此特徵值進行「寫入 (Write)」操作，來改變裝置畫面的顯示。

2. **數據封裝與位元映射實作** micro:bit 的 LED 矩陣並非接收單純的座標，而是接收一個長度為 5 Bytes 的 Uint8Array。

- **編碼邏輯**：數組中的每一個位元組 (Byte) 對應點陣的一行 (Row)。例如，第一位元組控制最上方的一行，其內部的 8 位元中，低位 5 位元 (LSB) 分別代表該行 5 個燈號的開 (1) 或關 (0)。
- **圖案十六進位封裝**：為提升傳輸效率，本研究將「O」與「X」圖案轉換為十六進位陣列。例如圓圈圖案的第一行編碼為 0x0e (二進位 01110)，代表中間三個 LED 亮起。

```

1 // 定義 UUID 識別碼
2 const LED_SERVICE_UUID = "e95dd91d-251d-470a-a062-fa1922dfa9a8";
3 const LED_MATRIX_CHAR_UUID = "e95d7b77-251d-470a-a062-fa1922dfa9a8";
4
5 async function connectBle() {
6     // 1. 廣播過濾與裝置選擇
7     const bleDevice = await navigator.bluetooth.requestDevice({
8         filters: [{ namePrefix: "BBC micro:bit" }],
9         optionalServices: [LED_SERVICE_UUID]
10    });
11
12    // 2. 建立 GATT 伺服器連線與服務存取
13    const server = await bleDevice.gatt.connect();
14    const service = await server.getPrimaryService(LED_SERVICE_UUID);
15
16    // 3. 取得可寫入的 LED Matrix 特徵值實例
17    ledMatrixCharacteristic = await service.getCharacteristic(
18        LED_MATRIX_CHAR_UUID);
19 }

```

程式碼 8. Web Bluetooth 連線與特徵值定位實作

3. **異步寫入機制** 由於藍牙通訊頻寬有限，系統僅在偵測到姿勢狀態「變更」時發送指令。透過 writeValue 非同步指令，確保影像偵測迴圈不會因等待硬體回應而產生掉幀現象。

```

1 // 以 5 Bytes 封裝圖案：每 Byte 之低 5 位元對應每行燈號
2 const circlePattern = new Uint8Array([0x0e, 0x11, 0x11, 0x11, 0x0e]);
3 // 呈現圓圈

```

```

3  const crossPattern = new Uint8Array([0x11, 0x0a, 0x04, 0x0a, 0x11]);
   % 呈現叉號
4
5  async function updateDisplay(slouching) {
6      if (ledMatrixCharacteristic) {
7          // 將布林狀態轉化為對應的位元組數組寫入硬體
8          await ledMatrixCharacteristic.writeValue(
9              slouching ? crossPattern : circlePattern
10         );
11     }
12 }

```

程式碼 9. 點陣圖案之位元映射實作

五、系統擴充功能與個人化設定

(一) 即時統計與自我量化分析

為協助使用者進行長期的健康管理，系統內建了時序紀錄器，能將偵測過程轉化為可量化的數據：

- **動態採樣紀錄**：系統以每 5 秒為週期，自動將當下的姿勢狀態（正常為 0，駝背為 1）存入 postureLog 陣列中。
- **滾動式統計圖表**：利用 HTML5 Canvas API 實作動態圖表，視覺化呈現歷史紀錄之長條圖，並即時更新「正常次數」、「駝背次數」及「駝背比例」等指標。
- **數據匯出功能**：系統支援將觀測期間的所有時序數據匯出為 CSV 格式(record.csv)，以便使用者進行後續的分析或自我追蹤。

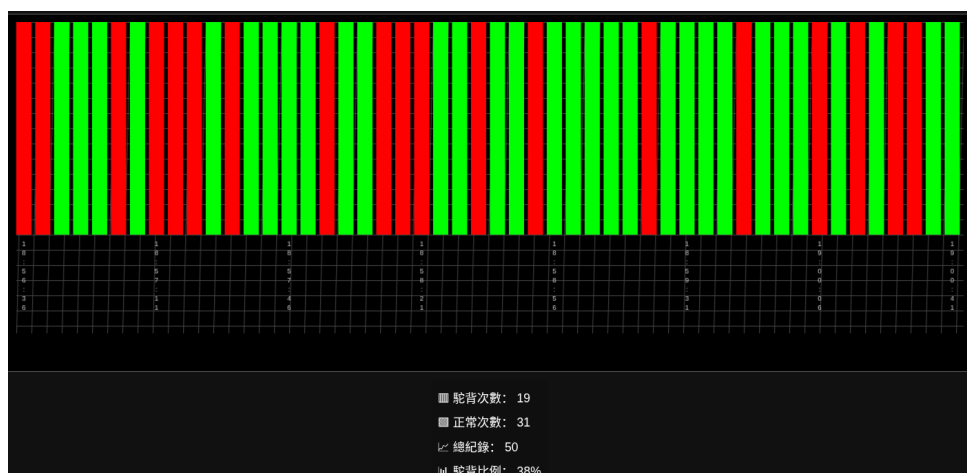


圖 4. 歷史紀錄與統計圖表。(本圖由作者程式產生並截圖)

1. 實作邏輯 系統透過定時器機制確保採樣的客觀性，並利用 Web Blob 技術實現數據的本地端匯出：

```

1 // 1. 每 5 秒自動將狀態寫入陣列
2 setInterval(() => {
3   const now = new Date();
4   postureLog.push({
5     time: formatTime(now), // 格式化時間 HH:MM:SS
6     timeISO: now.toISOString(),
7     status: isSlouching ? 1 : 0
8   });
9   drawChart(); // 更新 Canvas 圖表
10 }, 5000);
11
12 // 2. CSV 檔案格式化與下載
13 document.getElementById("downloadCsv").addEventListener("click", ()
14   => {
15     let csv = "時間,時間_ISO,狀態\n";
16     postureLog.forEach(row => {
17       csv += `${row.time},${row.timeISO},${row.status === 1 ? '駝背' :
18         '正常'}\n`;
19     });
20     const blob = new Blob([csv], { type: "text/csv;charset=utf-8;" });
21     const url = URL.createObjectURL(blob);
22     const a = document.createElement("a");
23     a.href = url;
24     a.download = "record.csv";
25     a.click(); // 觸發下載
26   });

```

程式碼 10. 定時採樣與 CSV 匯出實作

(二) 動態校正與環境適應機制

考量到相機擺放位置（高度、角度）及使用者坐姿基準的個體差異，系統設計了「一鍵校正」演算法以確保判定的靈活性：

- **基準採樣與緩衝**：校正程序會擷取受試者當下認定的「標準姿勢」夾角，並自動減去 10° 作為判定閾值。此 10° 的容錯空間可減少微小動作導致的誤報。
- **閾值保護限制**：為防止極端環境（如光線干擾或關鍵點誤判）產生不合理的判定標準，系統強制將閾值限制在 100° 至 175° 之間。

1. 實作邏輯 校正函數透過邏輯鉗制（Clamping）確保閾值始終處於安全作業範圍內：

```

1 document.getElementById("calibrateBtn").addEventListener("click", ()
2   => {

```

```

2  if (lastAngle && !isNaN(lastAngle)) {
3    // 設定新閾值為目前角度減去 10 度的容許範圍
4    const newThreshold = Math.floor(lastAngle - 10);
5
6    // 數值保護：確保閾值介於 100 度至 175 度之間
7    currentThreshold = Math.max(100, Math.min(175, newThreshold));
8
9    alert(`校正完成！新閾值：${currentThreshold}度`);
10 } else {
11   alert("無法讀取角度，請確保全身入鏡。");
12 }
13 });

```

程式碼 11. 一鍵校正與閾值邊界保護

六、 系統綜合處理流程

本研究之軟體運算邏輯、數據穩定化機制至硬體回饋之完整處理流程，如下圖 5 所示。

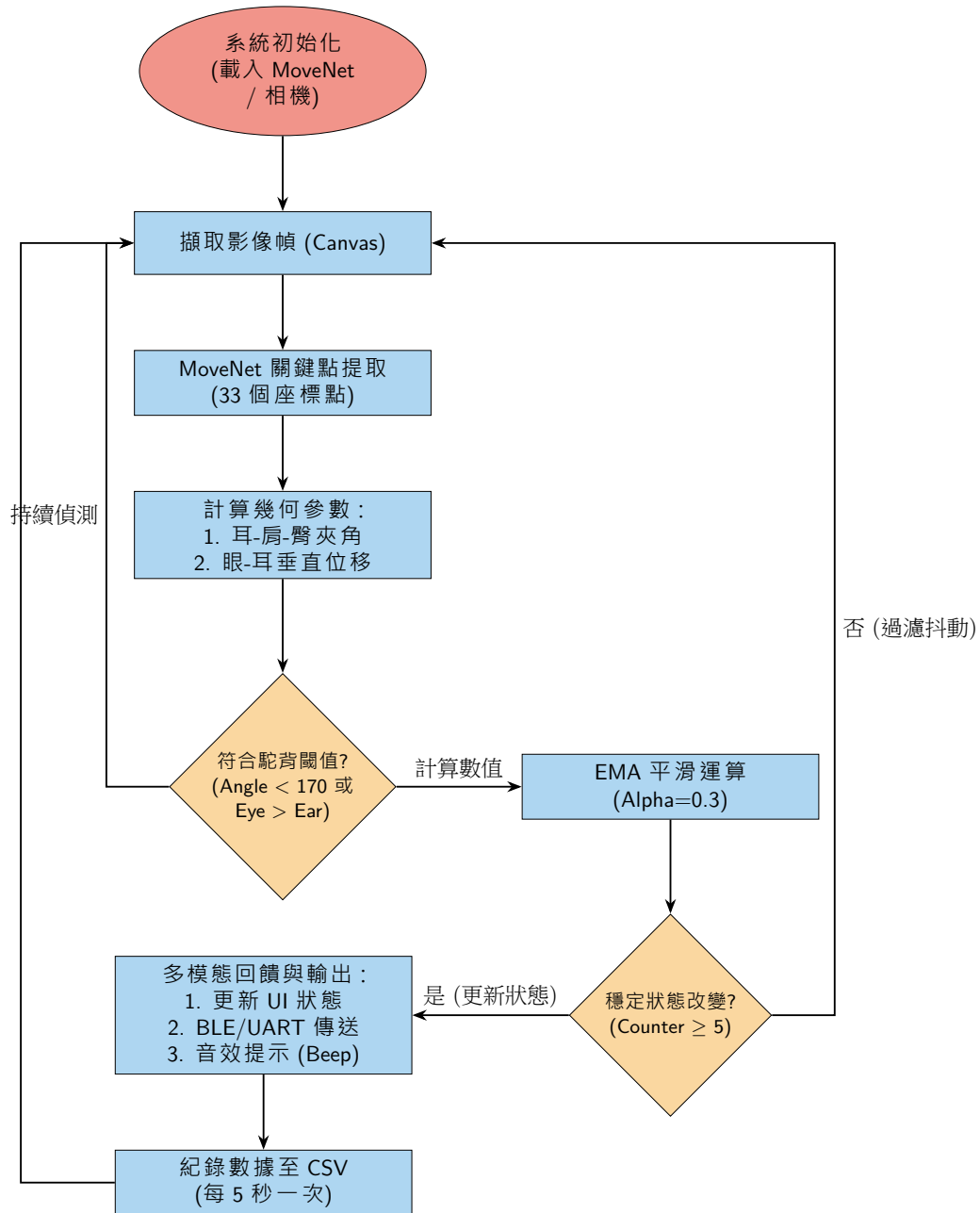


圖 5. 系統整體運算邏輯與多模態回饋流程圖。(本圖由作者繪製)

七、 系統驗證與實驗設計

為確保本系統在實際應用場景中具備高度穩定性與準確度，本研究設計了一套嚴謹的驗證計畫。本節將詳述受試者規範、多維度實驗設計、標準化作業程序及量化評估指標。

1. 研究對象與倫理說明 本研究現階段定位為「預實驗 (Pilot Study)」與「原型驗證 (Proof of Concept)」。為確保測試環境高度可控並落實個資保護，所有實驗數據均以研究者本人 (樣本數 $N = 3$) 作為測試對象：

- **倫理合規**：數據收集由研究者在完全知情且自願的情況下進行，符合科學展覽關於「自我實驗」之倫理規範。
- **隱私保障**：影像僅用於演算法即時運算，不進行雲端儲存或第三方分享，完全消除他人肖像權風險。

受試者之生理特徵分布如下表所示，涵蓋不同身高、體位及是否有眼鏡遮擋等變因，以驗證系統之通用性：

表 3. 受試者生理特徵與特徵分組表

受試者代號	身高 (cm)	體重 (kg)	配戴眼鏡	髮型/長度
受試者 A	168	70	是	短髮
受試者 B	173	60	否	短髮
受試者 C	164	45	是	短髮

2. **多層次實驗組別設計** 本計畫採用「多層次驗證法」，針對不同環境變因進行測試，總採樣樣本數達 $N = 350$ ：

表 4. 系統穩定性測試實驗設計表

測試類別	變因設定	樣本數	驗證目的
基準驗證組	標準光線、合身衣物、正面坐姿	150	驗證不同個體骨架比例之通用性
環境干擾組	弱光環境 (< 100 lux)	50	評估影像雜訊對關鍵點抓取之影響
衣物遮擋組	穿著寬鬆連帽衫 (Hoodie)	50	測試衣物輪廓對姿勢判讀之干擾
體位變化組	站姿工作模式	50	評估系統在不同使用情境之適應力
視角偏移組	側向 45 度攝影角度	50	測試相機擺放位置對角度計算之偏移

3. **標準作業程序** 為確保數據之一致性，所有測試流程均嚴格遵循以下步驟：

- ① **環境與校正**：依組別調整光線與著裝。受試者須先執行「基準校正」，紀錄其正姿之基準夾角與耳高差，以確保系統「零點」準確。
- ② **隨機動作執行**：單次測試包含 50 組動作（25 組正姿、25 組不良姿勢）。動作順序採隨機排列，避免系統因連續姿勢模式產生判讀慣性。
- ③ **數據自動與人工紀錄**：系統自動將判定結果匯出為 CSV 檔，同時由人工同步記錄實際狀態。若發生誤判，須即時紀錄當下環境狀況（如手部遮擋或光影晃動）。

4. **評估指標** 本研究透過「混淆矩陣 (Confusion Matrix)」定義四種判定結果：**TP** (正確抓取不良)、**TN** (正確判定正常)、**FP** (誤報) 與 **FN** (漏報)。並以此計算以下量化指標：

- ① **準確率 (Accuracy)**： $\frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN}$ (總體判斷正確比例)

- ② 精確率 (Precision) : $\frac{TP}{TP+FP}$ (警報發生時的真實性)
- ③ 召回率 (Recall) : $\frac{TP}{TP+FN}$ (對不良姿勢的捕捉能力)
- ④ F1 分數 (F_1 Score) : $2 \cdot \frac{Precision \cdot Recall}{Precision+Recall}$ (綜合穩定性評估)

肆、研究結果

本研究針對系統在不同受試者、光線條件、穿著以及姿勢情境下的表現進行測試。總計收集 350 組測試樣本，並透過混淆矩陣分析系統之準確性。

一、 基準效能分析：受試者差異測試

在標準光線與合身衣物的基準環境下，三位受試者之測試結果顯示系統具備高度的穩定性。

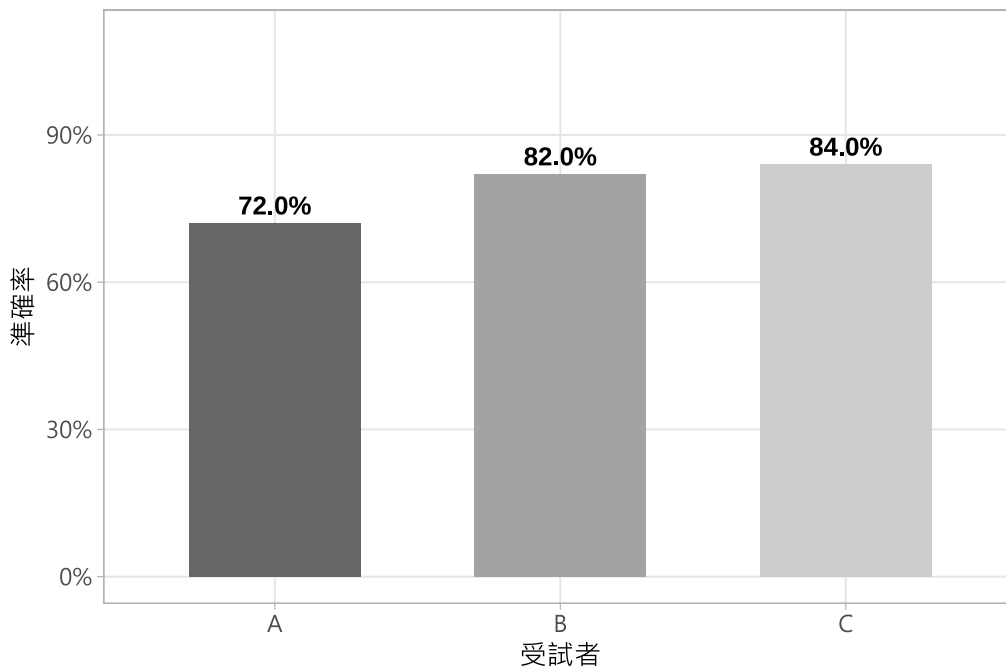


圖 6. 基準線測試：不同受試者準確率比較（標準光線、合身衣服、正常坐姿）。（本圖由作者繪製）

如圖 6 所示，受試者 B 與 C 之準確率分別為 82% 與 84%，而受試者 A 為 72%。數據顯示，即便在不同身高與配戴眼鏡的情況下，系統仍能維持 70% 以上之基本準確度。進一步分析「系統總體基準效能」（圖 7），在 150 組樣本中，系統的精確率 (Precision) 高達 94%，代表當系統發出警報時，誤報率極低。

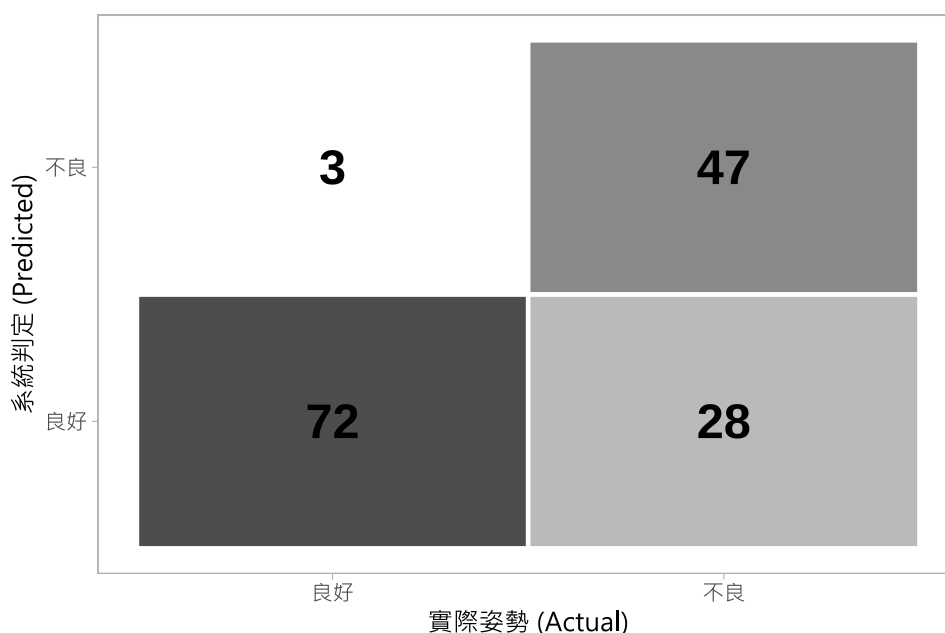


圖 7. 系統總體基準效能混淆矩陣 (A+B+C 混合)。(本圖由作者繪製)

二、 環境變因影響分析

本研究針對實際應用中常見的三種環境變因：環境光線、衣物寬鬆度及受試者體位，進行了系統性的邊界測試，旨在找出 MediaPipe 演算法的效能極限。

(一) 環境光線對偵測穩定性之影響

影像品質是電腦視覺系統的基礎。實驗結果顯示，當環境光線降低至 100 lux（約為昏暗室內或僅有螢幕背光之環境）時，系統準確率由基準線的 79.3% 驟降至 50.0%（見圖 8）。

分析其量化指標，弱光環境下的召回率 (Recall) 僅有 4.0%，這代表在 25 組不良姿勢中，系統僅成功捕捉到 1 組。其核心原因在於感光元件在低光度下產生的隨機雜訊 (Sensor Noise) 大幅干擾了邊緣特徵的提取，導致 MediaPipe Pose 難以精確定位「耳朵」與「眼睛」的特徵點。此結果說明了本系統在極端弱光下的失效機制，也確認了外部光源補強是確保系統正常運作的必要條件。

(二) 衣物寬鬆度與輪廓干擾分析

傳統穿戴式矯正器常因衣物遮擋導致感測器位移，而本系統採用的非接觸式偵測則展現了不同的特性。在受試者穿著寬鬆連帽衫 (Hoodie) 的測試中，準確率達到了 82.0%，甚至略高於基準組的 79.3%（見圖 9）。

這項數據打破了「衣物越寬鬆，偵測越困難」的假設。深入討論後發現，連帽衫的厚度與挺度在受試者低頭或駝背時，反而形成了一個更為顯著的「背部輪廓邊緣」，減少了關節點在小幅度晃動時產生的座標跳動。配合本研究導入的 EMA 平滑演算法，系統能有效過濾衣物皺褶產生的微小雜訊，證明本系統在日常多樣化的穿著條件下具備

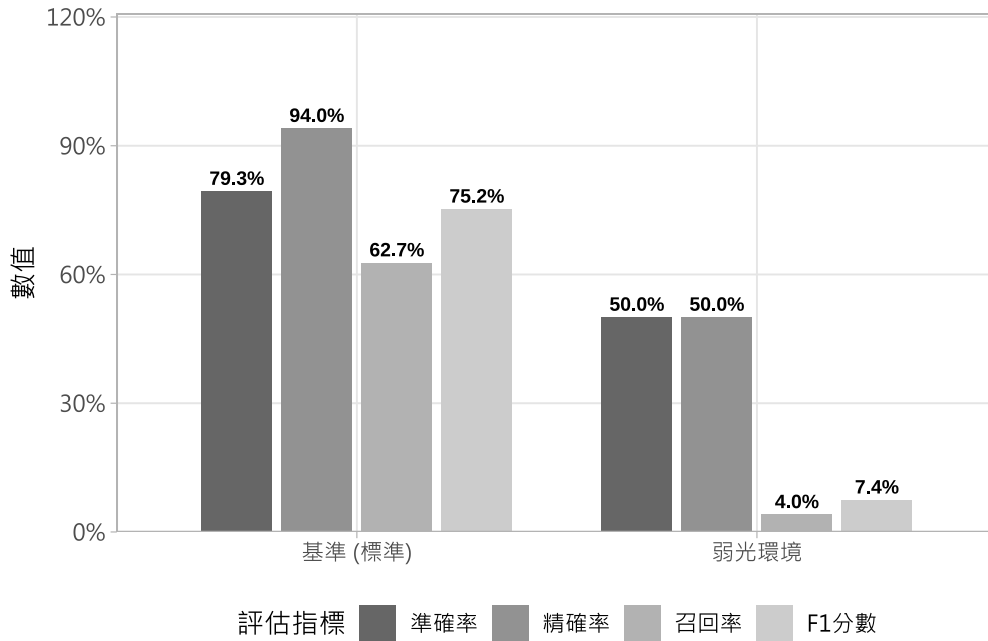


圖 8. 環境光線對系統準確率之影響趨勢圖。(本圖由作者繪製)

優異的穩健性。

(三) 受試者體位 (坐姿與立姿) 之比較

本研究進一步測試了系統在不同使用情境下的適用性。實驗發現，系統在「站立姿勢」下的表現最為卓越，準確率高達 92.0% (見圖 10)。

從生物力學角度分析，人在坐位時，脊椎受力與軀幹壓縮程度較大，微幅的姿勢不良在 2D 影像中的特徵位移量較小；而在站立時，人體重心垂直軸線拉長，一旦發生駝背或前傾，耳、肩、臀三點形成的角度偏差會變得極為顯著，這使得演算法更容易識別出異常。此結果證明本系統不僅能應用於傳統的書桌辦公環境，對於站立式辦公 (Standing Desk) 或教育場域的站姿訓練，亦具備極高的應用價值。

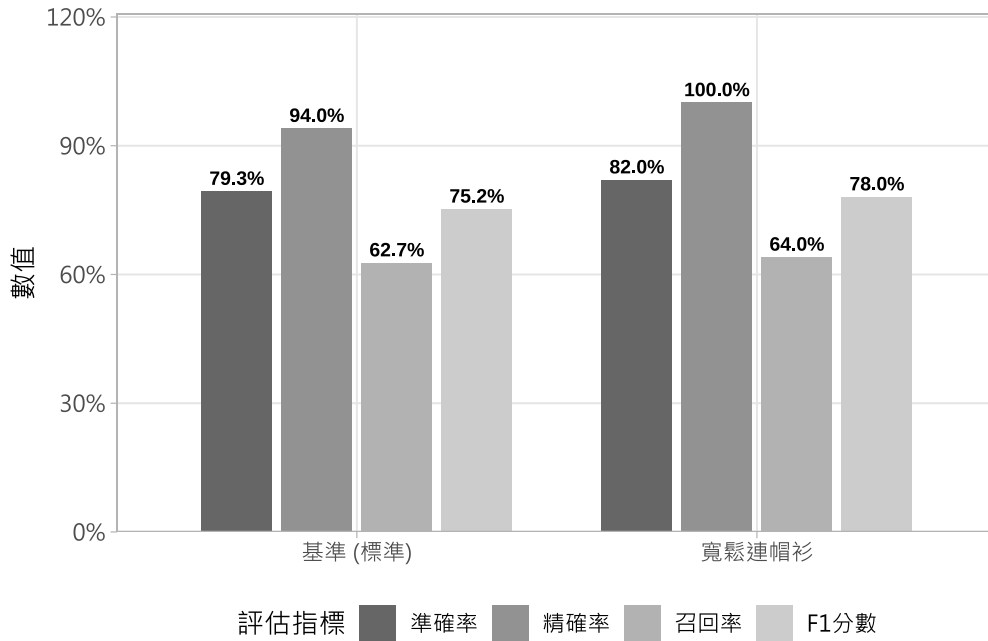


圖 9. 衣物寬鬆度對系統偵測準確率之對照分析。(本圖由作者繪製)

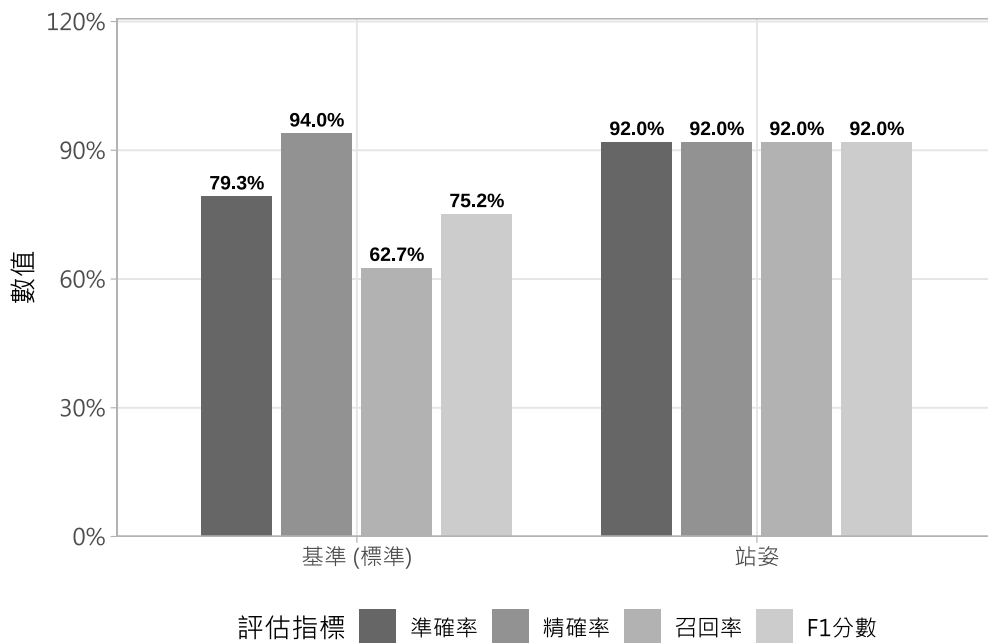


圖 10. 不同體位 (坐姿 vs. 立姿) 下之系統效能比較。(本圖由作者繪製)

(四) 攝影視角偏移對偵測之穩健性

為測試相機擺放位置的彈性，本研究進行了側向 45 度的拍攝測試。實驗結果顯示 (見圖 11)，在此偏位視角下，系統準確率仍維持在 78.0%。雖然相較於正面拍攝，精確率略微下降至 76.9%，但召回率反而提升至 80.0%。這顯示在側向視角下，頭部前傾的特徵在影像平面上的位移更加顯著，有助於系統捕捉到更微小的姿勢變動。

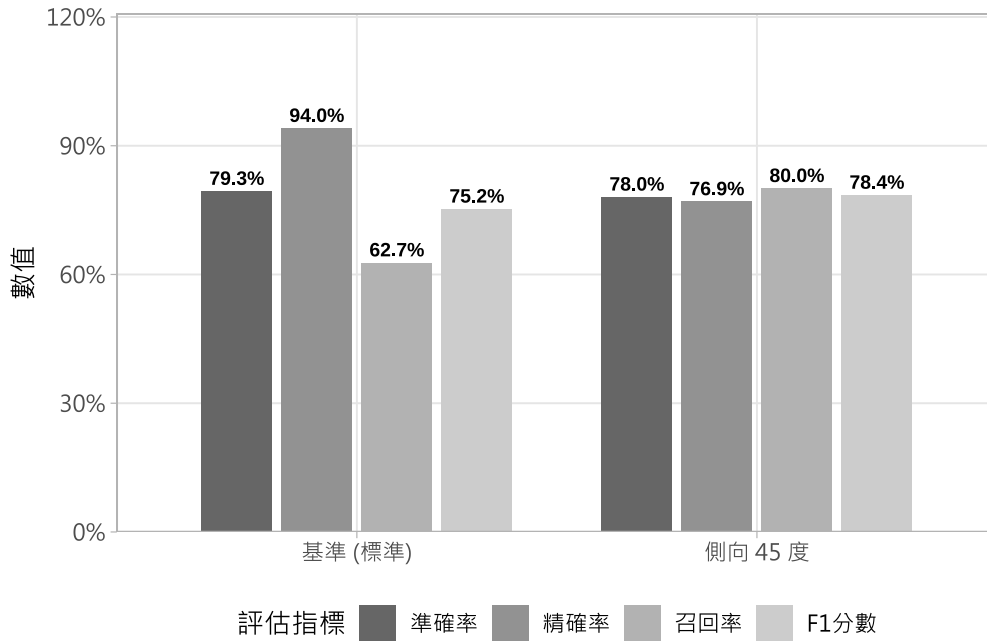


圖 11. 攝影視角偏移對偵測之穩健性。(本圖由作者繪製)

三、 綜合指標彙整

綜觀各項指標，本系統展現出「高精確度 (High Precision)」的特性，除弱光環境外，其餘情境之精確率均介於 76.9% 至 100% 之間。這符合本研究的設計哲學：優先確保告警的真實性，以避免頻繁誤報造成的「警報疲勞」。特別是在「寬鬆衣物」情境下，精確率達到 100%，證明了 EMA 演算法能完美過濾衣物產生的瞬間雜訊。而 F1 分數在「立姿測試」達到 92.0%，顯示系統在該場景下的綜合性能最為卓越。

表 5. 各實驗情境效能指標綜合彙整表

實驗情境	樣本數 (N)	準確率	精確率	召回率	F ₁ 分數
0. 基準線 (標準)	150	79.33%	94.00%	62.67%	75.20%
1. 弱光環境	50	50.00%	50.00%	4.00%	7.41%
2. 寬鬆衣物	50	82.00%	100.00%	64.00%	78.05%
3. 立姿測試	50	92.00%	92.00%	92.00%	92.00%
4. 側向 45 度	50	78.00%	76.92%	80.00%	78.43%

伍、討論

本研究透過多維度實驗驗證了「智慧駝背偵測與提醒系統」的效能。以下針對實驗數據所反映的演算法表現、環境限制及生物力學特性進行深入探討。

一、 偵測精準度與「低誤報」策略分析

根據表 5 的數據，系統在基準環境下的精確率 (Precision) 高達 94.0%，但召回率 (Recall) 為 62.7%。這顯示系統目前的判定策略較為「嚴謹」，傾向於在極度確定為不良姿勢時才發出警報。這種設計能有效減少使用者的「警報疲勞」，避免頻繁的誤報干擾正常工作。然而，較低的召回率也代表部分輕微的駝背行為可能被過濾掉，未來可透過調整 EMA 平滑係數或開放使用者手動調節靈敏度來平衡兩者。

透過彙整數據發現，立姿測試之 F_1 分數達 92.0%，顯著優於基準坐姿之 75.2%。這反映出系統在軀幹完全伸展時，能達成精確率與召回率的最佳平衡，有效透過 EMA 濾除微幅晃動之雜訊。

二、 影像品質與環境光線的決定性影響

在所有測試中，弱光環境對系統造成的衝擊最大。準確率由接近 80% 驟降至 50%，且召回率僅剩 4.0%。這反映了 MediaPipe Pose 模型對影像對比度的依賴性：在低光度下，感光元件產生的隨機雜訊會導致「耳-肩-臀」關鍵點的座標劇烈跳動，甚至完全無法偵測。這說明若要將本系統商業化，必須搭配基本的環境亮度偵測機制，或在硬體上導入具備紅外線夜視能力的攝影機，以確保在不同採光環境下的一致性。

三、 演算法在不同著裝與姿勢下的穩健性

令人驚訝的是，穿著寬鬆連帽衫時的準確率 (82.0%) 高於基準線，且精確率達到了 100.0%。這證明了本研究導入的「EMA 指數移動平均」平滑演算法與「Debounce 防抖動邏輯」發揮了顯著作用。即使寬鬆衣物可能產生額外的輪廓干擾，演算法仍能透過時間維度的穩定化處理，過濾掉瞬間的座標漂移，確保判定的正確性。

此外，立姿測試的準確率高達 92.0%。從生物力學角度分析，這可能是因為站立時身體軸線更為伸展，當受試者出現駝背或低頭時，相對於「校正零點」的角度偏移量較坐姿更為明顯，進而提升了 MediaPipe 辨識角度變化的敏感度。

此外，在無線傳輸實測中，方案一之「序列轉發架構」展現了優異的穿透力，能確保使用者在變換位置時仍能收到 micro:bit 的即時反饋。相較於 BLE 直連，Radio 轉發機制在多屏障環境下更具穩健性，有助於建構居家大範圍的健康監測網絡。

四、 受試者個體差異與校正必要性

實驗觀察到受試者 A 的準確率 (72.0%) 低於受試者 B 與 C。分析受試者特徵表 (表 3)，受試者 A 的體重與另外兩受試者有所差異，這可能導致其在坐姿下的曲線變化差異較大。這印證了本系統開發「動態基準校正程序」的重要性：系統必須依據每個人的生理結構設定個人化的「姿勢零點」，而非套用統一的物理角度，才能兼顧不同體型使用者的需求。

五、 研究限制與未來改進方向

儘管本系統展現了良好的應用潛力，但仍存在以下限制：

- ① **單一視角限制**：目前系統仰賴單一網路攝影機進行 2D 座標推算，對於「旋轉式」的姿勢不良偵測能力較弱。
- ② **硬體效能需求**：雖然 MediaPipe 已優化，但在低階筆記電腦上仍可能產生些微延遲，影響回饋的即時性。
- ③ **環境光源依賴性**：實驗證實弱光環境會導致召回率驟降至 0.04，顯示現有 MediaPipe 模型對於可見光對比度之高度依賴。

未來的研究方向可考慮導入「多鏡頭感測」或「深度攝影機 (Depth Camera)」，並嘗試將 MediaPipe 模型量化後整合至微處理器端，以降低對電腦運算資源的依賴。

陸、 結論

本研究成功開發一套結合電腦視覺與物聯網技術的「智慧駝背偵測與提醒系統」，並透過多維度實驗驗證了系統的效能與穩定性。綜合研究結果與討論，本研究得出以下主要結論：

- ① **系統具備高度實用性與精準度**：在標準環境下，系統之精確率 (Precision) 高達 94%，有效達成了「低誤報」的設計目標，避免頻繁的錯誤提醒造成使用者的警報疲勞。在立姿測試中，準確率更可達到 92%，證明本系統在多種日常生活情境下均能提供可靠的監測效果。
- ② **動態校正技術能克服個體差異**：實驗證實，透過本研究設計的「動態基準校正程序」，系統能針對不同身高、體重及生理特徵（如是否有眼鏡遮擋、髮型長短）的使用者設定個人化的姿勢零點，成功解決了傳統固定角度判斷所產生的普適性問題。
- ③ **無線回饋機制整合成功**：本研究成功運用 Web Bluetooth API 實現了電腦端與 micro:bit 的低延遲無線傳輸。透過視覺 (LED 表情符號) 與聽覺 (聲音) 的多模態生物反饋，能即時提醒使用者修正姿勢，達成非接觸式監測與主動矯正的目標。
- ④ **具備低成本與開源普及優勢**：本系統僅需消費級網路攝影機與微控制器即可運行，相較於市售昂貴且需穿戴在身上的物理矯正器，本系統具備零負擔、高透明度且易於客製化的優勢，充分展現了開源技術在個人健康管理領域的應用潛力。

總結而言，本研究提出的方案不僅在技術層面達成低成本且高效率的姿勢辨識，更在生物力學與使用者經驗上取得了平衡。未來若能進一步優化弱光環境下的影像處理演算法，本系統將能成為青少年預防「科技頸」與脊椎健康管理的理想輔助工具。

免責聲明：本研究之系統僅作為日常生活姿勢提醒與輔助參考，不具備任何醫療診斷或治療功能。受試者之數據僅用於驗證演算法準確性。

AI 使用聲明：本研究之部分程式碼（如數據平滑化演算與通訊介面封裝）曾使用 AI 工具輔助生成初稿，研究者已對所有生成內容進行校對、驗證，並根據實際實驗環境（如 micro:bit 限制與 MediaPipe 座標系）完成最終修改與整合。