國立勤益科技大學工業工程與管理系

114 學年度實務專題競賽

專題題目：鋁合金壓鑄產業人機危險狀態交集偵測與主動式預警系統研究

摘要

鋁壓鑄產業屬於高溫且機械快速運作之高風險製造環境，作業人員若於作業過程中誤入危險區域，容易造成夾捲、燙傷、跌倒或其他職業災害。為提升鋁壓鑄現場工安監測之即時性與可追溯性，本研究以鋁壓鑄作業現場為對象，建置一套結合人體姿態辨識、危險區域判斷與即時警示之工安風險辨識系統。

本系統以電腦視覺技術為核心，透過攝影機擷取作業現場影像，並利用 MediaPipe Pose 擷取作業人員之人體骨架關鍵點與姿態特徵。系統依據人體關鍵點座標、軀幹角度、人體高寬比例、移動速度及危險區域內關鍵點數量，判斷作業人員是否出現跌倒、靜止於危險區域或進入警戒範圍等狀態。危險區域則以多邊形座標方式設定，並透過人體關鍵點是否落入該區域進行風險判斷，以降低單一姿態判斷可能造成的誤判情形。

系統部署於樹莓派（Raspberry Pi 5）邊緣運算裝置上，使影像擷取、姿態辨識、風險判斷與警示輸出能於現場即時完成。當系統判定為跌倒或靜止於危險區域等高風險狀態時，將透過畫面提示、蜂鳴器聲響及 Telegram 訊息通知等方式發出警示，並同步建立 CSV 紀錄，保存事件發生時間、狀態、危險區域內關鍵點數量、軀幹角度、移動速度與人體高寬比例等資料。

本研究透過實際場域測試，評估 MediaPipe Pose 於鋁壓鑄環境中的姿態辨識穩定性，以及邊緣運算平台進行即時風險監測之可行性。研究結果顯示，結合人體姿態、危險區域與移動狀態之多條件判斷方式，可提升風險辨識的合理性，並作為傳統製造業導入智慧工安監測系統之參考。未來可進一步結合手部虛擬電子圍籬與機台運作狀態，使系統對人機互動風險之判斷更加完整。

The aluminum die-casting industry operates in a high-risk, high-risk environment with high-temperature and fast-moving machinery. If workers accidentally enter dangerous areas during work, they can easily suffer coil jamming, burns, falls, or other occupational injuries. To enhance the real-time and traceability of industrial safety monitoring at aluminum die casting sites, this study focuses on the aluminum die casting operation site and establishes a safety risk identification system that integrates human posture recognition, hazard area assessment, and real-time warning.

This system is centered on computer vision technology, capturing on-site images through cameras and employing MediaPipe Pose to capture key points and posture features of workers' human skeleton. Based on the coordinates of key points in the human body, torso angle, body height-to-width ratio, movement speed, and the number of key points within the hazardous zone, the system determines whether operators have fallen, become stationary in the danger zone, or entered the alert zone. Hazardous zones are set using polygonal coordinates, and risk assessment is made by checking whether a key human point falls into

that area, reducing misjudgments from a single posture.

The system is deployed on Raspberry Pi edge computing devices, enabling real-time on-site image capture, posture recognition, risk assessment, and warning output. When the system determines a person is in a high-risk state, such as falling or being stationary in a dangerous area, it issues alerts via screen prompts, buzzer sounds, and Telegram messages, and simultaneously creates CSV records to preserve data such as the time of occurrence, status, number of key points in the danger zone, torso angle, movement speed, and body height-to-width ratio.

This study evaluates the stability of MediaPipe Pose in posture recognition in the aluminum die-casting environment through real-world field testing, as well as the feasibility of real-time risk monitoring on the edge computing platform. The research results show that combining multiple criteria for judging human posture, hazardous areas, and movement status can improve the rationality of risk identification and serve as a reference for introducing smart industrial safety monitoring systems in traditional manufacturing. In the future, it can further integrate hand virtual electronic fences with machine operation status to make the system's assessment of human-machine interaction risks more complete.

關鍵字：*鋁壓鑄作業安全、人體姿態辨識、危險區域判斷、邊緣運算、即時警示系統*

前言

本研究旨在解決鋁壓鑄產業中，因高溫環境、機械快速運作及人員接近機台作業所衍生的工安風險。鋁壓鑄現場常涉及高溫熔融金屬、快速作動之機械設備與狹小作業空間，若作業人員因疲勞、疏忽或現場視線受阻而誤入危險區域，可能造成夾捲、燙傷或跌倒等職業災害。傳統工安防護多仰賴實體護欄、連鎖裝置及作業規範，但在實際產線中，仍可能受到作業需求、設備配置或人為因素影響，使防護效果受到限制。因此，本研究期望建立一套能即時辨識現場風險的輔助系統，以提升鋁壓鑄作業環境中的安全管理能力。

本研究以電腦視覺技術作為核心，建置一套結合人體姿態辨識、危險區域判斷與即時警示之工安風險辨識系統。系統透過攝影機擷取鋁壓鑄作業影像，並利用 MediaPipe Pose 擷取作業人員之人體骨架關鍵點，再依據人體關鍵點位置、軀幹角度、人體高寬比例與移動速度等特徵，判斷作業人員是否出現跌倒、靜止於危險區域或進入警戒範圍等狀態。當系統偵測到異常風險時，會透過畫面顯示、蜂鳴器警報、Telegram 通知與CSV紀錄等方式進行警示與事件保存。

本研究之特色在於將人體姿態資訊與危險區域位置進行整合，不僅能判斷畫面中是否有人，也能進一步分析人員是否接近或進入高風險範圍。相較於單純依靠人工巡視或事後監視器回放，本系統可於現場即時產生風險判斷，並將相關數據保存作為後續追蹤依據。未來若能進一步取得機台運轉訊號，亦可將開模、合模、頂出或射出等機台狀態納入判斷，使系統從影像式風險辨識擴展為更完整的人機互動安全監測架構。

一、研究動機與研究目的

近年來，工安事故仍時常出現在新聞報導中，例如工廠爆炸、機械夾捲、火災、燙傷及作業人員受傷等事件。這些事故顯示，工安問題並非單一產業才會面臨，而是許多製造現場都可能存在的共同風險。對製造業而言，一旦作業環境中同時具有高溫、機械快速運作與人員近距離操作等條件，若缺乏即時監測與警示機制，便可能在短時間內造成嚴重職業災害。因此，如何透過技術輔助現場安全管理，降低事故發生的可能性，成為本研究關注的核心。

本研究動機亦受到鋁鑄相關工安事件之啟發。過去新聞曾報導高雄佳豐鋁業發生爆炸事故，並造成嚴重傷亡，使本研究團隊更加重視鋁鑄與鋁壓鑄產業中的作業風險。鋁鑄產業並非只是一般傳統製造業，其作業環境涉及高溫熔融金屬、機台運轉、模具作動與人員近距離操作。若現場防護不足，

或作業人員因疲勞、疏忽、趕工、維修或清理作業而接近危險區域，便可能產生夾捲、燙傷、跌倒或其他嚴重危害。

鋁壓鑄現場具有明確的人機互動風險。作業人員在取件、檢查、清理或設備調整過程中，常需要靠近壓鑄機台，而機台本身具有模具快速開合、高溫及機械作動等危險特性。當人員的手部或身體誤入危險區域時，事故往往可能在數秒內發生，單靠人工巡視或事後監視器回放，難以及時避免危害。因此，鋁壓鑄作業現場需要一套能即時辨識人員位置、姿態與危險區域關係的輔助系統，以提升現場安全管理的即時性。

雖然鋁鑄與鋁壓鑄現場通常設有護欄、防護裝置與作業規範，但在實際作業中，仍可能因趕工、維修、清理、取件或人員疏忽，使原有防護效果降低，形成安全管理上的空窗。這些危險情境通常發生迅速，若現場沒有即時提醒機制，便可能錯失預防事故的時機。因此，本研究希望以電腦視覺與人體姿態辨識技術作為基礎，建立一套可於現場即時運作之工安風險辨識系統。

基於上述動機，本研究選擇鋁鑄業作為工安研究對象，並以鋁壓鑄現場作為主要應用情境。本研究場域以勝弘金屬股份有限公司之鋁壓鑄作業現場為例，透過攝影機擷取作業影像，結合人體姿態辨識、危險區域判斷與即時警示機制，分析作業人員是否出現進入警戒區、靜止於危險區域或疑似跌倒等風險狀態，期望建立一套符合實際場域需求的智慧工安監測輔助系統。

研究目的如下：

- 建立適用於鋁壓鑄現場之即時工安預警系統
- 部署於邊緣裝置並建立多元警示機制

二、文獻回顧與探討

本研究針對工業安全領域相關研究進行整理與分析，並聚焦於鋁壓鑄產業之作業風險與其防護需求。首先探討作業人員與機台操作過程中所產生之人機互動風險，說明傳統工安防護方式在實務應用上的限制。接續回顧電腦視覺與人體姿態辨識技術於工業場域之應用，分析其在行為監測與危險偵測方面之發展現況。

在風險辨識方法上，整理以空間區域判斷與人體關鍵點分析為基礎之相關研究，作為本研究建構危險區域判斷之參考。針對異常事件偵測，進一步探討跌倒偵測與姿態異常判斷之技術發展，作為本研究姿態分析方法之依據。

最後，綜合相關文獻之研究成果與限制，說明本研究以座標式區域判斷結合姿態辨識之技術方向，並導入邊緣運算架構與即時警示機制，以建立適用於鋁壓鑄作業環境之工安監測系統，作為後續系統設計與方法建構之基礎。

2.1 工業安全風險評估與鑄造業現況

製造業長期以來被視為高風險環境，尤其是所謂的「3D 產業」（髒、亂、險）。Machado et al. (2023) 指出，冶金工業中的鑄造製程涉及高溫（熔爐溫度常超過 1300°C）、有害化學品以及人因工程風險，若缺乏有效的管理工具（如石川圖或 GUT 矩陣），極易發生燒燙傷或化學中毒等嚴重事故。

Singh (2012) 針對印度鑄造業的研究發現，作業人員在模具製造與金屬澆鑄過程中，常因不當姿勢（Awkward Postures）導致嚴重的肌肉骨骼傷害（MSDs）。Khurram et al. (2025) 則強調，傳統依賴人工巡檢與被動防護（如護欄、安全門）的方法，往往受限於人為疏忽或蓄意違規（如繞過連鎖裝置），難以應對動態變化的現場風險。因此，開發具備主動監測能力的智慧工安系統已成為產業升級的關鍵。

2.2 電腦視覺與行為監測技術

電腦視覺（Computer Vision, CV）技術因具備非接觸、廣域覆蓋且能長時間運作之優點，已成為智慧化工廠的核心監測工具。Ahn et al. (2023) 提出之 **SafeFac** 系統，利用 YOLOv3 演算法輔以 RGB 直方圖預處理與餘弦相似度後處理，實現了在有限計算資源下支持 16 支攝影機的即時人體偵測，準確率高達 99.93%。

在行為監測方面，Liao (2025) 整合了 Lightweight OpenPose 與多層感知器（MLP），開發出能同時辨識身分（MTCNN + FaceNet）與五種人體姿勢（站、坐、蹲、跪、跌倒）的異常事件檢

測系統。Vukicevic et al. (2023) 則透過 3D 姿態估計與網格分類器（MeshCNN），進一步提升了在複雜動作（如推拉、鑽孔）中的不安全行為辨識率。

2.3 人體姿態辨識與人因工程

姿態辨識技術除了安全預警外，亦廣泛應用於預防職業傷害。Lee & Lee (2022) 提出之 **SEE** 系統，結合卷積姿態機（CPM）與 REBA 評估法，使管理者能透過智慧型手機即時獲得作業姿勢之風險等級與改善建議。

在建築與重工業領域，Purushothaman & Gedara (2025) 研發之智慧視覺方法（SVBM），利用 33 個骨架節點分析人體軀幹與頸部的傾斜角度，旨在減少手動搬運過程中的肌肉骨骼傷害。Lee et al. (2023) 亦證實，基於 **ResNet-50** 的姿態估計演算法能有效在動態場域中提供穩定的即時監控性能。

2.4 情境感知與人機協作防護

情境感知（Context-Awareness）係指系統能理解環境、物件與人類意圖之關聯性。Liu & Wang (2021) 提出一種無碰撞協作架構，透過深度學習辨識人員姿勢，使機器人能根據作業情境動態規劃路徑，而非僅是盲目停止運動。

Wang et al. (2024) 則開發出一種結合第一人稱視角（First-Person View）與手勢辨識的兩流網絡（Two-stream Network），使機器人能理解工人的操作意圖並據此提供輔助。此外，Quintas et al. (2018) 強調，將互動工作流納入決策系統，能有效降低人工智慧在不確定環境（如光線變化）下的誤判率。

2.5 跌倒偵測與異常識別系統

跌倒偵測是工安監控中最關鍵的功能之一。Chen et al. (2020) 提出利用 OpenPose 提取骨架點，並透過髖關節中心下降速度、中心線與地面夾角及外接矩形寬高比等三大參數進行判讀，成功率達 97%。

Lau et al. (2022) 則探討了多種深度神經網絡架構（如 LSTM、GRU、CNN）在跌倒預測中的表現，發現具備注意力機制的 GRU 架構能獲得最佳的準確度。然而，現有系統在實際應用中仍面臨遮擋（Occlusion）與光線干擾等挑戰，需結合機台狀態或其他感測器進行雙重驗證。

2.6 文獻回顧小結

綜合上述文獻，雖然電腦視覺與情境感知技術已有顯著進展，但仍存在以下研究缺口：

1. **場域干擾問題：** 多數研究聚焦於「乾淨」的室內或建築工地環境，鮮少針對鑄造廠等高煙霧、高反光、高熱輻射之環境進行實證。
2. **機台資訊整合：** 現有視覺系統多僅分析「人的行為」，較少將「機台運作週期（如 PLC 訊號）」與人體姿態進行時空關聯分析，易產生誤報。
3. **異質訊號融合：** 目前缺乏針對高速自動化機台與人員間「安全距離動態維持」的雙重驗證機制。

基於此，本研究提出結合「影像式姿態辨識」與「機台 PLC 狀態訊號」之具情境感知能力的主動式工安防護系統，以填補上述研究空白。

三、研究方法

本研究以鋁壓鑄作業現場為應用場域，透過攝影機擷取作業人員與機台周邊影像，並利用人體姿態辨識技術擷取作業人員之骨架關鍵點。系統將影像輸入至邊緣運算裝置進行即時分析，並依據人體姿態、移動速度與危險區域位置建立風險辨識邏輯，以判斷作業人員是否出現跌倒、靜止於危險區域或進入警戒範圍等狀態。

本研究採用「實驗式技術可行性評估」、「危險行為判斷邏輯建構」及「系統效能評估」三階段進行，逐步驗證影像式姿態辨識技術於鋁壓鑄場域中的可行性、風險判斷邏輯之適用性，以及系統於邊緣運算設備上執行之即時反應能力。整體流程包含影像擷取、人體關鍵點偵測、危險區域比對、異常狀態判斷、警示輸出與資料紀錄，藉此建立一套可用於鋁壓鑄現場之工安風險辨識系統。

3.1、鋁壓鑄環境影像蒐集與技術可行性評估

本研究首先針對鋁壓鑄作業環境進行影像資料蒐集與分析，透過實地場域觀察與現場影像，掌握

機台周邊作業範圍、人員移動路徑及可能產生風險的位置。鋁壓鑄環境具有高溫、設備運作頻繁、作業區域狹小及人員需接近機台操作等特性，若作業人員於不適當時機進入危險區域，可能產生夾捲、燙傷或跌倒等風險。因此，本研究以影像式監測方式評估人體姿態辨識技術應用於此類場域之可行性。

在技術選擇上，本研究採用 MediaPipe Pose 進行人體姿態辨識，擷取作業人員之鼻子、肩膀、手肘、手腕及臀部等核心骨架關鍵點。透過這些關鍵點的位置變化，系統能夠判斷作業人員之身體位置、姿態變化及是否進入危險區域。由於 MediaPipe Pose 具備運算速度快與即時處理能力，適合部署於 Raspberry Pi 等邊緣運算設備，符合本研究現場即時監測之需求。

為確認系統於實際場域中的穩定性，本研究針對影像辨識情形、人體關鍵點擷取穩定度、畫面反應速度及異常狀態判斷結果進行測試。系統於每次偵測時會更新人體關鍵點位置，並將判斷結果即時顯示於畫面中，同時記錄相關數據，作為後續風險判斷邏輯調整與系統效能分析之依據。

3.2、系統整體流程設計

本研究系統流程主要分為六個步驟，分別為影像擷取、人體姿態辨識、特徵參數計算、危險區域判斷、異常狀態分類，以及警示與紀錄輸出。系統啟動後，攝影機會即時擷取鋁壓鑄作業現場影像，並由程式進行影像尺寸調整與畫面顯示。接著，系統透過 MediaPipe Pose 取得人體骨架關鍵點，並依據關鍵點座標進行後續判斷。

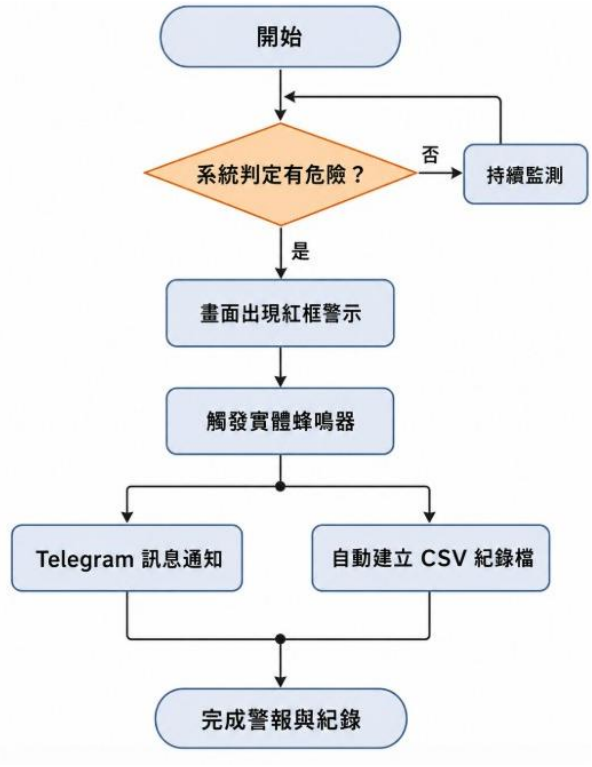


圖 3.2

在特徵參數計算方面，系統會計算人體中心點移動速度、軀幹角度、人體高寬比例，以及落入危險區域內的人體關鍵點數量。其中，人體中心點以左右臀部中點作為代表，並透過前後影格的位置變化計算移動速度；軀幹角度則由肩膀中點與臀部中點推算，用來判斷身體是否出現明顯傾斜；人體高寬比例則用於輔助判斷作業人員是否可能跌倒。

3.3、危險區域設定與進入判斷

本研究依據鋁壓鑄機台周邊可能產生人機接觸風險的位置，於影像畫面中設定多邊形警戒範圍。系統會將該危險區域以紅色框線顯示於畫面中，使使用者能夠直接觀察警戒區域位置。

在進入判斷方面，系統會檢查人體核心關鍵點是否落入危險區域內。若至少有一個人體關鍵點進入警戒範圍，系統即判定為 「IN ZONE」，代表作業人員已接近或進入危險區域。畫面中會同步顯示「PTS IN ZONE」，也就是目前有多少人體關鍵點位於危險區域內，並以紅點標示進入區域的關鍵點位置。

此設計可將原本固定的危險範圍轉換為可視化的警戒區域，讓系統不只是偵測畫面中是否有人，也能進一步判斷人員與機台危險範圍之間的空

間關係。

3.4、人體移動速度與姿態特徵計算

為判斷作業人員是否長時間停留於危險區域，本研究以左右臀部中點作為人體中心點，並比較前後影格之間中心點的位置變化，計算人體移動速度。為避免人體關鍵點短暫抖動造成速度數值不穩定，系統將前一次速度值與目前位移量進行加權平均，使「 V-SPEED」 數值變化較為平順。此方式可降低因單一影格抖動而造成的誤判，並作為判斷人員是否靜止於危險區域內的重要依據。

在姿態特徵方面，系統透過肩膀中點與臀部中點計算軀幹角度，並搭配人體高寬比例判斷作業人員是否出現異常姿態。當人員正常站立時，人體高度通常大於寬度；若人員倒地、彎折或身體大幅傾斜，高寬比例會明顯下降，因此可作為跌倒判斷的輔助依據。

3.5、危險行為定義與異常狀態判斷

為有效辨識鋁壓鑄作業中可能發生之工安風險，本研究依據目前系統實作內容，建立三項主要危險狀態，分別為跌倒偵測、靜止於危險區域，以及進入警戒區域。

1.當軀幹角度大於 45 度，或人體高寬比例低於設定門檻時，系統判定為「FALL DETECTED」，代表作業人員可能發生跌倒、失衡或姿態嚴重異常。此狀態屬於較高風險事件，因此系統會立即啟動蜂鳴器並傳送 Telegram 警報訊息。

2.當危險區域內有兩個以上人體關鍵點，且人體移動速度低於設定門檻時，系統判定為「IMMOBILE」，代表作業人員可能長時間靜止於危險區域內。此情況可能表示人員停留於高風險範圍、疑似跌倒後未移動，或作業狀態出現異常，因此系統同樣會啟動蜂鳴器與 Telegram 通知。

3.當至少有一個人體關鍵點進入危險區域，但尚未符合跌倒或靜止條件時，系統判定為「IN ZONE」。此狀態代表作業人員已進入警戒範圍，但尚未達到最高風險層級，因此系統會先於畫面上顯示警示狀態，作為現場提醒與後續判斷依據。

若上述條件皆未成立，系統則判定為「NORMAL」，代表目前未偵測到明顯危險狀態。當畫面中未偵測到人體骨架時，系統會將危險區域點數、軀幹角度、移動速度與人體高寬比例歸零，避免前一次偵測結果殘留而造成誤判。

其判斷邏輯可整理如下：

狀態	判斷條件	代表意義
FALL DETECTED	軀幹角度 > 45 度，或人體高寬比例低於門檻	疑似跌倒或姿態嚴重異常
IMMOBILE	危險區域內關鍵點數 ≥ 2，且移動速度 < 1.0	人員可能靜止於危險區域內
IN ZONE	危險區域內關鍵點數 ≥ 1	身體部分進入警戒區
NORMAL	以上條件皆未成立	目前狀態正常

3.6、警示輸出與資料紀錄

本研究設計現場警示與遠端通知兩種警報方式。當系統判斷為「FALL DETECTED」或「IMMOBILE」 時，蜂鳴器會立即啟動，提醒現場人員注意；同時系統會透過 Telegram 傳送警報訊息，使管理人員能即時掌握異常狀況。為避免短時間內重複發送大量訊息，系統設定警報冷卻時間，使通知機制能維持提醒效果並降低干擾。

在資料紀錄方面，系統會自動建立每日 CSV 檔案，記錄每次判斷的時間、狀態、危險區域內關鍵點數量、軀幹角度、移動速度與人體高寬比例。這些資料可作為後續事件追蹤、系統測試驗證與參數調整之依據。畫面顯示方面，系統會於右上角資訊面板呈現目前狀態、「PTS IN ZONE」、「TORSO」、「V-SPEED」 與 「H/W RATIO」，讓使用者能即時掌握系統判斷結果。

3.7、系統效能評估

為評估系統於鋁壓鑄場域中的實用性，本研究將針對辨識穩定性、風險判斷結果、警示觸發情形及邊緣運算即時性進行測試。辨識穩定性主要觀察系統在現場光線、反光及人員移動情況下，是否能穩定擷取人體關鍵點；風險判斷結果則檢查系統是否能正確區分「 FALL DETECTED」、「IMMOBILE」、「IN ZONE」 與 「NORMAL」 等狀態。

警示觸發情形則針對蜂鳴器與 Telegram 通知進行測試，確認異常狀態發生時系統能否即時發出提醒。邊緣運算即時性則觀察 Raspberry Pi 執行影像擷取、姿態辨識、風險判斷及警示輸出的反應速度，確認系統是否能符合現場工安監測的即時需求。

3.8、小結

整體而言，本研究方法以影像式人體姿態辨識為核心，透過危險區域座標、人體關鍵點位置、軀幹角度、人體高寬比例與移動速度建立風險判斷邏輯。系統不需直接連接機台即可進行現場監測，適合用於機台訊號不易取得或無法改裝設備的鋁壓鑄作業環境。透過畫面警示、蜂鳴器提醒、Telegram 通知與 CSV 紀錄，本系統可同時達到即時提醒與事件保存的目的，提升鋁壓鑄現場工安管理的反應速度與後續追蹤能力。

四、實驗結果與分析

4.1、實驗環境與設備

本研究以鋁壓鑄作業現場作為實驗場域，透過攝影機擷取作業人員與機台周邊影像，並將系統部署於 Raspberry Pi 5 邊緣運算平台進行即時辨識與判斷。系統主要由 Raspberry Pi 5、攝影機、蜂鳴器模組、螢幕顯示設備及網路通訊環境組成，並透過 Python 程式整合「OpenCV」、「MediaPipe Pose」、「GPIO」 控制、「Telegram Bot」與 CSV 資料紀錄功能。

在實驗過程中，攝影機架設於可觀察作業人員與鋁壓鑄機台周邊活動的位置，用以擷取人員靠近危險區域、進入警戒範圍或發生異常姿態時的畫面。系統於畫面中設定不規則危險區域，並即時顯示目前狀態、進入危險區域的關鍵點數量、軀幹角度、移動速度及人體高寬比例等資訊。

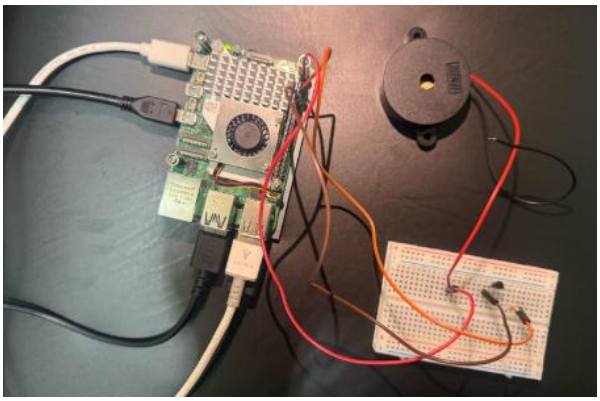


圖 4.1



圖 4.1.2

本研究之硬體與軟體設備整理如下：

項目	說明
邊緣運算設備	Raspberry Pi 5
影像擷取設備	USB 攝影機
姿態辨識工具	MediaPipe Pose
影像處理工具	OpenCV
現場警示設備	蜂鳴器模組
遠端通知方式	Telegram Bot
資料紀錄方式	CSV 檔案自動儲存
顯示內容	STATUS、PTS IN ZONE、TORSO、V-SPEED、H/W RATIO

4.2、姿態辨識於鋁壓鑄環境之穩定性分析

本研究採用 MediaPipe Pose 於鋁壓鑄作業現場進行人體姿態辨識測試。實際測試結果顯示，在光線條件相對穩定且煙霧不明顯的情況下，系統能

辨識作業人員之肩膀、手肘、手腕與臀部等核心人體關鍵點，並支援後續人體中心位置、軀幹角度與人體高寬比例之計算。

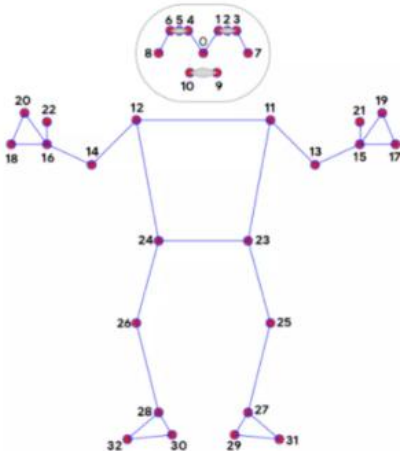


圖 4.2 擷取自 STEAM 教育學習網

在關鍵點擷取穩定度方面，系統可穩定擷取 11、12 號肩膀關鍵點，以及 23、24 號臀部關鍵點，並以此計算人體軀幹角度。此結果表示，在鋁壓鑄現場條件未過度惡劣時，姿態辨識結果可作為判斷作業人員姿態變化與異常行為的基礎。

在抗遮擋能力方面，當作業人員部分肢體受到機台、模具或現場設備遮蔽時，系統仍可在部分畫面中維持基本的人體骨架辨識。不過，若遮擋情況較嚴重，例如手部、肩膀或臀部長時間被機台擋住，部分關鍵點可能會出現跳動或短暫消失的情形，進而影響軀幹角度與人體比例計算的穩定性。

在環境適應性方面，鋁壓鑄現場可能存在煙霧、反光、背景設備複雜等情況。測試結果顯示，當煙霧較輕微且影像對比仍清楚時，系統仍能維持基本辨識能力；但當煙霧較明顯或畫面對比降低時，部分關鍵點穩定度會受到影響。因此，後續可透過調整攝影機角度、改善取像位置及增加輔助判斷條件，提升系統在現場環境中的穩定性。

綜合而言，本系統於光線相對穩定且僅有輕微煙霧干擾的鋁壓鑄環境中，具備基本人體姿態辨識能力，能支援後續危險區域判斷、跌倒偵測及靜止狀態判斷。不過，在遮擋較嚴重或煙霧較明顯的情境下，辨識穩定度仍有改善空間。

4.3、結合危險區域與移動狀態之風險辨識效益分析

本研究並非只依靠單一姿態辨識結果進行判斷，而是整合不規則危險區域、人體關鍵點位置、人體移動速度、軀幹角度與人體高寬比例，建立多條件風險辨識邏輯。此設計可降低單一條件判斷造成的誤判情形，使系統更符合鋁壓鑄現場實際作業狀況。

在危險區域判斷方面，系統於影像中設定不規則危險區域，並透過人體關鍵點與危險區域座標進行比對。當人體關鍵點進入危險區域時，系統會累計「PTS IN ZONE」 數值，代表目前有多少人體關鍵點位於警戒範圍內。若至少有一個關鍵點進入危險區域，系統即判斷為「IN ZONE」，表示作業人員已接近或進入高風險區域。

在移動狀態判斷方面，系統以左右臀部中點作為人體中心點，並計算前後影格之間的位置變化，得到人體移動速度「V-SPEED」。若人員僅短暫通過危險區域，系統會顯示為「IN ZONE」；若有兩個以上人體關鍵點位於危險區域內，且移動速度低於設定門檻，系統則判斷為「IMMOBILE」，代表人員可能長時間停留於危險區域內，具有較高風險。

在姿態異常判斷方面，系統透過軀幹角度與人體高寬比例輔助判斷跌倒情形。若僅依靠單一姿態變化，可能會將蹲下維修、彎腰作業或低姿態操作誤判為跌倒；本研究加入危險區域、移動速度與人體比例後，可進一步區分正常作業與異常狀態，提高風險判斷的合理性。

綜合測試結果顯示，整合危險區域座標、人體關鍵點數量與移動速度後，系統能有效區分短暫進入警戒區、停留於危險區域、疑似跌倒及正常狀態。相較於只使用單一姿態判斷，本研究之多條件判斷方式更能符合鋁壓鑄現場複雜的作業情境。

4.4、邊緣運算即時性與警示機制評估

本研究將系統部署於 Raspberry Pi 5 邊緣運算平台，測試其執行影像擷取、人體姿態辨識、危險區域判斷、警示輸出與資料紀錄之可行性。測試結果顯示，系統可於 Raspberry Pi 5 上順利執行主要功能，並能即時於畫面中顯示辨識結果與狀態資訊。



圖 4.4

在即時性方面，系統於本地端直接進行影像處理與風險判斷，不需將影像上傳至遠端伺服器後再等待回傳結果。因此，可降低網路傳輸造成的延遲，提升現場工安監測的反應速度。當系統偵測到「FALL DETECTED」或「IMMOBILE」等異常狀態時，可於短時間內啟動蜂鳴器，並透過 Telegram Bot 傳送警示訊息，使現場人員與管理者能即時掌握異常情況。

在警示機制方面，系統依照風險程度採取不同處理方式。當判斷為「FALL DETECTED」 或「IMMOBILE」 時，蜂鳴器會啟動，並同步發送 Telegram 通知；當判斷為「IN ZONE」時，系統會於畫面中顯示警示狀態，但不立即啟動蜂鳴器，以避免一般短暫進入警戒區就造成過度警報。此方式可將一般警示與高風險事件區分開來，使警報機制更符合實務需求。

在資料紀錄方面，系統會自動將每次判斷結果存入 CSV 檔案，紀錄內容包含時間、狀態、危險區域內關鍵點數量、軀幹角度、移動速度與人體高寬比例。這些資料可作為後續事件追蹤、系統測試分析與參數調整之依據。整體而言，系統已具備「影像偵測、風險判斷、現場警示、遠端通知、資料保存」之完整流程。

4.5、綜合比較與分析

本研究系統在鋁壓鑄作業環境中具備基本可行性。首先，在姿態辨識穩定性方面，MediaPipe Pose 能於光線相對穩定且僅有輕微煙霧干擾的環境下，辨識作業人員之肩膀、手腕、臀部等核心關鍵點，並支援人體中心位置、軀幹角度與人體高寬比例之計算。相較於僅以人工觀察或事後監視器回放進行判斷，本系統能即時取得人體姿態資訊，提供後續危險行為判斷之基礎。

在風險辨識效益方面，若僅依靠單一姿態判斷，容易將蹲下維修、低姿態操作或短暫彎腰誤判為跌倒或異常狀態。本研究透過不規則危險區域、人體移動速度、人體高寬比例與危險區域內關鍵點數量進行交叉判斷，使系統能區分短暫通過、正常作業、彎腰操作、異常滯留與疑似跌倒等情況。相較於單一判斷方式，加入區域座標與移動狀態後，可降低誤判機率，使警報觸發更貼近現場實際風險。

在即時性方面，本系統部署於 Raspberry Pi 5 邊緣運算平台後，可於本地端完成影像擷取、姿態辨識、風險判斷、警示輸出與資料紀錄等流程。相較於雲端處理方式，邊緣運算可減少網路傳輸延遲，提升工安監測的即時反應能力。當系統偵測到異常狀態後，能透過蜂鳴器進行現場提醒，並透過 Telegram Bot 傳送遠端警報，同時將相關數據寫入 CSV 檔案，使整體流程更完整。

整體而言，本研究由姿態辨識、危險區域判斷到邊緣運算部署，逐步建立出一套可於鋁壓鑄現場運作之即時風險辨識系統。相較於單純影像監看或單一姿態判斷，本系統整合人體姿態、危險區域、移動狀態與警示機制後，能更貼近實際作業情境，並提升危險事件判斷之合理性。不過，在煙霧較明顯、遮擋嚴重或背景干擾較多的情況下，辨識穩定度仍有改善空間。後續可透過調整攝影機位置、改善取像角度、增加光源輔助及擴充判斷條件，提升系統於實際場域中的穩定性與準確性。

4.6、小結

本章針對系統於鋁壓鑄現場之實驗結果進行分析。測試結果顯示，本研究所建置之系統可在 Raspberry Pi 5 上完成影像擷取、人體姿態辨識、危險區域判斷、異常狀態分類、蜂鳴器警示、Telegram 通知與 CSV 紀錄等功能。系統於光線穩定且煙霧不明顯的情況下，能維持基本人體關鍵點辨識能力，並支援後續風險判斷。

綜合分析結果可知，結合危險區域、人體關鍵

點數量、移動速度與姿態特徵後，系統能比單一姿態判斷更有效地辨識風險狀態，並降低誤判情形。邊緣運算部署則使系統具備即時反應能力，適合作為鋁壓鑄現場工安監測之輔助工具。後續若能進一步改善遮擋、煙霧與反光造成的辨識不穩定問題，將有助於提升系統於實際作業現場的應用價值。

五、未來展望

5.1、系統實務化與場域導入發展

本研究已建立以影像辨識、人體姿態分析與危險區域判斷為核心之工安監測系統，並完成跌倒偵測、危險區域進入判斷、靜止過久判斷、蜂鳴器警示、Telegram 通知與 CSV 紀錄等功能。未來可進一步朝向實務場域導入發展，將系統長時間部署於鋁壓鑄產線，觀察其在高溫、煙霧、反光、遮擋與人員頻繁移動情境下的穩定性。

在實務應用方面，後續可依據不同機台配置與作業流程調整危險區域範圍，使系統能配合不同鋁壓鑄機台的實際位置與作業動線。例如，可依據模具開合區、熔爐周邊、取件區與人員操作區設定不同警戒範圍，讓系統更貼近現場作業需求。透過長時間測試與資料累積，可進一步修正判斷門檻，降低不必要警報，提升系統於工廠現場的實用性。

5.2、導入手部虛擬電子圍籬功能

本研究目前已能透過人體關鍵點判斷作業人員是否進入危險區域，未來可進一步加入手部虛擬電子圍籬功能，以提升對細部高風險動作的辨識能力。鋁壓鑄作業中，手部接近模具、熔爐或機台作動區域時，容易產生夾捲、燙傷或碰撞風險，因此單純判斷人體是否進入警戒區仍不足以完整描述作業風險。

在實作方向上，系統可利用 MediaPipe Pose 擷取左右手腕關鍵點，例如第 15 點與第 16 點，並於機台高風險位置建立虛擬安全邊界。當手腕關鍵點跨越預先設定的邊界時，系統即可判定為手部越界事件。為避免因關鍵點短暫跳動造成誤判，後續可加入短時間防呆機制，例如手部越界需持續 0.1 秒以上才觸發警示，使判斷結果更加穩定。

手部虛擬電子圍籬完成後，系統將不只判斷「人有沒有進入危險區」，也能進一步判斷「手部是否伸入危險操作範圍」。此功能可補強目前危險區域判斷較偏向全身位置的限制，使系統更適合用於鋁壓鑄作業中手部接近模具或熔爐的高風險情境。

5.3、機台狀態結合與人機互動風險判斷

目前系統主要依據人體姿態、危險區域與移動速度進行風險判斷，尚未直接讀取機台運轉狀態。未來若能取得機台訊號，可進一步將機台狀態納入判斷邏輯，使系統由單純影像式監測提升為人機互動風險辨識。

在機台狀態取得方面，若現場 PLC 具備網路通訊功能，可透過 Modbus TCP 讀取機台運作狀態，例如停機、開模、合模、頂出或射出等訊號。若機台無法直接連接 Raspberry Pi，則可考慮透過外部顯示器畫面、運作秒數、指示燈狀態或獨立感測訊號作為替代判斷依據。這樣即使無法直接改裝機台，也能以較低侵入性的方式取得機台運作資訊。

結合機台狀態後，系統可建立更完整的風險判斷規則。例如，當機台停機時，人員進入警戒區可能屬於正常維修或檢查；但當機台處於合模、射出或頂出階段時，若手部或身體進入危險範圍，則應立即提高警示等級。透過「人員位置」與「機台狀態」交叉判斷，可降低單純影像判斷造成的誤判，並提升風險辨識的合理性。

5.4、影像辨識穩定性與參數優化

本研究目前已採用多邊形座標方式定義危險區域，並透過人體關鍵點是否落入該區域進行判斷。相較於單純使用顏色範圍進行區域偵測，座標式危險區域較不容易受到光線變化、反光與背景顏色影響，能提升系統於工業環境中的穩定性。

未來可持續優化危險區域座標、人體關鍵點選擇、移動速度門檻、軀幹角度門檻與人體高寬比例門檻。不同作業現場的攝影機角度、機台大小與人員動線皆不相同，因此系統參數需依照實際場域進行調整。例如，若警戒區域過大，可能造成一般通行也被判定為進入危險區；若警戒區域過小，則可能無法及時偵測接近危險範圍的行為。因此，後續可透過多次測試找到較適合現場的參數設定。

針對煙霧、遮擋與反光造成的辨識不穩定問題，未來可透過調整攝影機架設位置、改善取像角

度、增加輔助光源或改變拍攝高度來降低干擾。若後續硬體效能允許，也可加入影像前處理方法或更多判斷條件，使系統在複雜工業環境中維持較穩定的辨識結果。

5.5、多元風險辨識與異常行為擴展

本研究目前已針對危險區域進入、跌倒偵測與靜止過久等狀態進行判斷，未來可在既有架構下擴充更多異常行為類型。例如，可針對長時間停留於特定區域、手部反覆接近危險邊界、身體重心異常偏移或人員倒地後未移動等情境進行細部判斷。

在判斷方式上，可持續使用人體關鍵點、移動速度、姿態角度與區域位置作為主要依據，並加入時間條件來降低誤判。例如，人員短暫經過警戒區時，只顯示畫面提醒；若人員停留時間過長，才提高警示等級。這種分級式判斷方式能讓系統更符合現場作業需求，避免過度警報造成現場人員疲乏。

未來也可將警示方式分成不同層級，例如一般進入警戒區時顯示畫面警示，手部越界或機台運轉時進入危險區則啟動蜂鳴器，跌倒或靜止過久則同步傳送 Telegram 通知與紀錄事件。透過分級警示設計，可使系統在不同風險程度下採取更適合的提醒方式。

5.6、邊緣運算與即時反應能力強化

未來可持續強化系統於 Raspberry Pi 等邊緣運算平台上的執行效能，使系統能在更短時間內完成影像擷取、人體姿態辨識、風險判斷與警示輸出。由於鋁壓鑄作業具有高溫與機械快速運作特性，系統反應時間對現場安全具有重要影響，因此即時性仍是後續優化重點之一。

在效能提升方面，可透過調整影像解析度、影格率、偵測頻率與關鍵點數量來平衡辨識穩定性與執行速度。若未來需要同時偵測更多人員或更複雜的風險條件，也可評估使用更高效能之邊緣運算設備或硬體加速裝置，以提升整體處理能力。

後續也可強化系統決策邏輯，使系統不只顯示危險狀態，也能依照不同風險類型提供對應處理建議。例如，偵測到手部越界時提醒人員立即退回安全範圍；偵測到人員靜止於危險區域時通知現場主管確認狀況；偵測到跌倒時則啟動較高等級警報。透過更完整的反應機制，可提升系統在實務工安管理上的應用價值。

5.7、小結

未來本研究可朝向三個方向持續發展。

1.強化現場導入能力，透過長時間測試確認系統在高溫、煙霧、反光與遮擋情境下的穩定性。

2.擴充手部虛擬電子圍籬與機台狀態結合功能，使系統能更完整地判斷人員與機台之間的互動風險。

3.持續優化邊緣運算效能與警示分級機制，使系統能在實際鋁壓鑄作業現場中提供更即時且可靠的工安輔助。

參考文獻

1. Ahn， J.， Park， J.， Lee， S. S.， Lee， K. H.， Do， H.， &Ko， J. (2023). SafeFac：Video-based smart safety monitoring for preventing industrial work accidents. *Expert Systems with Applications*， *215*， 119397. https：//doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119397
2. Cavaliere， G. (2024). *Comparative use of systems to detect surface defects in die-cast components using advanced vision systems applying artificial intelligence* [Doctoral dissertation， Free University of Bozen-Bolzano]. BORA - Bozen-Bolzano Institutional Archive. https：//bia.unibz.it/esploro/outputs/doctoral/Comparative-use-of-systems-to-detect/991006880597101241
3. Chen， Y.， Sun， Z.， Hou， Y.， Gao， D.， & Li， Z. (2022). Hazard identification & risk control in aluminum production. *Process Safety and Environmental Protection*， *165*， 336-346. https：//doi.org/10.1016/j.psep.2022.07.016
4. Chou，C. W.，& Hsu，Y. T. (2025). Robust real-time object detection and counting system for casting foundries. *Applied Soft*

Computing， Article 113155. https：//doi.org/10.1016/j.asoc.2024.113155

5. ElSharkawy， M. F. (2024). Workplace hazards and safety practices in the small-scale industries. *Production Engineering Archives*， *30*(2)， 241－250. https：//doi.org/10.30657/pea.2024.30.26
6. Han， S.， & Lee， S. (2013). A vision-based motion capture and recognition framework for behavior-based safety management. *Automation in Construction*， *35*， 131－141. https：//doi.org/10.1016/j.autcon.2013.05.001
7. Khurram， M.， Zhang， C.， Muhammad， S.， Kishnani， H.， An， K.， Abeywardena， K.， Chadha， U.， &Behdinan， K. (2025). Artificial intelligence in manufacturing industry worker safety： A new paradigm for hazard prevention and mitigation. *Processes*， *13*(5)， 1312. https：//doi.org/10.3390/pr13051312
8. Lee， J.， Kim， T. Y.， Beak， S.， Moon， Y.， &Jeong， J. (2023). Real-time pose estimation based on ResNet-50 for rapid safety prevention and accident detection for field workers. *Electronics*， *12*(16)， Article 3513. https：//doi.org/10.3390/electronics12163513
9. Lee， Y. C.， & Lee， C. H. (2022). SEE：A proactive strategy-centric and deep learning-based ergonomic risk assessment system for risky posture recognition. *Advanced Engineering Informatics*， *53*， Article 101717. https：//doi.org/10.1016/j.aei.2022.101717
10. Li， J.， Miao， Q.， Zou， Z.， Gao， H.， Zhang， L.， Li， Z.， & Wang， N. (2024). A review of computer vision-based monitoring approaches for construction workers' work-related behaviors. *IEEE Access*， *12*， 7134－7155.https：//doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3356979
11. Liu， H. (2020). *Context-aware human-robot collaboration in assembly* (Doctoral dissertation， KTH Royal Institute of Technology). DiVA Portal. https：//www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1460103
12. Liu， H.， & Wang， L. (2021). Collision-free human-robot collaboration based on context awareness. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*， *67*， 101997. https：//doi.org/10.1016/j.rcim.2020.101997
13. Liu， H.， Wang， Y.， Ji， W.， & Wang， L. (2018). A context-aware safety system for human-robot collaboration. *Procedia Manufacturing*， *17*， 238-245. https：//doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.042
14. Liu， W.， Meng， Q.， Li， Z.， & Hu， X. (2021). Applications of computer vision in monitoring the unsafe behavior of construction workers： Current status and challenges. *Buildings*， *11*(9)， Article 409.https：//doi.org/10.3390/buildings11090409
15. Liu， Z.， Liu， Q.， Xu， W.， Liu， Z.， Zhou， Z.， & Chen， J. (2019). Deep learning-based human motion prediction considering context awareness for human-robot collaboration in manufacturing. *Procedia CIRP*， *83*， 272-278. https：//doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.111
16. Machado， T. S. S.， da Costa Leal， P. H. A.， Cardoso， T. A. S.， da Silva Borges， L.， de Melo Santos， C. J.， &Sant' Anna， A. M. O. (2023). Risk and safety assessment in the foundry process in the metallurgical industry. *RevistaProdução Online*， *23*(3)，

5104. https：//doi.org/10.14488/1676-1901.v23i3.5104

17. Nessi， F.， Beretta， E.， Gatti， C.， Ferrigno， G.， & De Momi， E. (2016). Gesteme-free context-aware adaptation of robot behavior in human-robot cooperation. *Artificial Intelligence in Medicine*， *74*， 32-43.https：//doi.org/10.1016/j.aiim.2016.10.005
18. Nikolakis， N.， Sipsas， K.， &Makris， S. (2018). A cyber-physical context-aware system for coordinating human-robot collaboration. *Procedia CIRP*， *72*， 27-32. https：//doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.133
19. Pradhan， N.， Balasubramanian， P.， Sawhney， R.， & Khan， M. H. (2020). Automated risk assessment for material movement in manufacturing. *Gestão&Produção*， *27*(3)， e5424. https：//doi.org/10.1590/0104-530X5424-20
20. Purushothaman， M. B.， &Gedara， K. M. (2025). Smart vision-based analysis and error deduction of human pose to reduce musculoskeletal disorders in construction. *Smart and Sustainable Built Environment*， *14*(5)， 1339-1368. https：//doi.org/10.1108/SASBE-02-2023-0037
21. Quintas， J.， Martins， G. S.， Santos， L.， Menezes， P.， & Dias， J. (2019). Toward a context-aware human-robot interaction framework based on cognitive development. *IEEE Transactions on Systems， Man， and Cybernetics： Systems*， *49*(1)， 227-241. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8360558
22. Rix， M.， Kujat， B.， Meisen， T.， &Jeschke， S. (2016). An agile information processing framework for high pressure die casting applications in modern manufacturing systems. *Procedia CIRP*， *41*， 1084-1089. https：//doi.org/10.1016/j.procir.2015.12.126
23. Singh， L. P. (2012). An investigation into work postures of workers engaged in casting industry： A study in India. *Asian Journal of Managerial Science*， *1*(1)， 17 – 22. https://www.ajmsjournal.org/index.php/ajms/article/view/1099
24. Vukicevic， A. M.， Petrovic， M. N.， Knezevic， N. M.， &Jovanovic， K. M. (2023). Deep learning-based recognition of unsafe acts in manufacturing industry. *IEEE Access*， *11*， 103406-103418. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10258290
25. Wang， X. (2024). *Context-aware worker intent interpretation for human-robot collaboration in construction* (Order No. 31332167). ProQuest Dissertations & Theses A&I.
26. Wang， X.， Veeramani， D.， Dai， F.， & Zhu， Z. (2024). Context-aware hand gesture interaction for human-robot collaboration in construction. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*， *39*(12)， 1705-1725. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/mice.13202
27. Lau, X. L., Connie, T., Goh, M. K. O., & Lau, S. H. (2022). Fall detection and motion analysis using visual approaches. International Journal of Technology, 13(6), 1173–1182. https://doi.org/10.14716/ijtech.v13i6.5840
28. Liao, H.-I. (2025). An abnormal event detection system with human face and full-body posture recognition for industrial

safety [Unpublished master's thesis]. Department of Electrical Engineering, National Taiwan Normal University.

https://hdl.handle.net/11296/4642hz

29. Gutiérrez, J., Rodríguez, V., & Martin, S. (2021). Comprehensive review of vision-based fall detection systems. Sensors, 21(3), 947.

https://doi.org/10.3390/s21030947

30. Chen, W., Jiang, Z., Guo, H., & Ni, X. (2020). Fall detection based on key points of human-skeleton using OpenPose. Symmetry, 12(5), 744. https://doi.org/10.3390/sym12050744