**附件一、研究規劃書**

研究名稱：人機協作無治具作業技術研究

執行期間：自112年01月01日至112年12月31日止

執行單位：國立陽明交通大學機械工程學系

**研究規劃書**

1. **執行單位：國立陽明交通大學機械工程學系**
2. **聯絡窗口**

本計畫執行之人力配置及聯絡窗口如下表。

表1、研究計畫人力配置

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 現職 | 學歷 | 參與性質 | 聯絡方式 |
| 程登湖 | 國立陽明交通大學機械工程學系 副教授 | 美國佛羅里達大學博士 | 計畫主持人 | 03-5712121#55133  tenghu@nycu.edu.tw |
| 蔡佳宏 | 國立陽明交通大學機械工程學系 副教授 | 美國紐約州立大學博士 | 計畫共同主持人 | 03-5712121 #55118  dylantsai@nycu.edu.tw |
| 劉都晉 | 碩士生 | 國立陽明交通大學機械工程學系 | 計畫成員 | 03-5712121#55192  sttaccc@gmail.com |
| 吳謹君 | 大學部學生 | 國立陽明交通大學機械工程學系 | 計畫成員 | 03-5712121 #55193  chiiin.en10@nycu.edu.tw |

1. **計畫內容**

**一、緣起說明**

依據麥肯錫公司推估 ，2030年全球勞動力短缺將高達 8,520 萬人，影響產值 8.5 兆美元，約當全球 GDP 的 8.4%。此缺工問題將使製造業面臨日益複雜的挑戰，急需更高效率、更靈活、更具創新性的製造流程，以應對市場的變化和競爭的壓力。

在台灣的製造業中，「組裝」程序占用了大量人力需求，如3C產業(手機、電腦等產品之組裝)、傳統製造產業(橡膠、鑄造等產業)、及少量多樣化接單生產之產業。這些產業人力需求大，同時模具成本也相對高(可高達系統成本15%、還需要地方存放及專人管理)。為解決上述問題，本研究計畫起源自對現代製造業的深刻洞察，並旨在探討"人機協作無治具作業技術"的應用和潛力，以滿足製造業的現實需求。

「人機協作無治具作業技術」是一項新的概念，它旨在實現人和機器之間的無縫合作，而無需傳統的夾具、固定工具或機器人編程。這種技術有潛力改變製造業的運作方式，使生產線更加靈活，讓工人更容易參與各種生產任務，同時保持高效率和品質標準。預期開發技術有潛力降低生產成本，提高競爭力，同時保持產品品質。另配合本計畫目標，規劃3年工作項目及技術展示情境，如下表所示

全程技術展示規劃

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 113 | 114 | 115 |
| 示意圖 | Building a LEGO Robot Arm, to Help Me Build LEGO - YouTube | https://sa.ylib.com/news/images/SM199_016.jpg |  |
| 展示說明 | 單機無治具組裝：玩具類(如樂高積木組裝) | 雙機無治具組裝：家具類(如椅子) | 多機/人機無治具遠端組裝：設備類(分段式零件組裝)；大型家具類，如桌子組裝 |
| 技術議題 | * 自動辨識工件&最佳化夾持評估 * 視覺/力覺互補系統 | * 雙機器人路徑同步性、精度≤1mm * 雙機器人組裝策略(AI自動產生組裝工序@零件數<10種) | * AMR組裝策略最佳化，AI自動產生組裝工序(for 3機協作) * 遠端人機協作延遲控制+力感回饋機制 |

**二、分項工作**

113年之計畫工作分為2個主要方向，分別為工件影像辨識以及工件組裝，內容簡述如下：

工件影像辨識：

1. 單一工件影像識別：本子分項目的是建置與開發一個能夠從影像識別工件的視覺系統。利用機器學習演算法以及工件的特徵及屬性達到識別，並進一步透過影像分析取得工件在空間中的位置、形狀及擺放方向，作為機器手臂夾取策略的判斷依據。
2. 多個工件影像識別：本子分項是在前分項建立的系統中，進一步透過影像切割來識別和區分同一場景中的多個工件的數量、位置和方向。其目的是提高批量處理的效率、工件動態追蹤以及提高人跡協作的可靠性。

工件組裝：

1. 自動組裝工作站設計：將開始設計自動組裝工作站，其中包括機械臂、工具和輸送系統。這個工作站將用於自動組裝工件。
2. 組裝流程規劃：將制定工件組裝的詳細流程，包括零件的定位、組裝順序和檢查步驟。這將確保高效率和品質一致性。
3. 自動組裝系統集成：將自動組裝工作站與工件影像辨識系統無縫集成，以實現實時反饋和校正。這將確保工作站能夠根據辨識結果進行適當的加工、組裝等作業。
4. 系統測試和優化：將對整個自動組裝系統進行測試，優化其性能，包括速度、精確度和可靠性。在實際生產環境中進行測試以確保系統的穩定運作。

**三**、**研究架構(含圖示)**

在工廠生產線中治具的常見功能為固定加工件還有定位功能，方便機器手臂後續進行加工，並且可以維持一定的加工精度，但是缺點為治具的種類非常多，在更換治具的過程也會影響加工的時間， 增加不少時間成本，減少加工效率。

為了達成無治具加工，原本治具的固定和定位功能必須轉嫁到機器手臂與夾具上，並透過夾具進行抓取、加工、或組裝，如焊接、鎖螺絲、插入、齒輪嚙合、壓入，如圖1 所示。由於每次加工後，夾具可能定位精度跑掉，因此手臂在取工件之前必須先透過相機進行定位校正，確保上一次加工循環的定位精度已經歸零，並預備接下來的加工。

在無治具組裝的加工過程常見的技術瓶頸可以歸納為以下幾類：

* 定位精度
* 視覺遮蔽
* 抓取穩定性與軌跡規劃
* 力覺/視覺輔助夾取、加工
* 加工的精度

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| 圖1、常見的加工、組裝情境 | | |

以下就將加工的步驟列出並舉出可能要解決的問題：

1. **夾抓定位校正**

校正的方法為使用手臂夾具上的相機移動到校正的棋盤格， 即可得到兩者相對位置，又因為棋盤格的座標為已知，因此可以算出手臂、夾具的定位是否正確，如圖2的轉移矩陣[1]。這一步驟相對來說是最單純的。

|  |
| --- |
| **A drawing of a robot arm  Description automatically generated** |
| 圖2、手臂定位校正的過程 |

1. **辨識**

進行抓取時，手臂將夾具上的攝影機移動到工件上方，使工件在相機視野內，接著進行影像的辨識與分割。分割目的為將工件從背景中分離出來，並進行影像比對、幾何形狀比對，找到並且確認要抓取的目標工件無誤。

本計畫規劃將YOLO演算法（You Only Look Once, YOLO）[3]和立體區域卷積神經網絡（STEREO R-CNN）[4] 結合使用進行工件識別，YOLO的主要優點是實時性以及計算效率高，缺點則是準確度相對較低，STEREO R-CNN 是FASTER R-CNN的一延伸演算法，其優點為精確度高、適用於多類別辨識，主要缺點是計算需求高，不適合資源有限的嵌入式設備。具體來說，將YOLO用於檢測工件的位置和類別，而STEREO R-CNN用於對每個檢測到的工件進行進一步的特徵提取和細節識別。

圖3為物件的辨識與姿態辨識一例，左側上、下圖為透過YOLO進行接著進行工件的檢測工件的位置和類別辨識。YOLO為一監督式機器學習，透過影像與對應的影像標示 (annotations) 進行卷積學習工見的影像特徵，常見標示如

其中 分別為標示向量、工件水平座標、工件垂直座標、工件圖框寬、工件圖框長、工件分類1, 2, … 3。例如圖3左側中的紅色工件圖框分別就有相屬的工件座標、圖框寬、長。在圖3的例子中，工件種類固定，故標示向量中分類只有一項，也就是圖3這個例子中影像標示為一的矩陣。常見用來標示圖像的工具有 LabelImg、RectLabel、VGG Image Annotator (VIA) 等，本計畫將擇一作為標示的平台。

|  |
| --- |
| Several different types of objects  Description automatically generated |
| 圖3、物件的辨識、語意分割與姿態辨識 |

本系統在YOLO的訓練過程中將使用梯度下降 (gradient descent algorithm) 依失效函數 (Loss function) 變化取得最佳訓練結果，失效函數將定義為

其中分別為總和失效函數、座標失效函數、信心失效函數以及分類失效函數。各失效函數中將加入比例因數來進一步調整權重，藉以最佳化總和失效函數。

完成物件識別後，將進一步以深度感測器或Stereo R-CNN判斷工件深度、3D姿態，以提供資訊給機器手臂將工件順利的抓取，如圖3右側圖所示。

多工件識別主要的挑戰是影像中工件重疊、遮蔽，進而造成辨識率下降的問題。本計畫將使用YOLO搭配分水嶺演算法分割重疊工件，在YOLO辨識信心指數低於指定閾值的圖像，透過分水嶺演算法切割成分割圖像再以YOLO做二次識別。

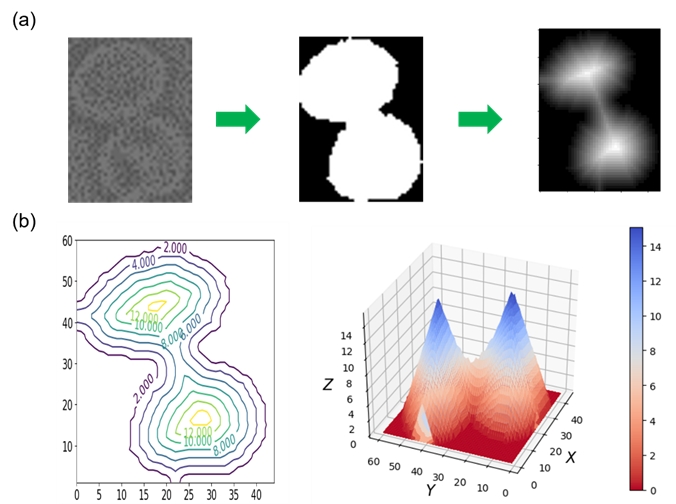
****

圖4、計畫主持人過去利用分水嶺演算法分割重疊影像一例。(a) 依據影像強度變化轉換成距離。 (b) 轉換後距離的二維等高線圖和3D圖。[5]

圖4為計畫主持人過去利用分水嶺演算法分割重疊血球細胞影像一例。[5] 圖4(a) 從左至右分別為原始細胞圖像、二值化圖像以及距離轉換結果。距離轉換主要目的，是要取得標記分水嶺算法的內部標記，轉換方法是計算二值化影像的前景中每個像素點到邊緣點上最短距離，兩個像素點的歐幾里得距離:

其中 分別為轉換距離以及兩個像素點的座標位置。圖4(b) 為依據轉換距離後得到的距離等高線圖以及3D圖像，將圖像依照坡谷的等高線軌跡進行圖像切割，將可以有效處理重疊圖像識別率低下的問題。

1. **抓取**

一旦工件確認、夾具的抓取最佳姿態必須由幾個因素決定：

* 欲放置的工件姿態
* 抓取時夾具與環境的避障

一旦以上兩個因素確認了，可以進行軌跡規劃，並且導引並控制手臂靠近工件，並且進行抓取。當夾具抓取時，視覺可能因為工件遮蔽了相機，因此無法提供有效資訊，這時必須透過夾具上的力量感測器進行是否夾取成功的分析。 若夾取的正向力太小，可能造成摩擦力不夠而滑落。因此，夾具的設計要考慮物體是否在抓取後有鬆脫的現象。從成功抓取後到放置工件的路徑大部分可以透過軌跡規劃來避免環境碰撞，且軌跡是否太劇烈導致工件是否在移動中會脫落，如圖4所示。

|  |
| --- |
| Building a LEGO Robot Arm, to Help Me Build LEGO - YouTube |
| 圖5、夾取工件示意圖 |

1. **放置**

工件放置的位置通常已經被決定，但仍有幾個因素會影響細部的把放位置。這主要取決於工件在夾具中的相對位置，工件的大小、幾何形狀、與欲擺放的姿態。為了更精準的知道工件在夾具中的相對位置。可以進一步用相機進行工件的定位，也就是將手臂移到相機的正上方，並進行工件在夾具中的位置、姿態的計算，並確保在夾具中的相對位置。接著就可以計算手臂的移動軌跡，讓物件可以順利擺放，這過程也可以透過力量感測器進行監控工件是否在正確位置下離開夾具，例如Peg-in-hole的組裝情境。整個抓取過程如圖5所示。

|  |
| --- |
|  |
| 圖6.在手臂自動化組裝產線上從抓取到放置狀態轉移圖[2] |

綜合以上的步驟，可以將workflow圖在以下圖7表示出來。

|  |
| --- |
|  |
| 圖7.無治具作業的流程圖 |

**四、參考文獻**

[1] Tish, Daniel & King, Nathan & Cote, Nicholas. (2020). Highly accessible platform technologies for vision-guided, closed-loop robotic assembly of unitized enclosure systems. Construction Robotics. 4. 10.1007/s41693-020-00030-z.

[2] Peng, Yuan-Chih, Shuyang Chen, Devavrat Jivani, John Wason, William Lawler, Glenn Saunders, Richard J. Radke, Jeff Trinkle, Shridhar Nath, and John T. Wen. 2021. "Sensor-Guided Assembly of Segmented Structures with Industrial Robots" *Applied Sciences* 11, no. 6: 2669. <https://doi.org/10.3390/app11062669>

[3] Ahmad, Tanvir, et al. "Object detection through modified YOLO neural network." Scientific Programming 2020 (2020): 1-10.

[4] Li, Peiliang, Xiaozhi Chen, and Shaojie Shen. "Stereo r-cnn based 3d object detection for autonomous driving." Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2019.

[5] Chang, Jen-Shuo, “Machine Learning-Based Image Segmentation for Enhancing the Throughput of Cell Evaluation on a Chip”, Master thesis of National Chiao Tung University, 2020.

1. **預期成果與效益**

* 本計畫針對產業問題提出可行性解決方案，並依照導入之困難，進行技術上之階段性任務拆解，使技術可逐步導入產業，解決產業短期困境，並布局產業能夠適應未來少量多樣化之生產需求。
  + 透過工件影像辨識和無治具的工件組裝技術，預期能夠實現更高效、更靈活的製造流程。這將縮短生產周期，降低生產成本，並提高生產率，讓製造業能夠更迅速地適應市場需求的變化。
  + 本計畫將引領製造業向更先進、更智能化的方向發展，提供技術創新的競爭優勢。這將有助於企業在市場上保持領先地位，吸引更多客戶和投資。
  + 優化的製造流程將降低生產成本，包括人力成本和設備成本。同時，減少次品率和提高生產效率將增加產品的利潤率，為企業帶來更高的經濟效益。
* 擴大可運用成果項目：產出泛用於不同產業所需之共通性關鍵技術，可泛用於不同產業之組裝、生產、製造等需求。
  + 多感測器整合：利用多個感測器相互協同操作之優勢，且也綜合處理其它資料，提高整個感測器系統的智慧化。
  + 路徑編程與同步控制：必須在精確的時間向機器人生成伺服命令，並能夠在協調和獨立的機器人運動之間平滑過渡。
  + 單機器人組裝策略：需要仔細編程、專門的控制器配置以及針對每個應用程序進行客製化。更為將來的多機協作應用建立核心基礎。
* 其他效益/社會效益：
  + 無治具的自動組裝技術將使工人能夠更容易參與各種組裝任務，而不需要繁瑣的設定和調整。這將提高工人的參與感和滿意度，同時減少工人的體力勞動和危險性工作。
  + 藉由工件影像辨識系統的應用，能夠實現對工件的實時監控和檢測，以確保組裝過程的品質和一致性。這將減少次品率，提高產品的可靠性，並增強企業的聲譽。

1. **執行進度及查核點**

**一、計畫甘特圖**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 月份  工作項目 | | 3 | 6 | 9 | 12 |
| 1. | 單一工件影像識別 (分類、定位) |  |  |  |  |
| 2. | 夾具組裝、整合、與測試 |  |  |  |  |
| 3 | 多個工件影像識別 (部分遮蔽識別、動態追蹤、工件分類、多個工件定位) |  |  |  |  |
| 4 | 使用樂高進行組裝測試 |  |  |  |  |
| 累計工作進度(％) | | 25 | 50 | 75 | 100 |

註：\*代表查核點；灰底部分代表規劃執行期間。

**二、預定查核點說明**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 編號 | 內容說明 | 預定完成日期 |
| 1 | 單一工件影像識別，辨識率大於95%，定位精度小於3 pixels | 113年 3月 |
| 2 | 完成夾具組裝、整合、與抓取工件 | 113年 6月 |
| 3 | 多個工件影像識別，辨識率大於85%，定位精度小於3 pixels | 113年 9月 |
| 4 | 樂高組裝完成度95% | 113年 12月 |

1. **計畫經費需求**

本計畫之經費需求詳見下表。

表2「人機協作無治具作業技術研究」經費需求表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 項目 | 金額(千元/未稅) | 占比 |
| 人事費 | 841.5 | 49.5% |
| 業務費 | 518.5 | 30.5% |
| 管理費 | 340 | 20% |
| 合計 | 1,700 | 100% |