



立體影像於鋼構件內隔板 焊接品質檢測之評估

吳栩賢／國立臺灣科技大學營建工程系資訊組 碩士生

莊子毅／國立陽明交通大學土木工程學系測量及空間資訊組 助理教授

鋼柱構件內隔板組立焊接製程為影響柱結構應力之重要環節，現行設備雖然具有移動式龍門壓桿系統可協助減少大量勞力工作，在品質控制階段仍缺乏系統化、標準化之檢核機制。多需由作業員於製程後以尺規量測內隔板位置，並與設計圖比對後通知第三方單位至廠區進行查驗。過程中構件可能需經過多次懸吊並至少在廠區滯留三個工作日，造成製程停滯、耗費作業空間及人力成本。有鑑於此，本研究著重於如何藉由立體視覺技術自動檢測焊接後內隔板在鋼柱構件中的位置，提供數位化資訊支援管理決策，進而在符合精度需求下縮短作業時程。為此，研究在現有的組立移動式龍門系統上裝置工業級深度相機，藉由龍門移動時收集高重疊的立體影像序列，產製各影像對之點雲。演算法將自動進行序列點雲套合，並於點雲中偵測內隔板後進行幾何估計，獲得構件中內隔板之相對位置與內隔板板厚資訊。並透過網路回傳至廠方伺服器進行設計圖比對。不僅可支援品質控管決策更能建置數位化檔案作為產線分析之要素。為驗證研擬演算法之可行性，由東鋼鋼結構雲林廠協助進行系統實際建置、資料收集及測試。初步測試在處理 15 公尺鋼柱構件時可獲致約 3 公厘之內隔板定位精度，及小於 1 公厘的板厚度量測精度，可有效減少作業時程並凸顯在協助提升鋼構廠製程效率與系統化品質管理之潛力。

關鍵詞：立體視覺、點雲套合、三維邊緣偵測、內隔板檢核、自動化檢核

鋼構內隔板位置自動檢測系統

為協助鋼構廠房提升系統化且高精度高效率之製程檢核作業，並藉由數位化資訊進行品質控管決策。研究中採用工業級深度相機，以立體視覺技術由二維影像產製三維空間資料。同時搭配開發之演算法進行內隔板目標偵測與幾何估計，並可透過網路將資訊傳遞至主機進行資料歸檔、分析、比對、及統計等處理，可大幅減少人工作業錯誤機率並提升執行效率。同時，系統操作朝向一鍵式作業，透過人性化界面設計可使無專業背景之作業人員快速地熟悉相應操作。

作業環境與量測標的

鋼柱的製程需要在組立程序時於內部焊接內隔板以加強構件之強度，因此內隔板位置必須與設計圖一致以

確保符合需求，維持結構安全性。圖 1(a) 顯示鋼構組立製程的龍門平台系統，以及放置待檢測構件之擱置區。其中，待處理之構件需透過天車吊掛至平台以進行初焊程序，半完成品則需再次吊掛移置擱置區域待第三方檢測，若不合格則必須再次吊掛之平台進行重製。圖 1(b) 展示待組立的鋼構件，組立程序中構件於平台固定不動，由龍門系統逐步往前移，同時透過龍門上方與兩側的固定壓桿固定構件，再由焊接作業員進行逐一焊接。圖 1(c) 展示移動龍門的作業平台，可供焊接作業員站立與施作。以製程效率與成本效益而言，天車吊掛次數越少及構件在擱置區停留的時間越短，對於廠方越有效益。因此本研究引入立體視覺深度相機在作業完成後，再由龍門移動一次進行高密度高重疊的影像資料蒐集，待龍門歸位後即可開始進行計算提供檢測成果。若有明

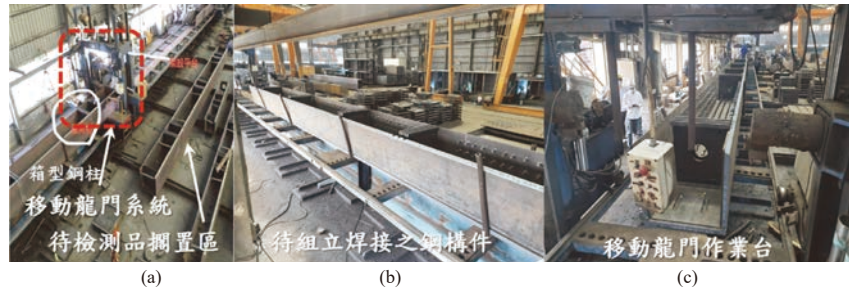


圖 1 鋼構件組立製程環境與龍門系統設備示意圖

顯誤差可即時發現並進行修補，避免反覆將構件吊至擱置區進行人工檢測後再重新吊回平台進行修補作業之程序，進而提升作業效率。

內隔板焊接成果檢測之標的物主要為隔板在鋼構件中的位置及其厚度，若內隔板未依照設計圖焊接在正確位置，將會直接影響該構件之強度，甚至造成公安意外。

有鑑於此，本研究所開發的系統觀測標的物定義為內隔板的邊緣特徵如圖 2(a) 所示。若確定了各隔板邊緣特徵的空間坐標，則可以進一步以直線特徵的幾何計算得到隔板厚度（圖 2(b) 藍色指標），以及由構件起始端為原點到各隔板的距離，如圖 2(b) 中白色箭頭所示。希冀藉由影像自動偵測與計算，可降低人力成本以及人工作業可能出錯的機率。圖 2(c) 為人工量測作業之示意圖。

感測器介紹

研究中採用的工業級深度相機為 Ensenso N35^[1]，其規格如表 1 所示。將其安裝於移動龍門系統之壓桿，以移動式測繪方式進行大尺度鋼構件之序列影像資料蒐集。透過立體視覺技術產製高精度三維點雲並引入本研究研擬之演算法進行幾何估計，獲得內隔板相對位置與內隔板板厚等幾何資訊。最後透過網路將數據傳遞至廠方伺服器進行檢核比對。圖 3(a) 顯示 N35 深度相機於移動式龍門系統的安裝位置，為了避免撞擊及焊接時的焊渣噴濺，感測器另已安裝了白鐵保護盒。此外，圖 3(a) 中顯示的上方與兩側之壓桿可用來暫時固定構件以進行焊接作業。另一方面，圖 3(b) 展示深度相機感測器相對於龍門系統的空間配置，其中設備與資料可藉由乙太網路線進行傳輸與控制。

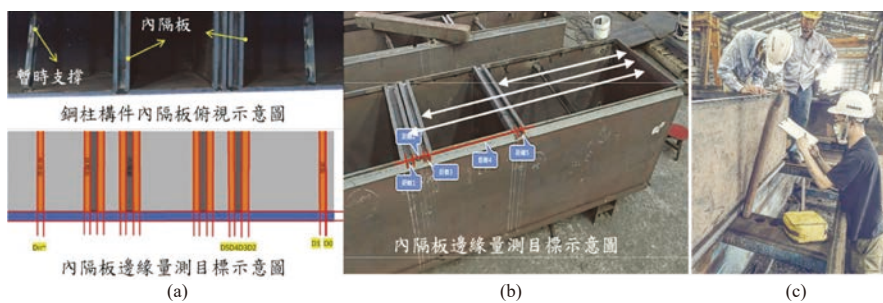


圖 2 內隔板檢測之標的物

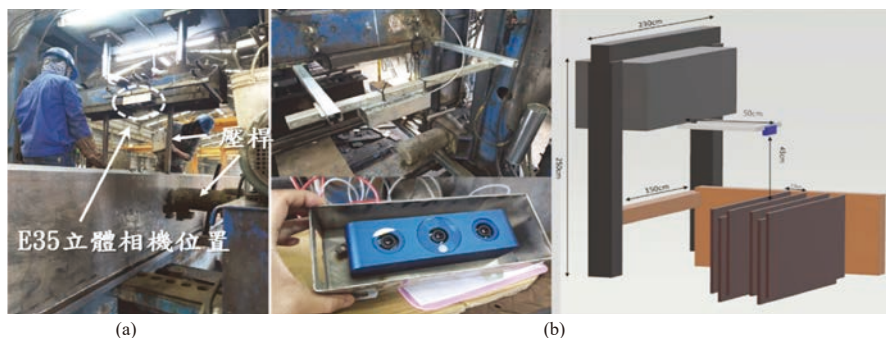


圖 3 深度相機空間位置配置示意圖

表 1 N35 深度相機規格表

型號規格	N35-604-16-BL
鏡頭焦距	6 mm
相對孔徑	1.6
收斂角	4.0°
基線	100 mm
最佳工作距離	500 mm
工作距離範圍	340 ~ 1,100 (mm)

考量所需的量測精度需求，透過地面取樣距離公式，如式 (1) 所示，在地面空間解析度 (ground sample distance, GSD) 1 公厘的條件下，感測器可接受的物距範圍約為 40 公分至 50 公分，式 (1) 中的 f 為成像主距、 p 則代表一個像元的實際尺寸而 D 即為相應的拍攝距離。

$$\frac{f}{p} = \frac{D}{GSD} \quad (1)$$

由於原龍門移動系統的設計並未考慮到加裝的影像感測器，因此龍門的移動速率並不穩定，隨著啟動電壓的差異而變動。因此研究中採用連續高重疊的取像方式，在龍門移動時進行動態拍照，因此感測器拍照的快門與頻率需預先進行測試並作為常態設置，如此才可在不同構件作業下都能收集到清晰、高重疊的影像序列。圖 4(a) 顯示單一個時間點所拍攝的左右像資料，感測器可直接利用率定之參數建構核線影像，透過立體匹配演算法進行全部像點的視差計算，推估各像點的三維深度資訊，如圖 4(b)，並進而產製三維點雲。

值得注意的是，每一核線影像對所產製的點雲資料乃是架構在左像的局部坐標系統，因此為了獲得描述鋼構件完整幾何之點雲，系統將針對產製的序列點雲進行套合處理，將各局部坐標系點雲轉換至共同的坐標基準 (預設為第一組點雲的坐標系統)，如此方可進行內隔板於構件中相對位置之計算。

系統框架介紹

圖 5 顯示系統的執行架構，現場作業人員完成焊接後，僅需由操作介面輸入工程參數，如料號、構件編號等，即可一鍵啟動與結束檢測資料收集程序。資料收集完成後，從資料處理、分析以至成果輸出程序皆可自動化完成。系統以 Ensenso 提供之 SDK 進行感測器系統編程，採用動態拍攝模式 [2] 以高頻率、高重疊方式蒐集影像資料。此外，運用 Ensenso 之 PatchMatch [3] 模組產製三維點雲。系統隨後即進行點雲資料套合、內隔板偵測、隔板邊緣特徵萃取及擬合之演算，以執行標的物的幾何估計。最後，透過網路可將數據回傳至廠方伺服器並與設計模型進行比對，查核內隔板焊接成果。使用者介面設計務求以簡化且低使用門檻為準則，透過具有量化數值依據的資料解算，降低人為操作可能的誤判與錯誤。同時，為提升實務使用性，系統亦設計包含拍攝完成卻未中止系統、誤觸啟動系統等防呆機制。

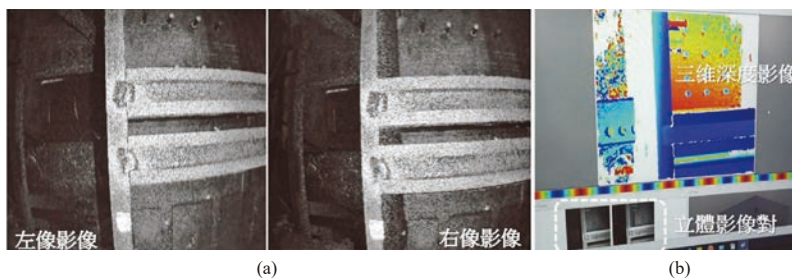


圖 4 深度相機蒐集的核線影像示意圖

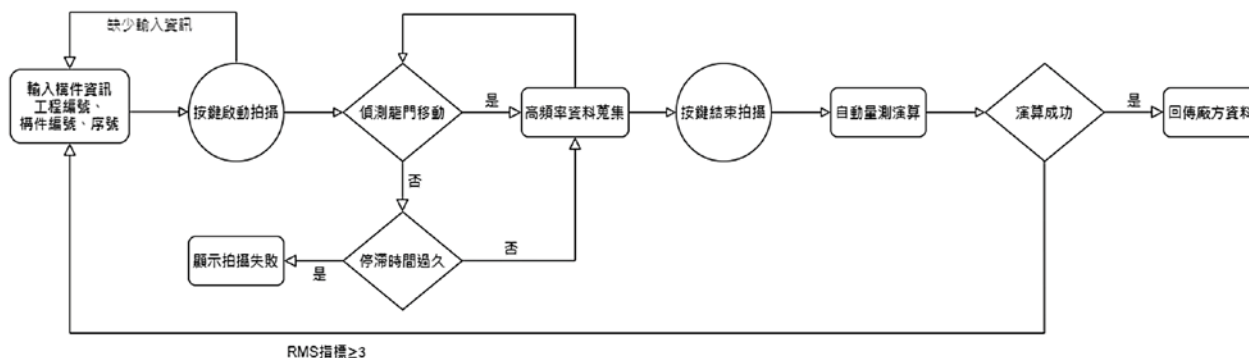


圖 5 系統執行架構圖

標的物特徵計算說明

內隔板等標的物之量測，包含內隔板厚度與內隔板於構件的相對位置，其距離觀測量皆可由內隔板邊緣之直線特徵進行描述，透過三維直線參數進行直線間的垂直距離估計。值得注意的是，本研究建置系統之環境場域具有不可預期之雜物，使得所蒐集的數據將包含可是為雜訊之資料。因此，開發之演算法首先濾除特定深度範圍外之點雲，不僅可降低運算量亦可排除可能影響內隔板偵測之雜訊點。此外，由於系統採取高頻率、高重疊的拍攝模式，因此同一個內隔板將會被拍攝於多個像幅內，如何自動偵測各內隔板最適進行幾何估算之像幅為首要待處理之問題。有鑑於此，考量垂直拍攝所受到的畸變量最小，因此定義最近似垂直拍攝幾何之像對為計算該內隔板幾何標的物的最佳影像對。進而提出基於像幅點雲數量之內隔板偵測策略，自動定義各內隔板的最佳影像對。

隨後，針對各內隔板最佳影像對所產製的點雲進行邊緣特徵萃取並擬合直線參數，估計內隔板之厚度。系統將針對雜訊濾除後的目標點雲以 convex hull

^[4] 演算法進行初步框選候選邊緣特徵，並使用 inertia tensor of centroidal moment ^[5] 進行高效率的直線參數擬合。最後可輸出之數據成果包含各內隔板之序列編號以及各內隔板之厚度與間距。

此外，為了獲得內隔板於構件中的相對位置，各像對產製之點雲需透過套合程序所估計的轉換參數進行坐標轉換，使得整體點雲具有共同的坐標基準。研究中採用 Open3D ^[6] 函式中的 ICP ^[7] 演算法進行開發，並以第一組點雲之坐標系統作為基準，用以估計由構件前端至各內隔板間的距離。然而，由於鋼構件的幾何紋理重複且單調，將大幅提升點雲精準套合之困難度，因此研究中引入像幅時序關係、旋轉角度以及像幅移動量等約制條件，降低重複紋理等干擾因素以提升點雲套合之可靠度。初步測試在 15 公尺構件之執行結果可獲得約 3 公厘之套合精度。圖 6(a) 為應用點雲數量偵測各內隔板之最佳像對之示意圖，其中橫軸為影像對編號、縱軸為點數量。透過各像幅內是否出現內隔板之點數差別，定義內隔板之最佳像幅資料編號。圖 6(b) 以視覺化展示內隔板邊緣特徵偵測之結果，如紅色邊緣線所示。

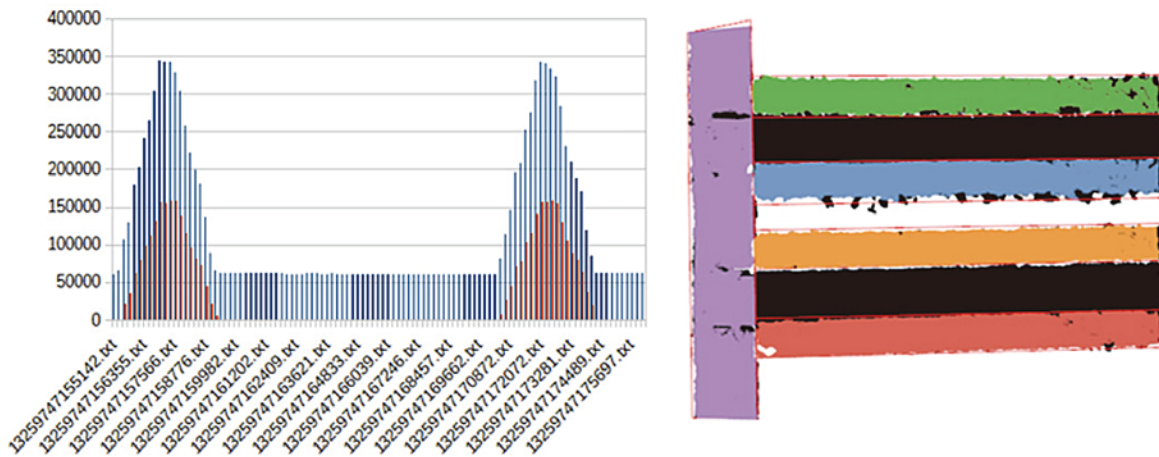


圖 6 內隔板最佳影像對與邊緣特徵偵測示意圖

初步測試與評估

本研究與東鋼鋼結構雲林廠合作進行系統建置與初步測試，為驗證提出之系統架構效益，初步測試以 15 公尺之鋼構箱型柱進行系統試驗。針對此試體系統共蒐集了 616 組高重疊序列影像對。同時，以人工量測成果進行相對性比對。圖 7 展示一組用於內隔板邊緣特徵偵測的點雲。由內隔板點雲成果可以看出，以立體視覺技術由二維影像產製三維之點雲，確實可以

描述構件之幾何並獲得密度均勻的成果。



圖 7 內隔板點雲成果示意圖

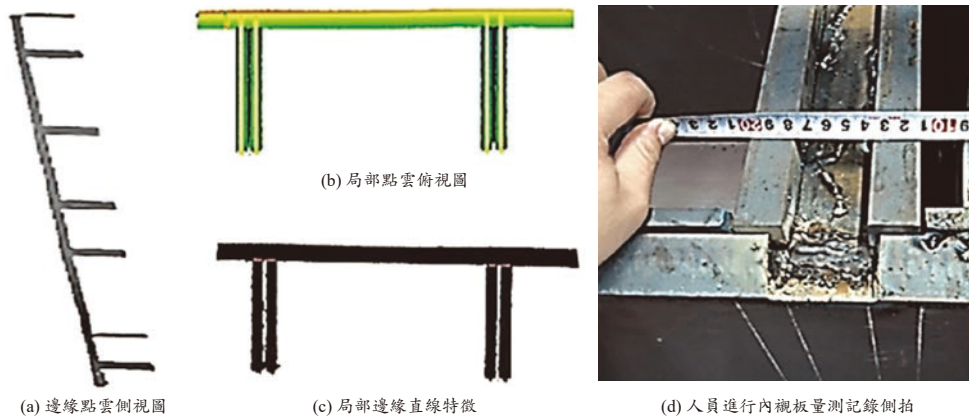


圖 8 測試點雲套合成果及內隔板邊緣偵測成果示意圖

表 2 內隔板厚度檢測結果 (單位:公厘)

隔板編號	1	2	3	4	5	6	7	8	9	20
檢測值	39.14	38.53	39.59	38.97	39.61	39.82	42.16	41.99	39.22	39.20

然而，無可避免地在低紋理、同調區或邊緣位置，影像處理演算法仍無法確保獲得可靠的成果，因而將形成內隔板幾何估計時相應的誤差來源。圖 8 展示初步測試之視覺化成果，其中圖 8(a) 顯示經過雜訊率除並進行整體點雲套合後之成果。而圖 8(b) 及圖 8(c) 顯示一區段之內隔板點雲及邊緣線偵測結果；圖 8(d) 則為人工量測示意圖，透過多次反覆量測之最或是值作為測試成果的相對參考值。除此之外，本次測試之內隔板理論標準厚度為 40 公厘，將視為成果品質評估之真值。

初步測試之構件共包含共 10 片內隔板，比對系統估計與人工量測成果所獲得之方均根誤差為 1.85 公厘，反映出系統自動解算之合理性。而表 2 呈現各內隔板厚度之估計值，與真值 40 公厘相比下其均方根誤差為 1.19 公厘。然而，若將具有較大誤差的第七與第八片之成果排除後，精度可提升至 0.83 公厘。透過人工檢查發現，此兩片內隔板皆是使用同一組影像對進行估計的成果，而該組影像對受到拍攝當下不明原因而導致雜訊較多、點雲較為破裂，因而造成較大的估計誤差。

初步成果評估

本研究開發運用立體影像技術於鋼構件內隔板焊接品質之自動檢測系統，初步測試已驗證其可行性與

效益。在資料處理上所遭遇的最大難題應歸結為，如何在無控制點資訊下，針對低紋理高度幾何重複之鋼構件點雲進行全域套合。有鑑於此，為了獲得合理的套合成果，研究中引入外部約制條件以降低估計誤差，完成系統之核心演算。在實務應用上，研擬的自動檢核系統應可減少製程的作業時間、廠區空間成本，提供具有數據基礎的數位化資訊，提升製程管理自動化程度與生產履歷數據。後續工作將著重於加快演算法效率及優化演算架構，以其更快地回饋檢測成果並同時降低電腦的硬體需求。

參考文獻

1. <https://www.ensenso.com/portfolio-item/n3x/>. (2021/10/1)
2. <https://www.ensenso.com/manual/3.0/tree/cameras/120001-%28a-stereo-79camera%29/calibration/dynamic.html>. (2021/10/1)
3. <https://www.ensenso.com/manual/3.0/tree/cameras/120001-%28a-stereo-81camera%29/parameters/disparitymap/stereomatching/patch-match.html>. (2021/10/1)
4. Hemmer, M. and Schmidt, C. (2016). Convex Hulls, in: Kao, M.-Y. (Ed.), Encyclopedia of Algorithms. 85 Springer, New York, NY, pp. 446-449. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2864-4_508.
5. Ahn, S.J. (2004). Least Squares Orthogonal Distance Fitting of Curves and Surfaces in Space, Lecture 87 Notes in Computer Science. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/b104017>.
6. <http://www.open3d.org/docs/release/>. (2021/10/1)
7. Besl, P.J. and McKay, N.D. (1992). A method for registration of 3-D shapes. IEEE Transactions on Pattern 83 Analysis and Machine Intelligence 14, 239-256. <https://doi.org/10.1109/34.121791>. 