

Instruments Today 2021 Q1

科儀新知



光學量測技術產業應用

*Optical Measurement Technology
and Industrial Application*

【人物專訪】

國立陽明交通大學吳宗信特聘教授

226

ISSN 1019-5440

GMM 均華精密

台灣半導體先進封裝

精密取放設備領導品牌

主要新產品 • 多面檢查晶粒挑檢機 6S Inspection Chip Sorter

• 扇型封裝高精度黏晶機 Fan Out Die Bonder

• 晶圓級雷射刻印機 Wafer Backside Marking



KB-9xxx series High Speed Fan Out Die Bonder

- Bonding accuracy <3um
- Available to fan out / PoW / PoP Process
- Switchable flip function for face down/face up application
- Inspection function for die surface AOI
- High bonding force process ready >300N



歡迎各界精英加入 共同創造產業未來

GMM 均華精密工業股份有限公司
Gallant Micro. Machining Co., Ltd.

新北市土城區民生街 2-1 號
No. 2-1, Minsheng St., Tucheng Dist.,
New Taipei City, 236, Taiwan
Tel:(02)2268-2216

新竹縣竹北市台元一街8號7樓-9
7F-9, No.8, Taiyuan 1st St., Zhubei City,
Hsinchu County 302, Taiwan
Tel:(03)5601-222

REMEX

ANATASE SPINE NAVIGATOR



- Real-Time Visualized Navigation
- Efficient Intraoperative 3D Image Construction
- Innovation Non-contact Procedure



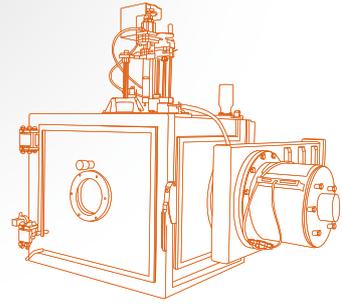
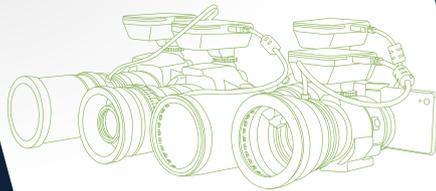
Intai Technology Corp.
Phone: +886 4 23595336
www.intai.com.tw

PRECISION&SAFETY
FOR ALL

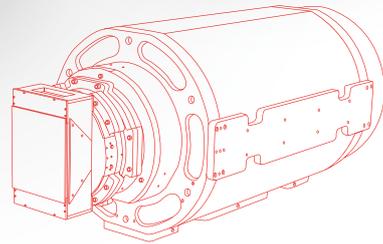
TIRI

儀器客製服務專家

皮下瘀血取像系統



DUV濺鍍腔透視圖



先進封裝製程用
步進式曝光機投影鏡頭系統



智慧儀控設計與整合

Intelligent Instrument Design & System Integration



光學系統設計、製造與檢測

Total Solution Service for Optics



先進鍍膜製程設備開發

Advanced Coating Equipment Development



生醫光電系統

Biomedical Optical System



NAR Labs 國家實驗研究院
台灣儀器科技研究中心
Taiwan Instrument Research Institute

科儀新知

INSTRUMENTS TODAY 季刊

中華民國 110 年 3 月 31 日出版



封面說明

隨著科技產業的快速發展，新興科技產品中形狀精度、功能及異質材料間的整合與測試需求，使得製程技術與量測挑戰與需求愈來愈高。光學量測技術具有非接觸、全場性、速度快與高精度等優勢，已成為工業重要工具，量測系統所提供的數據更是確保品質、改善製程的寶貴依據，扮演著現代產品開發與生產鏈中的重要角色。本期「光學量測技術產業應用」專題，介紹各種光學量測方法，配合數位影像處理技術，建立各種量測系統及產業應用情形。

• 發行人：楊耀州

• 諮詢委員：吳文桂、陳力俊、關志達、蔡定平

• 客座主編：黃吉宏

• 執行編輯：林麗娥、陳柏荔、魏崇倫

• E-mail：editor@narlabs.org.tw

• 網址：http://www.tiri.narl.org.tw/Publication/InstTdy

中華民國 68 年元月創刊

• 地址：新竹市科學園區研發六路 20 號

• 電話：(03) 5779911 轉 304, 313

• 傳真：(03) 5789343

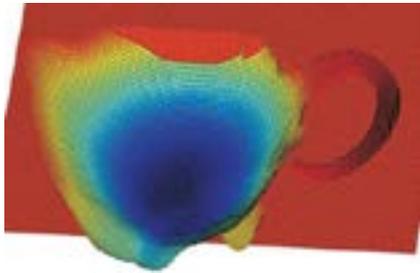
• 設計排版：宇豐廣告實業社

• 電話：(03) 5306633

國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心出版

226 科儀新知

中華民國 110 年 3 月



18



32

廣告索引

- 均華精密工業股份有限公司 ...
.....封面裡
- 鏡鈦科技股份有限公司.....
.....封底裡

人物專訪

- 4 國立陽明交通大學吳宗信特聘教授
成為世界之重：台灣科技發展的韌性與頑固
林麗娥、陳宏彬、陳華琳

光學量測技術產業應用專題

- 7 三維結構光量測方法與應用之回顧
張毓紋

- 24 光學視覺與機械手臂系統整合之校正方法介紹
李俊則、張禎元

- 37 疊紋光學量測法介紹
高國書

- 59 類神經網路視覺對位演算法之光學檢測於基於全面
性摺疊測試的軟性顯示器
溫博浚、洪品軒、曾亭瑜

科儀專欄

- 69 塑膠循環經濟下聚氨酯化學回收技術的發展
芮嘉璋

科普大觀園

- 82 原子力顯微儀發展趨勢「精準探測」
蘇健穎

「國研盃 i-ONE 儀器科技創新獎」得獎作品介紹 2020 年中學組首獎

- 86 醫療代步車-AI 輔助煞車系統
羅敦允、賴宥蓁、呂盈臻、李文翔、陳彥儒、陳安儒

INSTRUMENTS TODAY

March 2021

People

- 4** **Dr. Jong-Shinn Wu, Distinguished Professor of National Yang Ming Chiao Tung University**
Making Taiwan Indispensable to the World: the Resilience and Perseverance of Taiwan's Technology Development

Claire Lin, Hung-Pin Chen, Hua-Lin Chen

Special Issue: Optical Measurement Technology and Industrial Application

- 7** **A Review of 3D Structured Light Measurement Methods and Applications**

Yu-Wen Chang

- 24** **A Systematic Literature Review on Eye-Hand Calibration**

Chun-Tse Lee, Jen-Yuan Chang

- 37** **Introduction of Moiré Method and Application**

Kuo-Shu Kao

- 59** **Optical Inspection of Neural Network Vision Alignment Algorithm for Flexible Displays Based on Whole-folding Test**

Bor-Jiunn Wen, Pin-Hsuan Hung, Ting-Yu Tseng

Column

- 69** **The Development of Polyurethane Chemical Recycling Technology under Plastic Circular Economy**

Chia-Wei Jui

Popular Science

- 82** **Development Trends of Atomic Force Microscopy - Precision Detection**

James Su

NARLabs *i*-ONE Competition The First Prize of 2020 in High School Group

- 86** **Mobility Scooter AI Braking Assistant**

Tun-Yun Lo, Yu-Chen Lai, Ying-Chen Lu, Wen-Shiang Li, Yan-Ru Chen, An-Ju Chen



64



100

國立陽明交通大學吳宗信特聘教授

成為世界之重：台灣科技發展的韌性與頑固

Making Taiwan Indispensable to the World: the Resilience and Perseverance of Taiwan's Technology Development

撰文：林麗娥、陳宏彬、陳華琳

頑固實踐火箭夢，帶動國內尖端科技研發、系統整合能力

《科儀新知》這次要帶各位讀者一起認識一直致力於台灣自主研發製造火箭，素有「火箭阿伯」稱號的吳宗信老師。吳老師目前任職於國立陽明交通大學機械工程學系，鑒於火箭科研和與豐富的實務經驗，今(2021)年8月1日即將接任國家太空中心主任。吳老師擁有美國密西根大學航太工程博士學歷，研究專長除了火箭推進燃燒與系統整合、稀薄氣體動力學模擬、平行科學計算、低溫電漿物理與應用，更是目前全球少數擁有「彗星噴流平行化模擬技術」的專家。同時他也是美國機械工程師學會會士、美國航太學會副會士與美國航太學會混合式火箭技術委員會委員。

吳老師經常比喻火箭是「火車頭產業」，在於火箭是一門跨領域的科學與技術，幾乎所有理工學院的學門都包含其中，範圍涵蓋到機械、電子、電機、材料、化工、資訊軟體/硬體、通訊等多項領域，因此，系統整合能力是一大考驗。而各項技術之所以可以應用到實際的系統或次系統中，需要經過許多的模擬、實驗、改良及實際的測試。在系統工程中，技術備便水準(technology readiness level, TRL)是國際各政府機構、學研單位、企業機構廣為使用，來衡量技術水準的最佳指標，在應用相關技術前，先衡量技術的成熟度。充份證明技術可行性後，才會整合到系統或次系統中。因此，打造一支可以離開地球的火箭，必須綜合各領域知識，將技術推展到極致，才能應付太空的嚴峻環境。爾後，人們再將太空科技中各項成熟的技術，應用到日常生活中的各項用品，進而創造出許多新穎產品，帶動產業發展與需求。像是為了減輕太空人衝擊力道的「記憶海綿」，後來被作成床墊和枕頭；「手持無線吸塵器」其實是阿波羅任務的太空人用來蒐集月球岩石的工具；「氣墊鞋」是製造太空服的「中空吹塑成型」工藝的應用。

台灣在全球半導體產業占有優勢，但仍屬代工形式。長期觀來，台灣仍然需要多元的產業發展。因此，如果台灣可以將自製的載物火箭射入太空，就可以證明台灣尖端科技的研發與系統整合的能力，就可以提升各領域的技術備便水準。技術備便水準高的項目，直接協助廠商改善生產流程或是成為產品商品化的機率較高，進而帶動技術商業化。

台灣的可信賴度與技術可成為全球製作複雜設計原型的基地

2014 年，吳老師帶領國立陽明交通大學前瞻火箭研究中心 (Advanced Rocket Research Center, ARRC) 研發團隊，成功發射 HTTP-3S。為了讓累積的技術繼續傳承，讓學生可以持續往火箭產業發展、扎根。2016 年，老師從大學借調一年後，帶著一群學生創辦研發商用火箭的民間公司「晉陞太空科技」。老師在這創業的兩年內為了尋找合適的關鍵零組件與相關製作能力加上在 ARRC 時的群眾集資，接觸了不同類型的廠商。有些是慕名而來主動接觸，有些則是得利於台灣人際網路的密集連結。在這過程中，吳老師認識瞭解到台灣產業鏈的豐富及強大，進而確信台灣的工業基礎 100% 有辦法支援台灣自主研製衛星載具。除此之外，更發現，由於台灣是民主法治國家、地小人稠，技術發展純熟度高。假設尋覓的廠商在屏東，一天內就可以抵達，直接就可以去拜訪廠商，很快就可以確定公司技術是不是可以支援。加上台灣廠商的可信賴程度高、謹守保密協議、品質穩定，非常適合全球各個研發公司製作複雜的設計原型 (prototype)。

吳老師目前所進行中的 HTTP-3A 計畫，目標是發展全混合式燃料雙節的類衛星載具，以垂直發射、雙節均採取節流控制與推力向量控制 (thrust vector control, TVC)，藉此實現姿態與軌跡控制。團隊所使用的 TVC 引擎馬達以及節流控制的球筏，皆是來自於國內的廠商。TVC 引擎馬達採用的不是自阿波羅計畫時期即有的傳統 Gimbal TVC，而是採用 Direct-Drive TVC，頻寬可以控制到 5 赫茲 (Hz)，可快速反應外來的干擾，在在證明台灣很多技術都是『巷子裡』的隱形冠軍。如果可以藉由火箭系統的整合，就可以提高技術備便水準，進而帶動台灣產業發展，走向國際市場。

用 OKR 輔以 IT 工具進行組織與技術管理

吳老師提到，近幾年他開始使用「目標與關鍵成果」(objectives and key results, OKR) 輔以 IT 工具，來進行技術與組織管理，成效十分顯著。OKR 組織管理方式可以讓組織盡量扁平化，強化上下級目標設定的連結，培養團隊當責態度與行為，進而順利推動跨部門合作。例如要做一台蝕刻機，涉及電子、電機、機械工程等領域，就需要跨部門來協力完成。因此，要執行這樣的專案計畫，必須先界定團隊範圍，找好團隊，接著設定好目標 (objective)，而這個目標必是確切的、可衡量的，例如：我們要作一個優於市場的蝕刻機。然後，設定若干個可以量化的關鍵成果 (key results)，像是要做到多少效率與規格的蝕刻機。

而在執行過程中，如果善用 IT 工具，導入 OKR 管理概念，也可以幫助我們進行專案計劃管理，控制研發進度、避免技術斷層。像是有些開源軟體，它除了最基本的 code review，還有代碼託管、BUG 跟蹤、專案團隊管理、敏捷流程嵌入管理、CI 擴展接入等功能。另外，研發進度管理最重要的精神在於，在該研發任務下，所有相關資訊必須是同步透明 (concurrent transparency)，並且僅限於該工作項目成員流通 (need-to-know basis)，如此才能使同一任務下的技術研發人員溝通無礙。除此之外，參與技術研發的所有人，在裡面詳實記錄下所有的研發流程 (procedure)、設計圖 (design)、專有技術 (know-how) 等，因此可以成為該技術的資料庫 (database)，只要搜尋關鍵字，就可以了解進度與相關知識。在盤點研發進度時，只要確認技術開發中每一階段性標的成果 (milestone) 即可，就可以節省開會時間、增加效率，即便學生畢業、人才流動，也不會影響到開發進度。

執行我國第三期太空計畫是未來重點執行項目

老師所帶領的 ARRC 團隊，在 2020 年再次啟動集資，邀請全民加入台灣太空隊，發起全台第一支類衛星載具火箭 HTTP-3A 集資計畫，多達 7,361 人支持。目標將混合式火箭加入姿態控制發射 100 公里，目前已經達成全世界第一次混合式火箭空中懸浮飛試展示。老師表示，火箭、衛星以前都是戰略科技，台灣若要發展太空，擁有自己的發射器、也就是火箭，是最後一塊拼圖。有朝一日不必委託他國代為發射衛星，而是以 MIT 火箭搭載台灣自製衛星升空，下一步發展成為太空經濟 (space economy)，可以有更多的產值、高品質的工作機會。在接任國家太空中心主任一職之前，會繼續執行科技部計畫及 HTTP-3A 計畫，以不負群眾支持。而太空中心是國家執行太空政策與幕僚的單位，未來擔任太空中心主任一職，最重要的目標是執行我國第三期「太空科技長程發展計畫」，建構台灣太空科技技術，進而創造台灣未來太空科技發展與太空產業進步的優質環境。



國立陽明交通大學吳宗信特聘教授

Prof. Jong-Shinn Wu is recently elected to the Member, Technical Committee 17 on Emerging Plasma Nanotechnologies, Nanotechnology Council, IEEE.

三維結構光量測方法與應用之 回顧

A Review of 3D Structured Light Measurement Methods and Applications

張毓紋

Yu-Wen Chang

傳統二維影像技術已經不敷現今的市場需求，多了一項深度資訊的三維量測技術因此興起，其中結構光技術具有高解析度與高精度的優點，應用廣泛。本文首先介紹三種常見的非接觸式三維形貌量測方法，並說明結構光三維量測技術的工作原理與校正方法之演變。接著將結構光編碼方法與編碼圖案依分類來比較其優缺點，再列舉結構光三維量測技術在各種領域中的應用。最後討論一些目前三維量測技術的技術障礙與挑戰，並提出潛在應用與未來方向，以了解其發展性。

Traditional 2D image techniques are insufficient for market demand, and 3D measurement techniques, which owns the depth information, are rising. Among 3D measurement techniques, structured light method is widely applied due to its high resolution and high accuracy. In this article, first, three common 3D non-contact shape measurement techniques will be introduced, and the principle and the calibration of structured light method will be explained. Next, the coding methods and patterns will be classified and compared by their characters, and some examples of applications in different fields will be listed. Finally, present challenges and improvements of 3D measurement techniques will be discussed to understand its future development.

一、前言

形貌量測技術 (shape measurement techniques) 在各種領域當中都有廣泛的需求，除了生醫工程、電腦科學等領域之外，在工業製造上也常用於檢測與模型重建，甚至在娛樂產業也能有所應用。而比起二維量測技術，三維量測技術多了深度這項資訊，能建立空間立體座標，提升影像辨識度。

三維形貌量測技術可以分為被動式方法與主動式方法。被動式方法，如最常見的立體視覺 (stereo vision)，不使用主動式的照明設備，而是利用兩個或兩個以上的相機從不同視角對待測物體進行拍攝，分析影像找到對應相關點，再用三角量測法計算以得到距離、座標等資訊。

主動式方法包含飛行時間測距 (time-of-flight, ToF) 與結構光 (structured light) 等。飛行時間測距技術是利用雷射光或 LED 發出紅外線，並接收照射在待測物體上的反射光，利用訊號時間差來計算距離。由於飛行時間測距技術不需用到三角量測法，整體系統也較小，適合應用於行動裝置上。

結構光系統則與立體視覺系統相似，但將其中一個相機以投影機取代，透過投影特定的光斑圖案到待測物體上，再用相機拍攝映有光斑圖案的待測物體，將物體表面受到輪廓影響而扭曲的圖像與原始投影圖像比對後，利用三角量測法計算來得到其座標、距離等資訊⁽¹⁾。三種量測方式的比較可參考表 1。

本文主要探討主動式方法中的結構光技術，結構光技術有快速、高解析度，以及高準確度的優勢，然而其容易受到環境光影響，量測距離不能過長。

表 1. 立體視覺、結構光、飛行時間測距之量測方法比較，整理自文獻^(2,3)。

	立體視覺	結構光	飛行時間測距
量測方式	被動式	主動式	主動式
反應時間	中	快	極快
延遲性	中	中	低
量測範圍	中	短—中長	短—中長
辨識精度	低	高	中
功耗	低	中	中高
優點	低成本 適合在戶外運作	深度準確度高	掃描速度快 探測距離遠
缺點	昏暗環境較不適用 延遲性高	不適用長距離 易受環境光影響	準確度有限 強光環境較不適用
應用	3D 相機 VR 裝置	人臉辨識 工業檢測 遊戲機	醫療與工業檢測 光達測距 行動裝置

二、工作原理

1. 技術背景

結構光技術是利用投影機主動投射特定光斑圖案到物體上，此光斑圖案帶著編碼資訊，再將待測物體放置於相機的視野當中並拍攝，藉由分析前後圖像上特徵圖案的形變狀況來判斷物體的表面形貌並建立三維座標。結構光技術的掃描速度很快，也能一次量測大範圍區域，適合應用於動態測量。

結構光系統架構 (圖 1(b)) 與立體視覺系統架構相似 (圖 1(a))，首先先介紹立體視覺系統原理。

在立體視覺系統中存在對極幾何 (epipolar geometry) 關係，如圖 1(a) 所示，若空間中有一待測物體的特徵點 p ，點 p 與左右相機的焦點 (原點 o^l 、 o^r) 會構成對極平面 (epipolar plane)，對極平面與左右相機圖像的交線稱為對極線 (epipolar line) (L^l 、 L^r)，相機焦點連線與圖像的相交點稱為對極點 (epipole) (e^l 、 e^r)，而點 p 投影在左右圖像上對應點 (p^l 、 p^r) 會落在對極線上。根據左右圖像上特徵點的關係與約束條件，便能得到點 p 的三維座標。

立體視覺系統架構簡單且校正方法容易，但準確度不夠好，因為立體視覺依賴相機拍攝的圖像來分析，若是待測物體表面形貌不夠明顯，便很難抓取到圖像上的特徵對應點。而結構光技術使用主動式光源，透過分析光斑圖案的扭曲狀況來校正，可以避免立體視覺系統中對應點困難的問題，提高準確度。結構光系統架構可參考圖 1(b)。

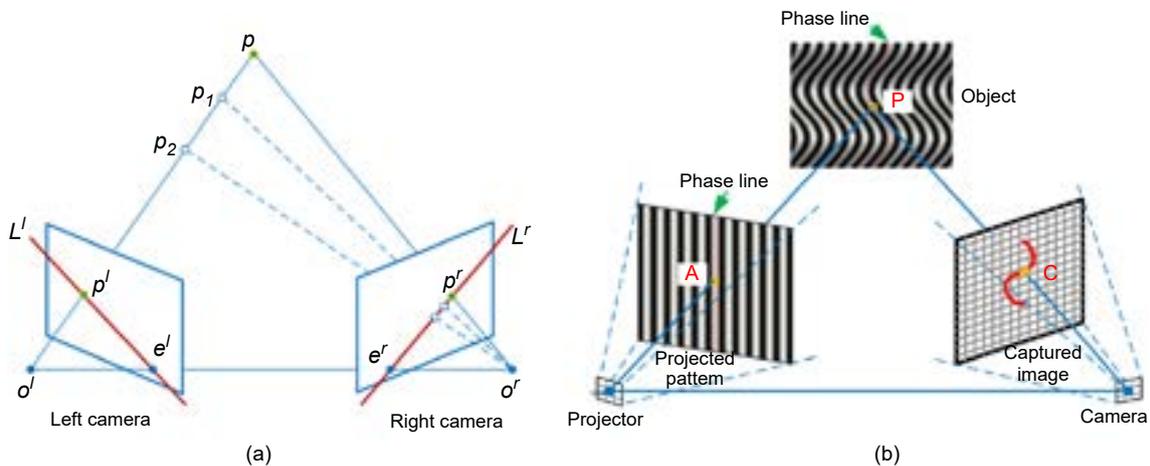


圖 1. (a) 立體視覺系統架構 (b) 結構光系統架構，取自參考文獻⁽¹⁾。

2. 校正方法演變

早在 1985 年，Jalkio 等人⁽⁴⁾ 探討了結構光技術的系統設計，列出影響結構光技術判斷準確度的因素，如表面材質、系統本身的投影誤差、光斑 (speckle) 等，並提供了一些改善方法。同時，他們也實際製作了多條紋結構光系統之原型，為結構光技術奠定了基礎。結構光技術的校正方法通常致力於提升相機、投影機之座標系與參考座標系的關聯性⁽⁵⁾。在 2000 年，Zhang⁽⁶⁾ 發展了一種相機校正方法，只需透過旋轉相機或待測圖像的方位，取得圖像平面與面上幾個特徵點值即可輕易校正，不只降低設備成本，也增加使用彈性，成為一種較常見的校正方法。即使校正方法不斷被改善，要做結構光的校正還是很困難，主要是受限於投影機無法輕易取得影像來進行三角量測法。

在 2006 年，Zhang 與 Huang⁽⁷⁾ 繼而發展一種能讓投影機像相機一樣獲取影像並校正的技術，他們結合相位偏移技術 (phase-shifting method) 與多條條紋投射，建立起相機與投影機的對應像素值而得到投影機的圖像，並能同時獨立地校正相機與投影機。在這之後，結構光技術便能沿用相對成熟的立體視覺系統校正方式，達到又快又準確且穩健的表現。校正投影機離焦 (out-of-focus) 問題的方法進一步被研究^(8, 9)，使量測技術再達到更高的準確度與速度。此外，捕捉可移動待測物的校正方法也被發展，能夠避免離焦問題、減少投射誤差並提高辨識精度⁽¹⁰⁾。

之後甚至也有研究團隊⁽¹¹⁾ 反過來將結構光的校正技術納入立體視覺系統中，透過將立體視覺的系統架構以單個相機與一些鏡組的配合來取代，如圖 2 架構圖所示，而能簡化立體視覺系統設備，降低成本，並避免兩個相機之間的同步性的問題。近期，更新的技術也開始被運用於結構光技術中，例如在 2019 年，Zhong 等人⁽¹²⁾ 不使用相位偏移技術，而是透過機器學習 (machine learning) 的模型來重建相位，相較之下不僅量測誤差減少，而且運算效率提升，更能適用於即時量測系統。

隨著校正方法逐漸成熟，結構光技術逐漸在各個領域有廣泛的發展與應用，而對其技術表現的要求也越來越高。影響結構光技術表現的因素有很多，包含校正參數、校正方式等等，而其中一個關鍵的因素是結構光的編碼方式⁽¹³⁾，而不同種的編碼圖案也會影響結構光量測技術的速度、準確度與解析度。

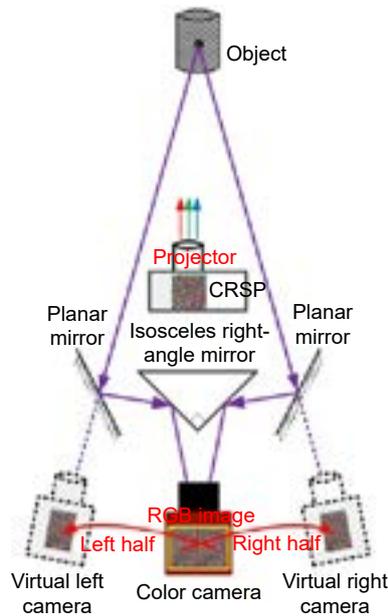


圖 2. 改良立體視覺之結構光系統架構圖，取自參考文獻⁽¹¹⁾。

三、技術分類

1. 編碼方法

結構光的編碼方法可分為時間多工 (time multiplexing)、空間鄰域 (spatial neighborhood) 以及直接編碼 (direct coding) 三種類型，分別適用於不同的環境或待測物體^(14, 15)。

1. 時間多工

時間多工的編碼方法是沿著時間順序在不同的時間點用投影機投影不同幅的光斑圖案，每次投影都能對應待測物體各點而產生一個數值，再將圖像解出各點編碼資訊，每個像素依時間排列會具有多個數值，因此稱為時間多工，示意圖可參考圖 3。隨著投影機與相機的進步，可以利用強度變化與顏色變化⁽¹⁶⁾ 來產生更多種編碼圖案，而條紋寬度限制問題可以透過相位偏移技術解決，也能避免顏色混合的問題。此種編碼方式能達到很高的解析度，較適用於固定裝置，以免晃動造成誤差，然而投影的模型會較為複雜。

2. 空間鄰域

空間鄰域的編碼方法只需使用一種圖形特徵來投影，此光斑圖案的特徵可由不同顏色、形狀或條紋所組成，透過與鄰近圖形特徵的相關性來得到點位資訊。由於圖案中沒有太多複

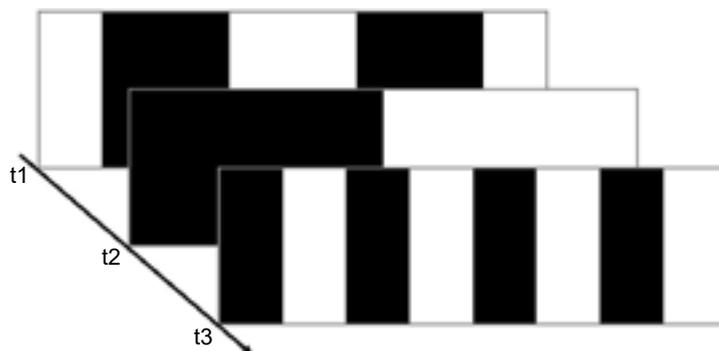


圖 3. 時間多工編碼方式示意圖。

雜資訊，投影設備簡單，成本也較低，在沒有時間因素的影響下，適合用來掃描動態物體。圖形通常會經由德布魯因序列 (De Bruijn sequence) 或亂數序列來生成，可參考圖 4，也有人使用不透過數學模型的非正規編碼方式 (non-formal codification) 來生成圖形。此種編碼方式會受限於投影像素的大小與數量而影響到解析度；為了確保使用上的穩健性，解碼方法也會較為複雜。若想增加空間解析度，便會使用網格等二維空間編碼方法 (M-array)。如 2008 年，Kawasaki 等人⁽¹⁶⁾ 便發展了利用簡單網格圖案來為動態物體重建三維形貌的技術。



圖 4. 空間鄰域編碼—德布魯因序列圖案⁽¹⁷⁾。

3. 直接編碼

直接編碼的方法是直接將灰階漸層或彩色漸層的圖形投影到待測物體上，如圖 5，根據每個像素接收到的數值來確定座標。若待測物表面不均勻或有反射狀況時，數值便會不連續，影響到解析度與準確度。此種編碼方式還會受到待測物表面顏色與環境色調影響，通常需要多組參考圖像來解碼，既不適用於動態物體，色差也不容易調整，因而較少使用。

2. 編碼圖案

結構光技術至今已經發展出各式各樣的編碼圖案，以下便分別介紹幾種常見的編碼圖案，並試圖比較其優缺點^(1, 17, 18)。

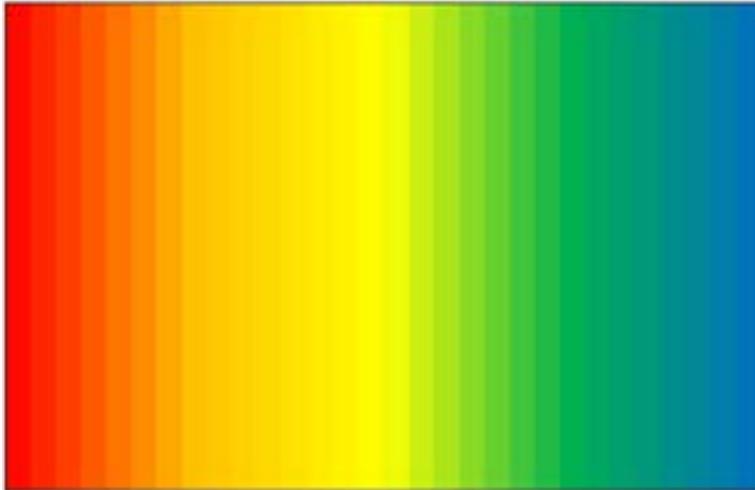


圖 5. 直接編碼圖案。

1. 二維偽亂數編碼圖案 (2D Pseudorandom Codifications)

此種編碼圖形也稱為統計形樣 (statistical pattern)，利用亂數編碼或德布魯因序列的方式生成一個二維矩陣，如圖 6(a)、(b)。其中任何部份的組成都是獨一無二的。此種圖案的優點是很好理解與實行，並且容易縮小化，很適合用於商業感測器上。然而缺點是對雜訊十分敏感，而且會受限於投影機的像素值導致空間解析度不高。

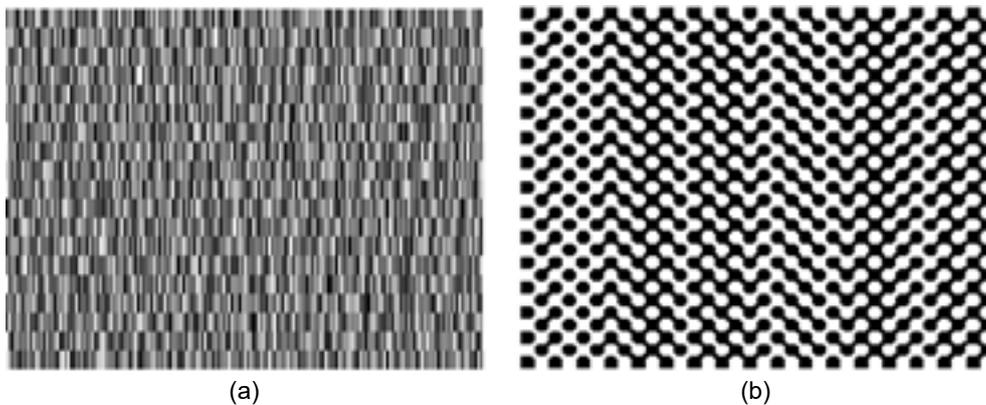


圖 6. (a) 黑白二維偽亂數編碼圖案 (b) 二維德布魯因序列圖案，分別取自參考文獻^(18, 15)。

2. 二進位制編碼圖案 (Binary Codifications)

二進位制編碼圖案顧名思義就是只由兩種強度數值組成的圖案，全黑為強度 0，全白為強度 1，每個像素上存在其獨有的二進位制編碼，如圖 7 所示。此種圖案的優點是解碼簡單、計算快速、穩健，特別是針對表面起伏變化的量測，不過缺點是條紋數量受限於投影機與相機的像素值，進而影響到空間解析度，因此不適合高速的應用。

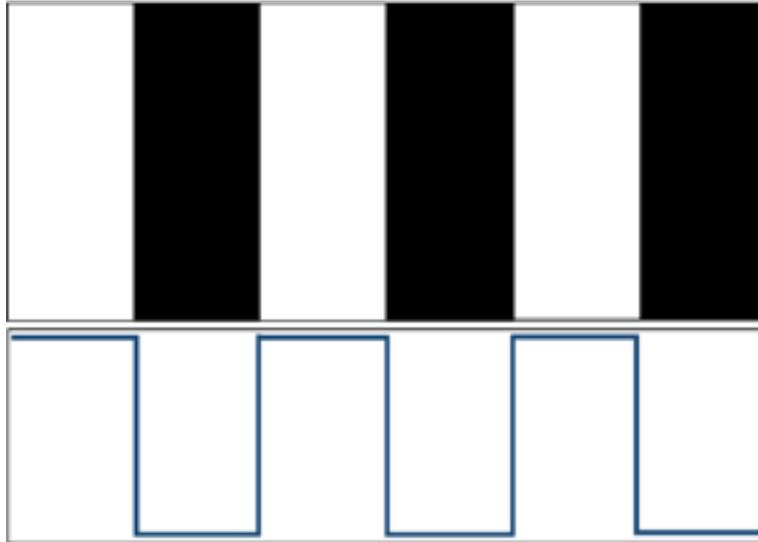


圖 7. 二進位制編碼圖案與強度值示意圖。

3. N-ary 編碼圖案 (N-ary Codifications)

N-ary 編碼圖案使用範圍從 0 到 255 的強度數值，不同的數值代表不同的強度，圖案由不同的強度比例組合而成。N-ary 編碼圖案的優點在於使用了多種強度數值而能減少投影所需的條紋數量，進而提高掃描速度。然而，強度數值多也導致鄰近條紋對比度不夠高的問題，容易受到物體表面狀況影響，如圖 8 所示。不過這個問題能透過相位偏移技術或使用不同種的光斑圖案來改善。

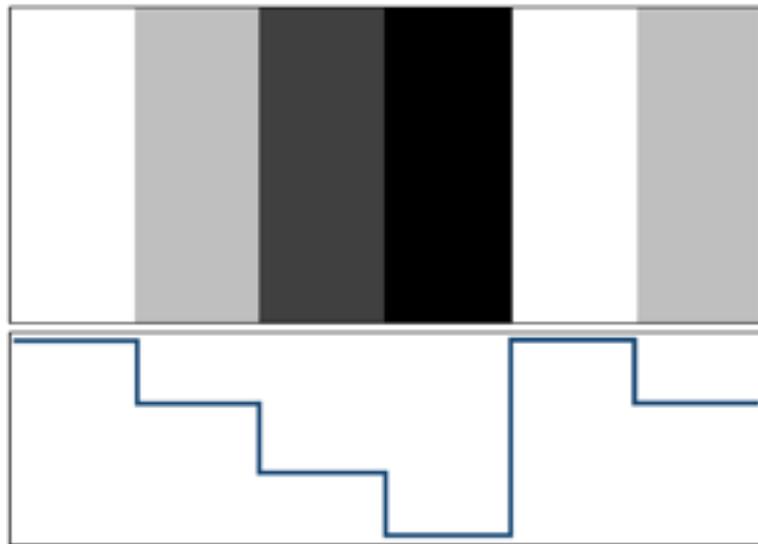


圖 8. N-ary 編碼圖案與強度值示意圖。

4. 三角／梯形相位編碼圖案 (Triangular/Trapezoidal Phase Codifications)

三角相位編碼圖案與 N-ary 編碼圖案相似，差別在於使用三角形圖形，強度值是根據三角形截面的斜率而生成，如圖 9(a)、(b)。此種編碼圖案的優點是較簡單且速度快；而缺點也跟 N-ary 編碼一樣，對雜訊的影響很敏感，不過同樣能透過相位偏移技術或是利用不同種強

度值的三角形組合來改善⁽¹⁹⁾。另外，梯形相位編碼圖案由 Huang 等人提出⁽²⁰⁾，能改善三角相位編碼的雜訊問題。

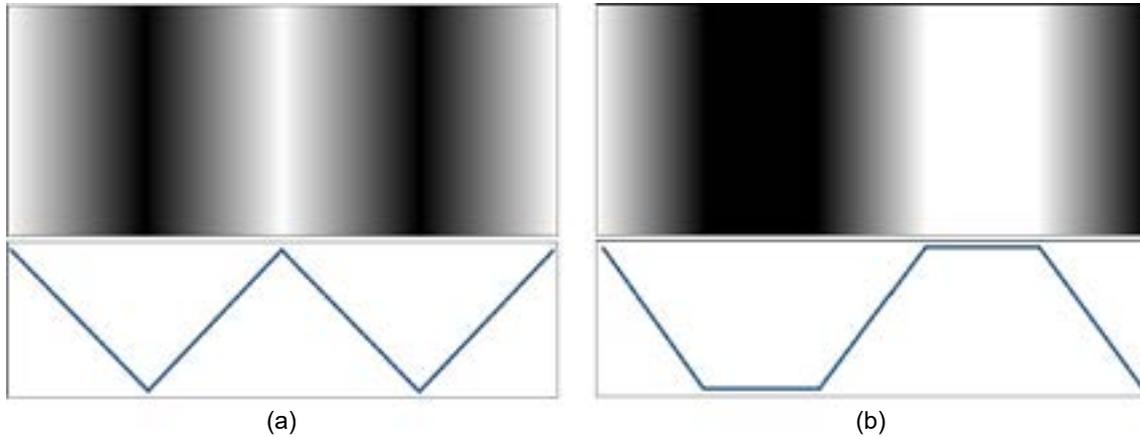


圖 9. (a) 三角相位編碼圖案 (b) 梯形相位編碼圖案與強度值示意圖。

上述的編碼圖案都會受限於投影機的解析度，而無法達到太高的準確度。而且依靠強度變化的辨識方式容易受到表面形貌影響而不穩定，此時正弦波相位圖案便有其優勢。

5. 連續正弦波相位圖案 (Continuous Sinusoidal Phase Codifications)

正弦波相位圖案可以達到像素等級的解析度，因為圖像中的強度變化存在已知的頻率下，透過傅立葉轉換輪廓法 (Fourier transform profilometry) 便能輕易得到各點的相位資訊來建立相機與投影機的關係，不必再使用強度數值方法來運算，進而增加準確度。正弦波相位通常會搭配相位偏移技術，使每個像素具有獨特的強度值，也避免受到雜訊與表面形貌的影響，如圖 10 所示。

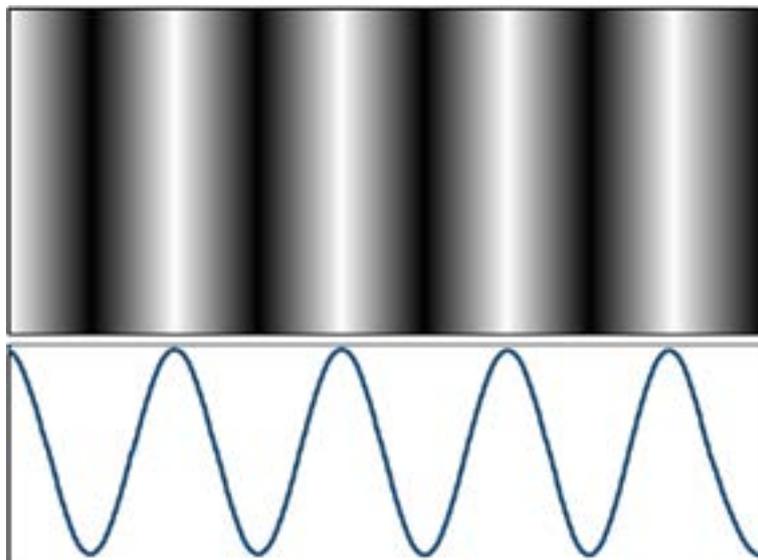


圖 10. 連續正弦波相位編碼圖案與強度值示意圖。

相位偏移技術簡單來說是相機得到的波形圖案透過公式得到範圍在 2π 之間 $(-\pi, +\pi)$ 的相位資訊，稱之為摺疊相位 (wrapped phase)，為了確保準確度，通常需要三個以上的摺疊相位圖案，將這些連續的摺疊相位透過時間或空間上的相位展開算法 (phase unwrapping algorithms) 得到相對相位，再與參考圖像比對，便能得到真實的連續相位，可參考圖 11 相位對照圖與圖 12 相位展開示意圖。

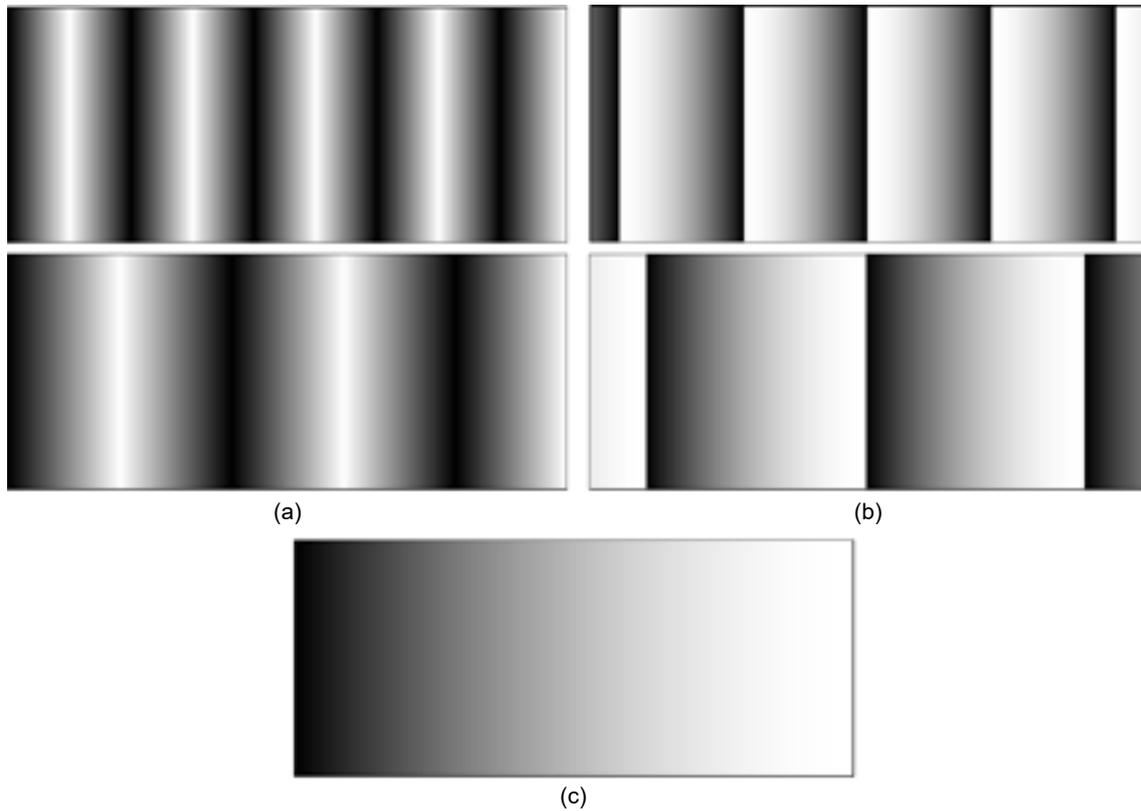


圖 11. (a) 兩種原始投影圖形與 (b) 對應的摺疊相位以及 (c) 最終相位展開後真實相位示意圖，圖重製於文獻⁽¹⁸⁾。

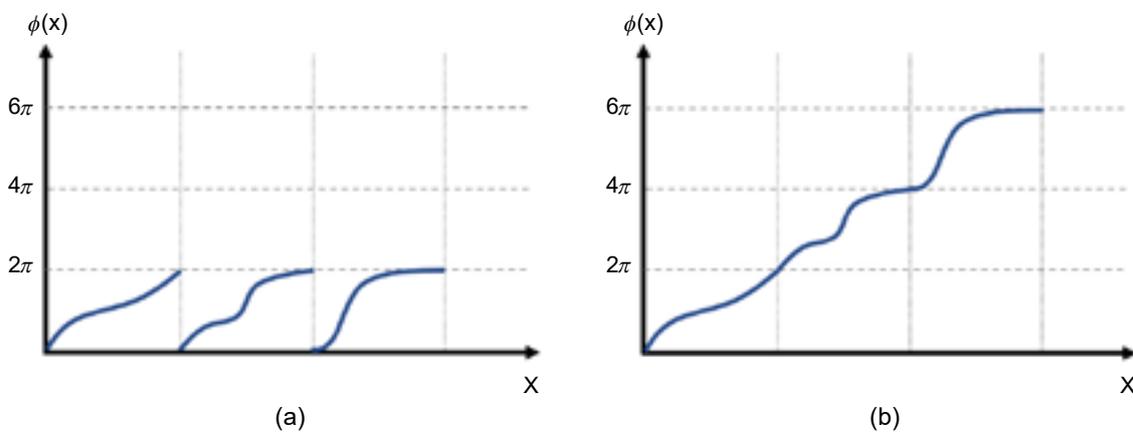


圖 12. 相位展開過程示意圖 (a) 展開前相位 (b) 展開後相位。

6. 顏色編碼圖案 (Color Coded)

利用顏色編碼的圖案有很多種類，可以將不同顏色依照不同強度比例組合在一起，形成像是彩虹般的圖案，只要知道組成圖案的比例，解碼便相當容易，如圖 13(a)；或是將顏色矩陣當作特徵來進行辨識，如圖 13(b)。此種編碼圖案能減少所需圖案的數量並加快資料讀取的速度，但容易受到表面顏色影響而應用有限。

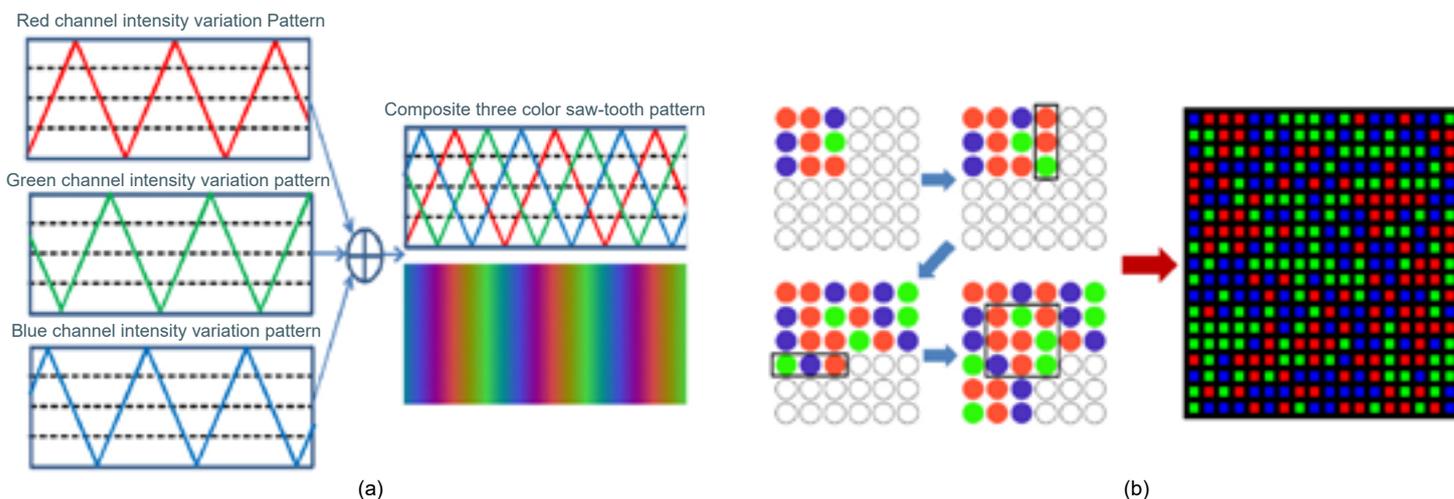


圖 13. (a) 顏色強度編碼圖案 (b) 顏色矩陣編碼圖案，取自參考文獻⁽¹⁷⁾。

7. 其他混合編碼圖案

編碼圖案除了利用顏色或強度、線條 (一維) 或網格 (二維) 外，還可以混合使用⁽¹⁷⁾。而這些編碼方法的改進都是為了更佳的结构光技術表現，追求高解析度、高速度以及高準確度之間的平衡，或期望能達到其中一項更優良的狀況。表 2 列出了編碼方式與常用圖案類型的整理與優缺點比較，可供參考。

表 2. 編碼方式比較，整理自參考文獻⁽¹⁵⁾。

編碼方式	優缺點	圖案類型
時間多工	優：實行簡單 空間解析度高 準確度高 缺：不適合量測動態物體	二進位制編碼圖案 N-ary 編碼圖案 灰階編碼圖案 + 相位偏移法 混合編碼
空間鄰域	優：適合量測動態物體 缺：空間解析度低 解碼方式較複雜	非正規編碼圖案 偽亂數編碼圖案
直接編碼	優：空間解析度高 投影圖案簡單 缺：易受物體表面顏色影響	灰階漸層圖案 彩色漸層圖案

四、應用

現今科技對於三維量測技術的需求非常大，當然結構光量測技術也不例外，許多領域都需要用到結構光量測技術來快速建立三維模型，以下便分別介紹一些應用領域並列舉相關例子⁽¹⁸⁾。

1. 工業製造

因為結構光技術快速與高準確度的特性，在工業裡可以用上的地方相當多，包括模型重建、缺陷檢測、品質管理等等。

在產品週期初期或是逆向工程 (reverse engineering) 就常常會用到結構光技術，通常是先以人工方式找到適合的原型，再將其運用結構光技術轉換成電腦 CAD 模型檔；或將已有部件經過結構光技術掃描建立模型檔，再在電腦中進行修正與調整，以此縮短產品原型改良的時間⁽²¹⁾。

另一項常見的運用是工業檢測，如將結構光方法應用在檢查焊珠 (weld bead) 缺陷上，在焊刀裝置上結合結構光的視覺檢測系統，在焊後便能即時檢測是否焊歪⁽²²⁾，如圖 14 所示。結構光技術能即時取得資料與快速掃描，因此也能將其納入工業管理的一部份，例如 Bieri 跟 Jacot⁽²³⁾ 就利用結構光技術設計了一個生產線上的品質管理的原型。

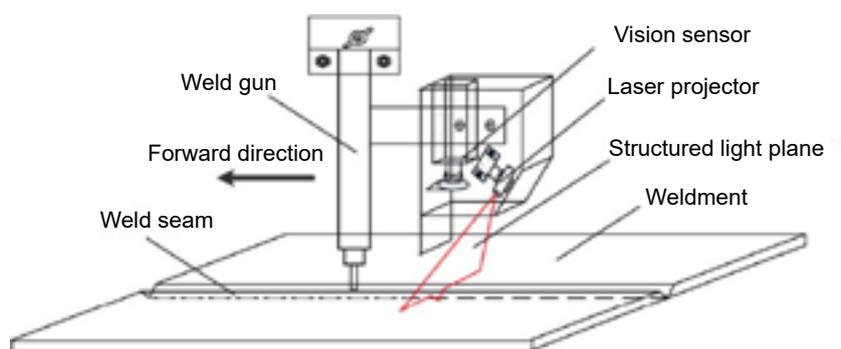


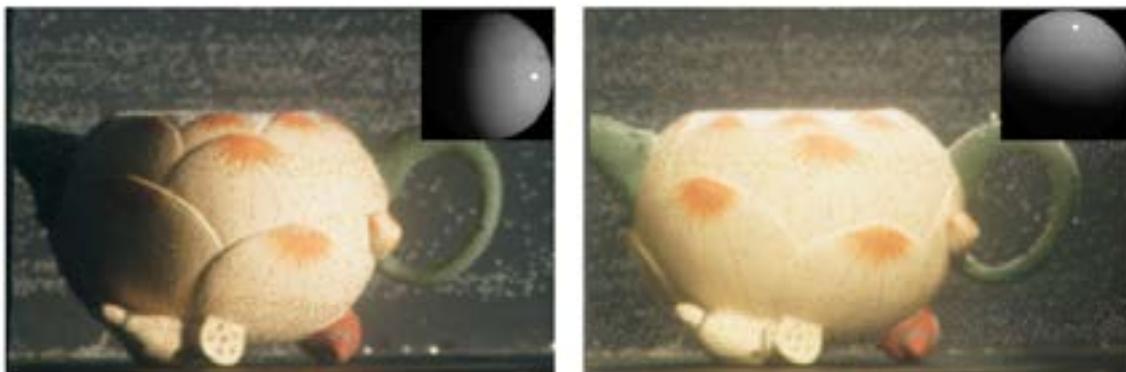
圖 14. 焊接與視覺感測系統示意圖⁽²²⁾。

2. 環境重建

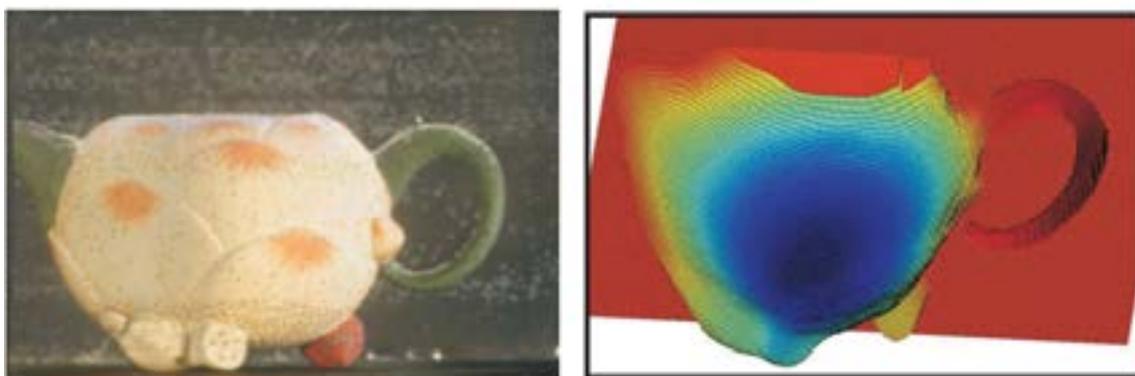
由於結構光量測技術不需要直接接觸物體，因此很適合用來遠距取得環境形貌，特別是那些對於人類來說相當危險或難以到達的地方。相關應用如海底地貌重建，隧道環境形貌模型建立等等。

Narasimhan 跟 Nayar⁽²⁴⁾ 有鑑於結構光技術能應用於其他介質上而建立了幾種量測方式並成功量測在水裡的物體形貌，如圖 15 所示。在 2011 年，Bruno 等人⁽²⁵⁾ 運用結構光掃描器，展現了海底地形三維重建模型的結果。另外，Zhan 等人⁽²⁶⁾ 也結合了多組相機與結構光技術來取代鐵路隧道的環境檢測，以減少作業人員遇到危險的機率。除了這些應用，結構光技術也可用在犯罪現場、災害意外後的地形重建或與搜救機器人結合來探索環境狀況。

Pure water (no scattering) - ground truth



(a) Images (2 out of 8) captured in pure water



(b) Albedo and shape computed using traditional method

圖 15. 利用結構光技術於水中量測物體之結果⁽²⁴⁾。

3. 生醫

在生醫領域，二維影像檢測技術已經有很廣泛的應用，然而缺少深度資訊可能會在判斷時出現盲點，因此 3D 影像技術便有其必要性；而有了結構光技術的輔助，對於手術進行也是一大幫助。早在 1994 年，Bhatia 等人⁽²⁷⁾ 便首創了能協助整形手術的結構光掃描器。透過結構光技術能快速取得身體外型輪廓等資訊，讓醫生與病患得以透過模型來討論手術的實施方式。此外，內視鏡也可以結合結構光技術，透過縮小相機與投影機的尺寸，設計出特別的內視鏡來協助醫生在手術中更好觀察體內部位⁽²⁸⁾，如圖 16 所示。

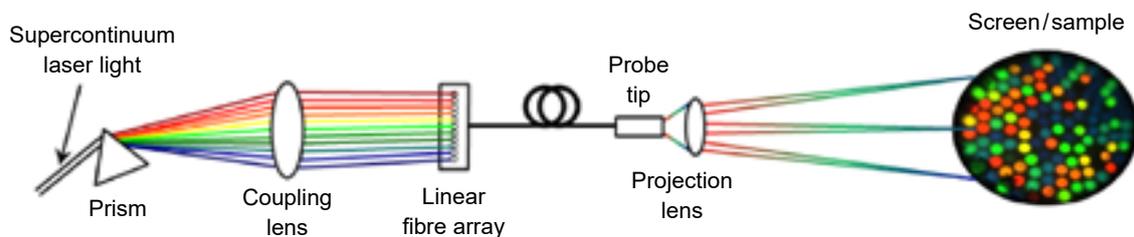


圖 16. 結合結構光技術之特殊內視鏡示意圖，端點尺寸直徑僅有 12.5 mm⁽²⁸⁾。

4. 生物辨識技術

生物辨識技術使用指紋、瞳膜、聲音或臉部辨識等生物特徵來進行判斷，由於生物辨識是獨一無二的特徵且無法取代，許多人的裝置，如手機、筆電，甚至是銀行帳戶或家中的安全鎖都會使用生物辨識系統。然而現在所用的二維辨識方法還是有可能辨認失敗，也可能會因為被人偽裝辨識而遭到竊盜。此時，三維結構光量測方法便能派上用場。例如 Bowyer 等人⁽²⁹⁾ 便結合二維與三維方法來加強臉部辨識的功能，透過同時使用兩種以上的辨識方法來提升私人電子裝置的安全性。而另一項常見的生物辨識技術是利用視網膜，然而若使用者佩戴了隱形眼鏡的話，容易會導致辨識失敗。於是 Connell 等人⁽³⁰⁾ 發展了可獲得使用者眼睛輪廓模型的結構光技術，並能偵測到是否有配戴隱形眼鏡，如圖 17 所示。

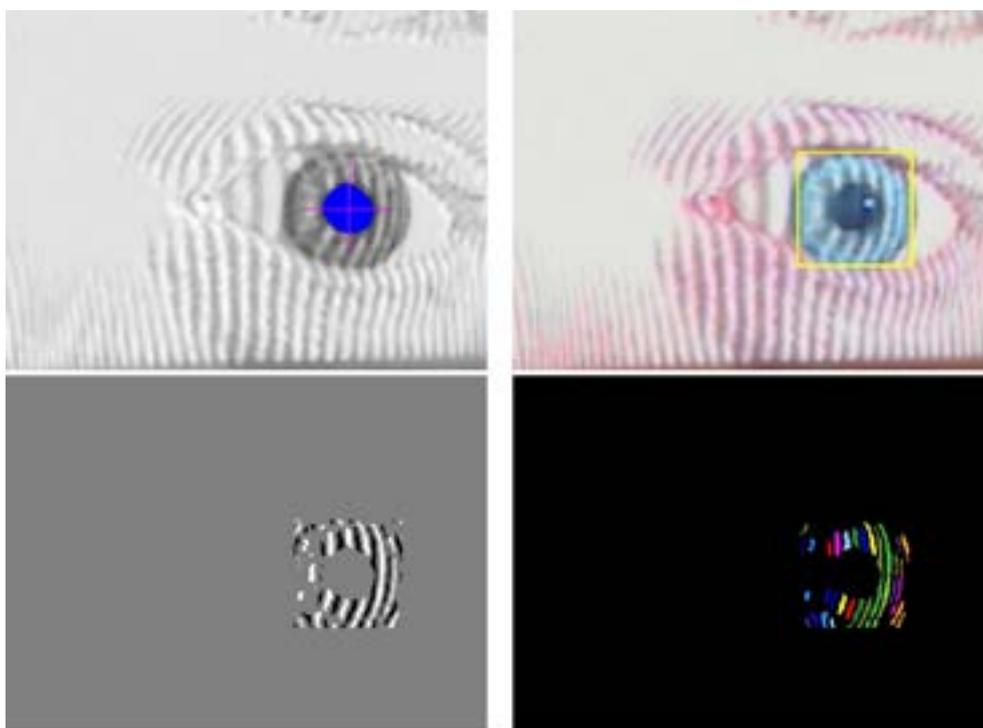


圖 17. 運用結構光技術掃描眼球輪廓圖⁽³⁰⁾。

5. 通訊

結構光技術的高精度與即時速度可助於遠距通訊時有更好、更有效率的溝通體驗，例如 Jones⁽³¹⁾ 發展了一個 3D 遠距會議系統，將結構光技術結合影像串流技術⁽³²⁾，而能在視訊時讓參與者能有眼神接觸，助於會議進行更順利，如圖 18 所示。

6. 人機互動

人與機器的溝通已經從傳統的滑鼠、鍵盤，進化到現今能利用臉部表情、手勢或肢體等來與機器互動。滑鼠、鍵盤雖然方便，但卻不太適用於 VR 裝置或微型模型的控制，一些電腦運算也不好在此些裝置上運作，此時結構光技術便能因應於先進的人機互動裝置，協助這些應用實現。

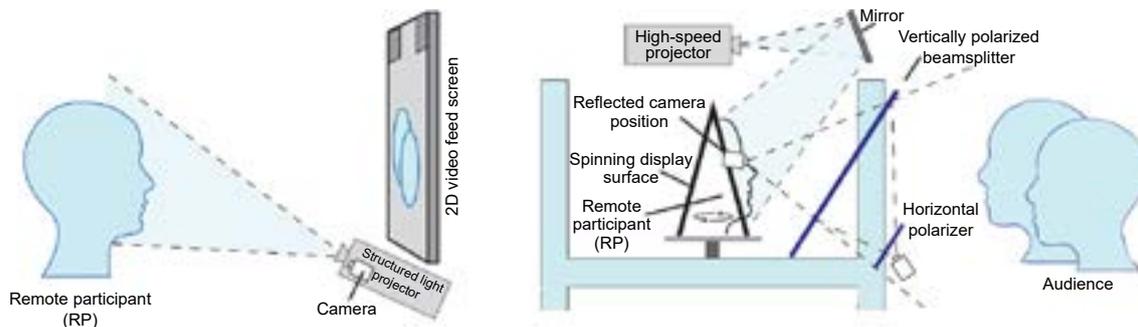


圖 18. 即時掃描三維模型結構光系統與呈現結果⁽³¹⁾。

結構光技術不會受到深度距離的限制，而能用於三維空間中，也免除穿戴裝置的限制，讓人機互動更容易。例如 Guan 等人⁽³³⁾ 利用結構光技術來追蹤使用者手勢，並即時建立模型來控制虛擬擴增實境中的物體，如圖 19 所示；而 Casey 等人⁽³⁴⁾ 也成功用結構光技術來偵測使用者手指的連續動作。除了輸入裝置，現在也有讓機器能透過辨認使用者臉部表情變化來與之溝通的技術⁽³⁵⁾。

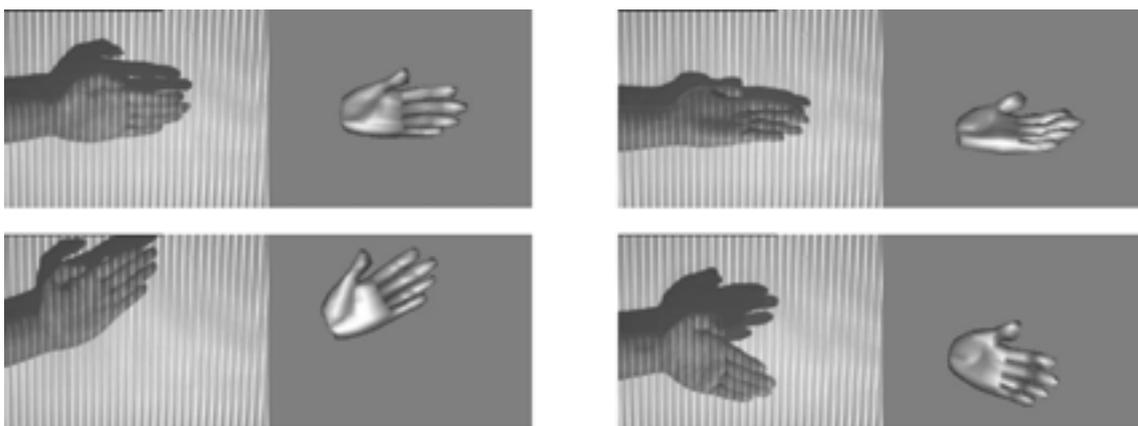


圖 19. 追蹤使用者手勢並即時在虛擬空間中建立模型⁽³³⁾。

7. 娛樂產業及其他應用

結構光技術的人機互動應用，同樣能在娛樂產業上發揮很好的效益，像 Microsoft Kinect⁽³⁶⁾ 便是在 3D 感測器上結合結構光技術，而能即時獲得深度資訊，許多運動類的電玩遊戲便能透過此技術來偵測使用者的姿勢、手勢並模擬運動狀況，達到良好的遊戲體驗。由於結構光技術能建立高品質的三維座標資訊，因此也能實現跨媒體的呈現方式，運用於音樂 mv 中或演唱會上，傳達特殊的藝術表現。

除此之外，結構光技術還有許多意想不到的應用，例如 2019 年 Makhsous 等人提出了一種食物體積估算方法，能透過與手機相機整合的結構光系統來即時重建出食物的立體模型，如圖 20 所示，再與軟體結合而計算得出內容物含量，與人工計算相比之下，準確度提升了 40%⁽³⁷⁾。

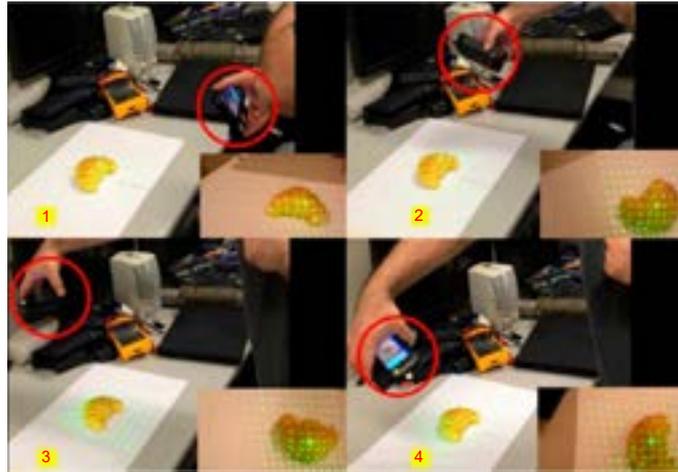


圖 20. 移動式結構光系統量測過程⁽³⁷⁾。

五、討論

1. 技術障礙與挑戰

儘管結構光技術有快速與高精確度的優點，也有十分廣泛的應用，但仍然存在一些技術障礙有待改進，以下便列出幾點⁽¹⁾ 進行討論。

1. 環境照明影響

結構光技術受到環境照明影響嚴重，有幾個較為明顯的限制，例如無法處理鏡面反射造成特定區域產生強光的問題、無法從陰影處得到有用的資訊，以及在室外環境受到自然光影響而成像效果不佳等等。對於上述問題，Nayar 等人⁽³⁸⁾ 利用在光源與物體中放置線性擴散器來改善反射強光與取得陰影處資訊，如圖 21 所示，此團隊之後又透過窄頻光譜過濾器或極化過濾器來調整光分佈，使結構光在室外的成像更佳⁽³⁹⁾。

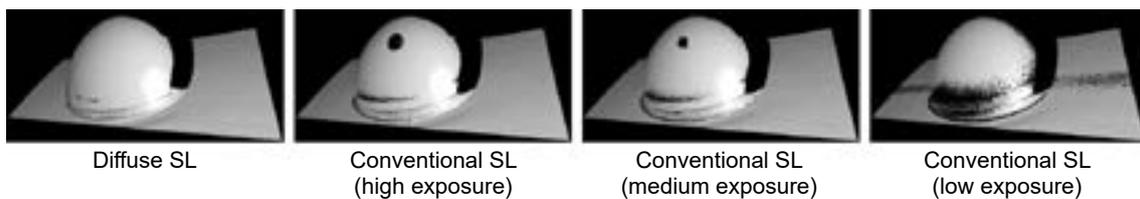


圖 21. 透過擴散器改善強光鏡面反射之比較圖⁽³⁸⁾。

2. 資料儲存

該如何有效地處理龐大的重建模型三維座標資料，以及該用何種檔案形式來儲存，都是值得思考的問題。目前已經有許多團隊開始研究將這些資料壓縮的方法，如 Ou 與 Zhang⁽⁴⁰⁾ 將三維資料以常見的二維圖像資料形式儲存，進而達到更高的資料壓縮比，並維持良好的重建精準度。

3. 感測器縮小化

使用三維量測技術的感測器日異月新，不管是 VR 裝置還是行動裝置的感測器都在快速發展中。然而，這些裝置上感測器辨識精度與解析度都尚未能與目前的結構光技術匹敵。在達成感測器上縮小化的同時維持著高準確度，在未來有其發展必要性。

4. 自動化

目前二維影像技術已經發展成熟，一些自動化的圖像技術讓使用者能輕易依照需求來做修改與調整。然而，三維圖像技術相對來說在自動化部分並不是那麼足夠，使用者通常需要具備一定的專業程度才能使用，因此未來也許可以發展更自動化的量測方法，進而增加市場潛力。

2. 未來方向

衡量三維形貌量測技術可從速度、精確度、解析度、成本以及可靠度等幾個面向來看，雖然各項技術已被廣泛應用在各個領域中，但很少有一項技術能同時適用於不同領域；而且一些應用也尚未達到最佳化，可靠度亦不夠穩健，實行起來還是相當困難，無法因應成本與效率的考量。因此，未來的發展方向可以透過與其他工具的結合，以達到更完善與使用者友善的應用，讓即使非專業領域的使用者也可以快速學會操作方式。

六、結論

結構光量測技術發展至今，不論是量測校正技術的發展或是編碼方法的開發與利用，都透過前人的努力而達到相當多元的成果。而各個領域中的應用也可以針對所需的目標需求來選用、發展適合的結構光量測技術，甚至在工業與娛樂產業當中也已經有商業化的產品出現。但是在結構光技術中，還是有一些侷限與不足之處可待改進。不過隨著科技進步，也許目前在實行上還困難重重的潛在應用，在未來就會變得隨處可見也說不定。

參考文獻

1. S. Zhang, *Optics and Lasers in Engineering*, **106**, 119 (2018).
2. Roland Li, *Depth sensors are the key to unlocking next level computer vision applications*, (2017). Please refer to the web site: <https://blog.cometlabs.io/>
3. 大和有話說, 3D 感測技術發展與應用趨勢, (2018). Please refer to the web site: <https://dahetalk.com>
4. J.A. Jalkio, R.C. Kim, and S.K. Case, *Optical Engineering*, **24** (6), 966 (1985).
5. Y. Xiao, Y. Cao, and Y. Wu, *Applied optics*, **51** (8), 1149 (2012).
6. Z. Zhang, *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, **22** (11), 1330 (2000).
7. Song Zhang and Peisen S. Huang, *Optical Engineering*, **45** (8), 083601(2006).
8. T. Bell, J. Xu, and S. Zhang, *Applied optics*, **55** (9), 2346 (2016).
9. B. Li, N. Karpinsky, and S. Zhang, *Applied optics*, **53** (16), 3415 (2014).
10. C. Schmalz, F. Forster, and E. Angelopoulou, *Optical Engineering*, **50** (11), 113601 (2011).
11. F. Zhong, R. Kumar, and C. Quan, *IEEE Sensors Journal*, **19** (17), 7335 (2019).
12. C. Zhong, et al., *Sensors*, **19** (14), (2019).
13. E.R. Eiriksson, et al., *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **40**, 7 (2016).

14. C.H. Chu, H.P. Hung, and M.S. Chen, Huang, *IEEE Third International Symposium on Electronic Commerce and Security*, 29-31 July (2010).
15. J. Salvi, J. Pages, and J. Battle, *Pattern recognition*, **37** (4), 827 (2004).
16. H. Kawasaki, et al., *IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, June 23-28 (2008).
17. J. Geng, , *Advances in Optics and Photonics*, **3** (2), 128 (2011).
18. T. Bell, B. Li, and S. Zhang, *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, 1 (2016).
19. P. Jia, , J. Kofman, and C.E. English, *Optical Engineering*, **46** (8), 083201 (2007).
20. P.S. Huang, S. Zhang, and F.P. Chiang, *Optical Engineering*, **44** (12), 142 (2005).
21. S.C. Park, and M. Chang, *Computers & Industrial Engineering*, **57** (4), 1377 (2009).
22. Y. Li, et al., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **59** (7) (2009).
23. L.S. Bieri and J. Jacot, *Optical Metrology in Production Engineering, International Society for Optics and Photonics*, 27-30 April (2004).
24. S.G. Narasimhan, and S.K. Nayar, *Proceedings of OCEANS 2005 MTS/IEEE*, 17-23 Sept. (2005).
25. F. Bruno, et al., *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **66** (4), 508 (2011).
26. D. Zhan, et al., *Sensors*, **15** (4), 8664 (2015).
27. G. Bhatia, et al., *Plastic and reconstructive surgery*, **94** (6), 768 (1994).
28. N.T. Clancy, et al., *Biomedical Optics Express*, **2** (11), (2011).
29. K.W. Bowyer, K. Chang, and P. Flynn, *Computer vision and image understanding*, **101** (1), (2006).
30. J. Connell, , et al., *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 26-31 May (2013).
31. A. Jones, , et al., *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, **28** (3) (2009).
32. N.L. Karpinsky, et al., *Optical Engineering*, **53** (2) (2014).
33. Guan, C., L.G. Hassebrook, and D.L. Lau, *Geo-Spatial and Temporal Image and Data Exploitation III, International Society for Optics and Photonics*, (2003).
34. C.J. Casey, L.G. Hassebrook, and D.L. Lau, *Human-Computer Interaction, New Developments, International Journal of Advanced Robotic System*, Aug (2008).
35. G. Sandbach, et al., *Image and Vision Computing*, **30** (10), 762 (2012).
36. N. Villaroman, D. Rowe, and B. Swan, *Proceedings of the 2011 conference on Information technology education*, Oct (2011).
37. S. Makhsous, et al., *Sensors*, **19** (3), 609 (2019).
38. S.K. Nayar and M. Gupta, *2012 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*, 28-29 April (2012).
39. M. Gupta, Q. Yin, and S.K. Nayar, *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, Dec. (2013).
40. P. Ou, and S. Zhang, *Applied Optics*, **52** (9) (2013).

作者簡介

張毓紋女士現為國立清華大學動力機械工程學系碩士班研究生。

Yu-Wen Chang is currently a M.S. student in Department of Power Mechanical Engineering at National Tsing Hua University.

光學視覺與機械手臂系統整合之 校正方法介紹

A Systematic Literature Review on Eye- Hand Calibration

李俊則、張禎元

Chun-Tse Lee, Jen-Yuan Chang

在現代的機械手臂應用當中，與光學視覺系統搭配已經成為主流的趨勢，透過視覺回授伺服控制來達到機械手臂智慧化與自動化的目的。然而視覺回授控制仍需藉由手眼校正的演算法將相機座標系及機械手臂座標系對齊，根據相機的配置有分為 Eye in hand 以及 Eye to hand。此篇文章首先定義手眼校正的兩種配置與數學模型建立，接著依照兩種定義整理不同種類的手眼校正方法、應用場域及實際配置案例，讓讀者能夠根據不同配置以及場域進行參考。

In the modern application of robotic manipulators, collocation with an optical system has become mainstream. However, to achieve vision servo control, the alignment between the coordinate of the camera and the manipulator should be calibrated. According to the placement of the camera, the method of the eye-hand calibration can be divided into eye-in-hand and eye-to-hand. In this article, the mathematic models of these two methods are built and the literatures are arranged by the order of scenario, optimized algorithms and the placement of cameras.

一、前言

隨著工業技術的進步，工廠中自動化的比例逐漸的提升，許多的機構系統也因應而生，其中機械手臂則扮演相當重要的角色。機械手臂可大致分為並聯式機械手臂及串聯式機械手臂，並聯式機械手臂如 Delta Robot，使用史都華平台的概念來達到 XYZ 線性移動；串聯式機械手臂則以六軸機械手臂為最大宗，並廣泛應用於各種產業。不管是何種機械手臂都有一特色：重複精度高，因此機械手臂相當適合於從事重複的工作任務，位置控制的要求高。雖然機械手臂之重複精度是其優點，不過其最大的缺點是絕對精度，意即要與其他機器或座標系相互配合時就會出現問題，而目前機械手臂最常配合之儀器就是相機。當機械手臂需要與外界物體進行互動且該物體是隨機擺放的，此時藉由相機的取像以及後來的影像處理即可辨識出物體的位置，但是這時則面臨另外一個問題：相機座標與手臂座標的不一致性。

相機在取像時會產生出一張影像，此張影像由 n by m 個像素所構成，其中會有稱為像素座標系的座標來定義每個像素的描述方法，不過在這個座標系下的座標不能夠代表真實長度，而是會隨著真實物體的遠近而讓每個像素代表不同大小的距離。若是搭配上相機內部參數及物體與相機的距離，則可以計算出一個正交笛卡爾座標系 (Cartesian coordinate system)，稱之為相機座標系。同一個物體在機器人座標系及相機座標系的座標值皆不相同，因此機械手臂是無法透過相機對該物體進行定位與其他工作任務，在這種情況下則需要一項關鍵技術：手眼校正。

手眼校正是一項能夠將相機座標系及機械手臂座標系對齊轉換的一項技術，通常是透過手臂移動多個姿態以及相機取像來達到計算兩者之間關連性的演算法，而校正板也是在此技術中常見的元素之一。手眼校正能夠應用的領域相當廣泛，工業中應用如焊接作業、隨機物堆疊夾取、鑽孔、噴塗等，而醫療產業中也有應用到手眼校正的技術，如胃鏡手術等。事實上不僅是機械手臂，只要是擁有座標概念的機構件與相機系統做搭配都會應用到手眼校正的概念，作為視覺伺服控制一項非常基本且重要的研究。

手眼校正於 1989 年開始第一篇的研究⁽¹⁾，其建立相當經典的問題形式： $AX = XB$ ，事實上往後的研究不僅限於這個等式，更是發展出不同形式與流程的手眼校正演算法。本篇文章則是要整理並探討各種類之手眼校正應用場合，主要以相機的固定方式分為兩大類，並以校正板類型、機械手臂種類、最佳化演算法等進行表格化整理。第二章節會詳細說明手眼校正的工作原理與模型建立；第三章則是整理目前手眼校正的各大分類及其論文；第四章則是總結手眼校正以及其未來發展性。

二、工作原理

在手眼校正的過程當中，通常都會有以下元件：機械手臂、相機與校正物。機械手臂可為三軸、四軸、六軸，但六軸通常為大宗；相機方面 2D 及 3D 都有人對其進行研究探討，且若為 2D 相機通常會搭配相機內部參數同時進行校正^(2, 3)；校正板最常見的形式為棋盤格^(4, 5)，也有一些研究強調不需要校正板⁽⁶⁾ 或者是以開發校正物為主題⁽⁷⁾。但是無論如何手眼校正都是在找到相機與手臂座標系之間的關係，可能是相機座標系到手臂大地座標系亦或者是相機座標系到手臂法蘭座標系，圖 1 及圖 2 標示主要兩大手眼校正的類型及其在演算法中重要的矩陣轉換定義。

在手眼校正的研究當中，主要有四個重要的座標系，分別為機械手臂大地座標系 $\{R\}$ ；

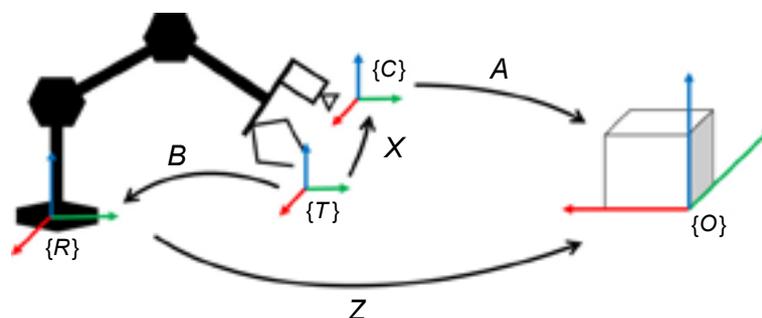


圖 1. Eye in hand 手眼校正配置。

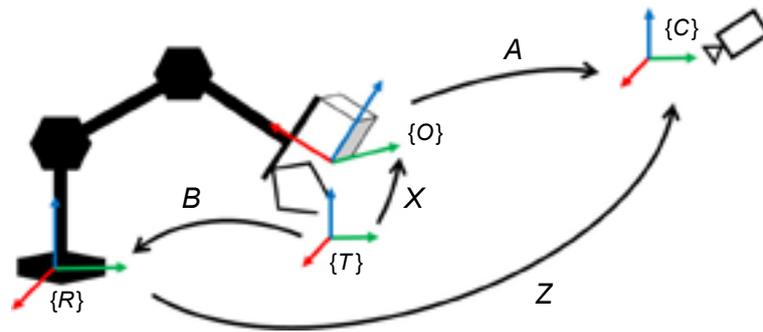


圖 2. Eye to hand 手眼校正配置。

機械手臂工具座標系 $\{T\}$ ；相機座標系 $\{C\}$ 以及待測物座標系 $\{O\}$ 。大地座標系 $\{R\}$ 到工具座標系 $\{T\}$ 之間的關係可由各軸角度與正向運動學求出，其矩陣轉換關係為 B 矩陣，是個可以輕鬆求得之變數；而相機會對待測物進行取像，根據特殊的影像處理建立專屬於待測物的座標系 $\{O\}$ ，通常會以特徵明顯的若干點建立直角座標系，如棋盤格之邊角點，而相機座標系 $\{C\}$ 與待測物座標系 $\{O\}$ 之間的轉換關係則以 A 矩陣來代表，在不同的角度取像都會改變 A 矩陣，因此在整個演算法當中會有多個 A 矩陣存在。 X 矩陣在不同的相機配置下定義會有所不同，主要是定義為某個座標系與手臂的工具座標系間固定的矩陣轉換關係； Z 矩陣則為某個座標系與手臂大地座標系間固定的矩陣轉換關係。

圖 1 為 Eye in hand 的關係配置，其顧名思義就是相機是固定於機械手臂上，在校正過程中亦或是校正完後的任務執行中相機都會跟著移動，在所有座標系中，唯一與相機座標系 $\{C\}$ 沒有相對位移改變的就是機械手臂的工具座標系 $\{T\}$ ，因此在這類問題當中欲求之解就是相機座標系到機械手臂工具座標系 $\{T\}$ 之轉換矩陣 X 。圖 2 為 Eye to hand 的關係配置，與圖 1 最大的不同點就是相機的擺放位置是固定於大地座標系中的某個位置，相機不隨著機械手臂移動而有所改變，就如同從某處看著機械手臂般，因此稱之為 Eye to hand。在圖 2 中可以看出， Z 矩陣的定義為相機座標系 $\{C\}$ 到大地座標系 $\{R\}$ 之間的轉換關係，也就是此配置下手眼校正欲求之解，而 X 矩陣則是待測物座標系與工具座標系之間的轉換，通常完成校正後均會移除校正板因此這個矩陣通常不重要。事實上每個研究之矩陣定義皆不盡相同，箭頭指向相反只要將矩陣取反矩陣就可以做到，因此主要的定義則是要以達成閉迴路為充要條件，若等式 $AX = XB$ 的出發點一致且終點也一致，這樣的矩陣定義就合理，因此在實現各篇論文時要先將矩陣方向及順序定義完整。

在定義完各個矩陣之後，則是要找出一個閉迴路等式並且對其提出最佳化演算法求解，其閉迴路的表示式可大致分為兩種。第一種閉迴路的表示式為 $AX = XB$ ，如圖 3 與圖 4 所示。圖 3 為 Eye in hand 的相機配置，其 A 矩陣為 $\{C_1\}$ 至 $\{C_2\}$ 的轉換關係，可看成 $\{C_1\}$ 到 $\{O\}$ 再到 $\{C_2\}$ ，因此 A 可由等式 $A = A_1A_2^{-1}$ 計算而得； B 矩陣則為 $\{T_1\}$ 至 $\{T_2\}$ 的轉換關係，可由等式 $B = B_1B_2^{-1}$ 取得。若以 $\{T_1\}$ 作為閉迴路之起點而 $\{C_2\}$ 為終點，則可以由兩條路線到達，分別為 AX 及 XB 。每兩個姿態間都存在一組 $\{A, B\}$ 矩陣對，而通常會取 $n \geq 3$ 以上的量測組數作為輸入資料，手眼校正就是要透過最佳化的演算法找到矩陣 X ，將所有的資料組 (A, B) 做最佳的配對。許多研究都是基於這樣的假設以及定義再去發展不同的解法，如使用奇異值分解 (singular value decomposition, SVD) 或者是四元數法 (quaternion)，詳細作法會於下一章節再加以分類分析。

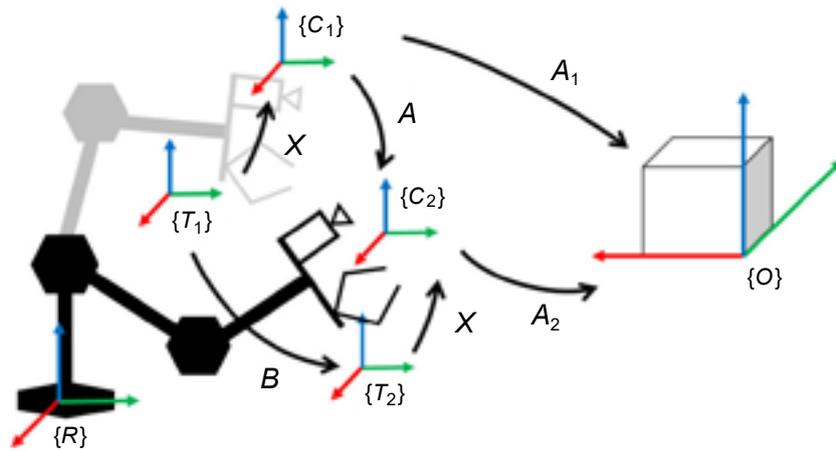


圖 3. Eye in hand 應用 $AX = XB$ 示意圖

圖 4 則為 Eye to hand 配置下使用 $AX = XB$ 的應用示意圖。在此配置下推導等式 $AX = XB$ 不像圖 3 般直觀，因此需要一些技巧來證明。假設有一點 P 在校正物上，而點 P 在不同座標系下以不同的代號表示： P_i 代表點 P 在校正板座標系下的座標值，由於該點位於校正板上，因此無論機械手臂如何移動，由校正板座標系來觀察 P_i 皆為定值； P_g 代表在工具座標系 $\{T\}$ 下的座標值，由於校正板與手臂法蘭面是固定的旋轉平移關係，因此 P_g 也是一個固定值； P_c 代表是在相機座標系 $\{C\}$ 下的座標值，根據手臂不同的姿態會有所改變； P_b 代表是在手臂大地座標系 $\{R\}$ 下的座標值，也是隨著姿態改變而不同。根據圖 4 的矩陣定義以及 P 點在各個座標系的表示法，有以下之等式成立：

$$\begin{cases} P_g = GP_i \\ P_{ci} = A_i P_i \\ P_{bi} = B_i GP_i \\ P_{ci} = X P_{bi} \end{cases} \quad (1)$$

i 代表不同姿態的編號，假設有另外一個姿態 j ，則可由式 (1) 得到兩個姿態下相機座標系及大地座標系之 P 點座標值：

$$\begin{cases} P_{ci} = A_i P_i \\ P_{bi} = B_i GP_i \\ P_{cj} = A_j P_i \\ P_{bj} = B_j GP_i \end{cases} \quad (2)$$

由式 (2) 可進行一些替換變數的操作，再經由矩陣 A 的定義及矩陣 B 的定義，可將 $A_i A_j^{-1}$ 替換為 A ； $B_i B_j^{-1}$ 替換為 B ，而 G 在替換過程中會抵消掉，可得到以下等式：

$$P_{ci} = A P_{cj} = A X P_{bj} \quad (3)$$

$$P_{ci} = X P_{bi} = X B P_{bj} \quad (4)$$

最後經由式 (3) 以及式 (4)，可得到以下等式：

$$AX = XB \quad (5)$$

每兩個姿態間就會存在一組式 (4) 的資料，因此使手臂移動多組姿態並使用相機擷取座標點位，再利用不同的最佳化演算法取得矩陣 X 的最優解。

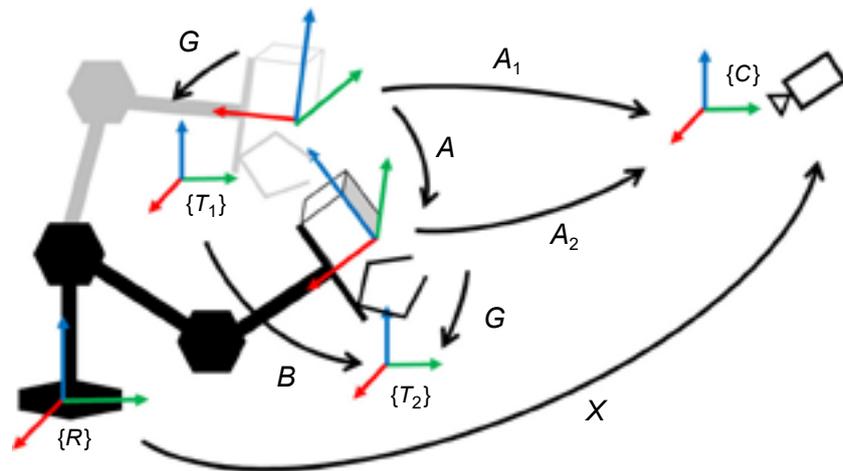


圖 4. Eye to hand 應用 $AX = XB$ 示意圖。

除了 $AX = XB$ 的閉迴路等式外，第二種解法則是 $AX = ZB$ 。在第一個閉迴路等式中，共有三個矩陣值，其中 A 、 B 都是已知項，可由相機取像計算和手臂編碼器回授而得，唯一要求的未知項則為矩陣 X 。但是在第二種解法中，矩陣 X 與矩陣 Z 皆為未知項，且不需要靠兩個姿態之間的差異來當作輸入資料，藉由第二種解法所得之解可以同時取得 X 矩陣以及 Z 矩陣，雖然 Z 矩陣在大多數場合不需要用到，因為校正板進行完校正就會取下。

第二種解法在 Eye in hand 或者是 Eye to hand 的相機配置下都有演算法可以解出相機與手臂之間的關係，其配置圖如圖 1、圖 2 所示。其閉迴路等式也相當直觀，皆是由工具座標系 $\{T\}$ 開始而於待測物座標系 $\{O\}$ 或是相機座標系 $\{C\}$ 結束。不過比較不同的是每個姿態下皆要有一個完整的 A 及 B 矩陣，因此相機觀察待測物不能再只是一個點，而是要多個點建立一個座標系統，以便後來的演算法計算。在這個章節中介紹不同的手眼校正類型與其數學模型，然而每個配置以及等式的解法都有不同的方式解決，下一章節則會將所有手眼校正種類細分並進行文獻回顧。

三、分類與進展

根據前一個章節的分類可得知，手眼校正根據相機的放置方式大致可分為兩大類，而每類都可細分為數個數學模型，且每個數學模型都有不同的解決方式，以下章節則會一一加以分析。

1. 手眼校正 - Eye in Hand

➤ $AX = XB$

在文獻回顧中，這類型的論文是最大宗的，也是最一開始發展的相機配置及數學模型。這類型的手眼校正通常會伴隨著相機校正，對校正板取像多張影像之後會先進行相機內部參數的優化，接著會再利用等式 $AX = XB$ 求得手臂與相機系統之間的轉換關係，如圖 5 所示。應用範圍相當廣，從工業型手臂應用到醫療方面都有所研究，校正板的形式也大多以黑白的明顯圖案作為相機建立物體座標系使用。其對 $AX = XB$ 的解法則不盡相同，從封閉解到迭代遞迴解都有，各項比較整理於表一中。

Cao et al. (2019) 利用 $AX = XB$ 的等式來進行手眼校正，並利用類神經網路來進行 X 矩陣的求解，除了 2D 相機架設於手臂上之外，該論文還架設雷射量測裝置進行驗證，並對手臂本身的 DH table 做優化，讓手臂本身的絕對精度提升，以達到更好的誤差結果。

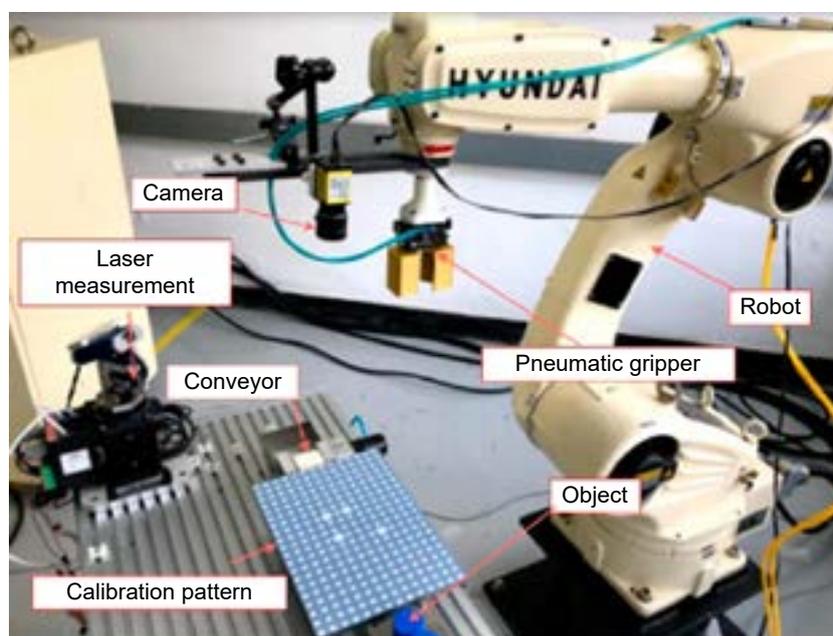


圖 5. Eye in hand 配置示意圖⁽⁸⁾。

Heller et al. (2014) 則使用 3D 相機 Xtion Pro 作為手眼校正的光學系統，並且拍攝多張具有很多黑點的校正板進行演算法計算。該篇論文利用最小平方法的概念，將 $AX = XB$ 分解成 Dual quaternion 的形式，並利用線性矩陣不等式 (linear matrix inequality, LMI) 的方式做優化，以得到 X 矩陣的解。

➤ $AX = ZB$

以 $AX = ZB$ 作為主要問題的論文並不多，原因可能為矩陣 Z 不是那麼的重要，且在 3D 相機被研發且廣泛應用前，所有的 2D 相機都需要多個角度取景才能利用雙目視覺形成 3D 座標 (如圖 6 所示)，因此在這樣的架構下則不是受歡迎的研究方式。不過其特色就是計算上較沒那麼複雜，許多封閉解也可以很快的找出答案，相關代表論文則一同整理於表 1 中。



圖 6. 3D 相機應用於 Eye in hand 手眼校正⁽⁹⁾。

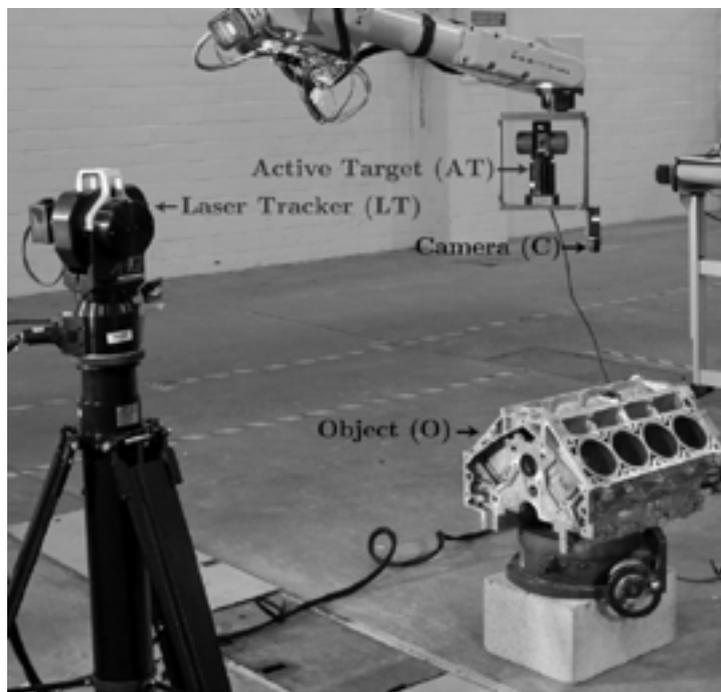


圖 7. 雷射追蹤儀與手眼校正架構⁽¹⁰⁾。

Shah (2013) 利用 Kronecker product 的方式，將 $AX = ZB$ 的旋轉部份等式以及平移部分等式結合，並且將 3×3 的矩陣攤平成單行向量，最後利用 SVD 找出旋轉及平移項的各項優化數值。在這項論文當中，沒有使用如棋盤格般明顯的校正板，取而代之的是直接使用加工件作為校正特徵點，並且搭配雷射追蹤進行驗證實驗 (如圖 7 所示)。

2. 手眼校正 - Eye to Hand

➤ $AX = XB$

與 Eye in hand 的配置相比，Eye to hand 的相機是沒有位移的，因此在應用上會使用 3D 相機做為光學系統，發展的時間點也較 Eye in hand 晚，論文數量也不多。其概念與 Eye in

表 1. Eye in Hand 手眼校正論文分類。

Ref.	年份	應用場域	相機種類	校正板	機械手臂	數學模型	運用方法
(1)	1989	單純演算法	—	—	—	$AX = XB$	Closed form solutions
(11)	1989	無塵室	2D 相機 雙目視覺	白製玻璃校正板	六軸手臂	$AX = XB$	Closed form solutions
(12)	1999	單純演算法	2D 相機 雙目視覺	黑白點圖	雙軸雲台+ 線性滑軌	$AX = XB$	Dual quaternions
(13)	2001	單純演算法	2D 相機 雙目視覺	黑白點圖	五軸手臂	$AX = XB$	Structure from motion
(14)	2005	單純演算法	2D 相機 雙目視覺	黑白點圖	六軸手臂	$AX = XB$	Appropriate motion selection
(15)	2006	單純演算法	2D 相機 雙目視覺	棋盤格	六軸手臂	$AX = XB$	Distance metric on group SE (3) & Nonlinear optimization
(3)	2008	物件夾取	2D 相機 雙目視覺	棋盤格	六軸手臂	$AX = XB$	Multiple viewpoint & Extended Kalman filter
(16)	2011	太空機器	2D 相機 雙目視覺	黑白點圖	六軸手臂	$AX = XB$	Particle swarm optimization
(9)	2014	單純演算法	3D 相機	黑白點圖	六軸手臂	$AX = XB$	Linear matrix inequality
(17)	2015	焊接	2D 相機 雙目視覺	棋盤格	六軸手臂	$AX = XB$	Branch-and-bound minimization
(18)	2015	單純演算法	3D 相機	棋盤格	六軸手臂	$AX = XB$	Improved screw axis identification method
(19)	2016	單純演算法	—	—	六軸手臂	$AX = XB$	Probabilistic batch method
(4)	2018	醫療手術機器人	3D 相機	棋盤格	六軸手臂	$AX = XB$	Iterative adjoint transformation algorithm
(8)	2019	物件夾取	2D 相機 雙目視覺	黑白點圖	六軸手臂	$AX = XB$	Neural network
(20)	2019	焊接	2D 相機 搭配雷射	棋盤格	六軸手臂	$AX = XB$	Decoupling and least square
(21)	1994	單純演算法	—	—	六軸手臂	$AX = ZB$	Quaternions
(22)	2001	單純演算法	—	—	—	$AX = ZB$	Iterative least-squares quaternion method
(23)	2010	單純演算法	2D 相機 雙目視覺	—	六軸手臂	$AX = ZB$	Dual quaternions & Kronecker product
(10)	2013	單純演算法	—	汽車引擎	六軸手臂	$AX = ZB$	Kronecker product

hand 的 $AX = XB$ 差不多，只是有些矩陣的定義與方向性會有所不同，且應用於醫療產業上的比例較高，其相關論文整理於表二中。Zhang et al. (2017) 將手眼校正的概念引入達文西外科手臂 (如圖 8 所示)，在手術刀處安裝一個很小的點狀校正板，演算方法則是與使用 Dual quaternion 的分解再以迭代方法進行優化。在機器人手的手背上貼上特殊圖案校正板，以作為手眼校正的判斷依據 (如圖 9 所示)。

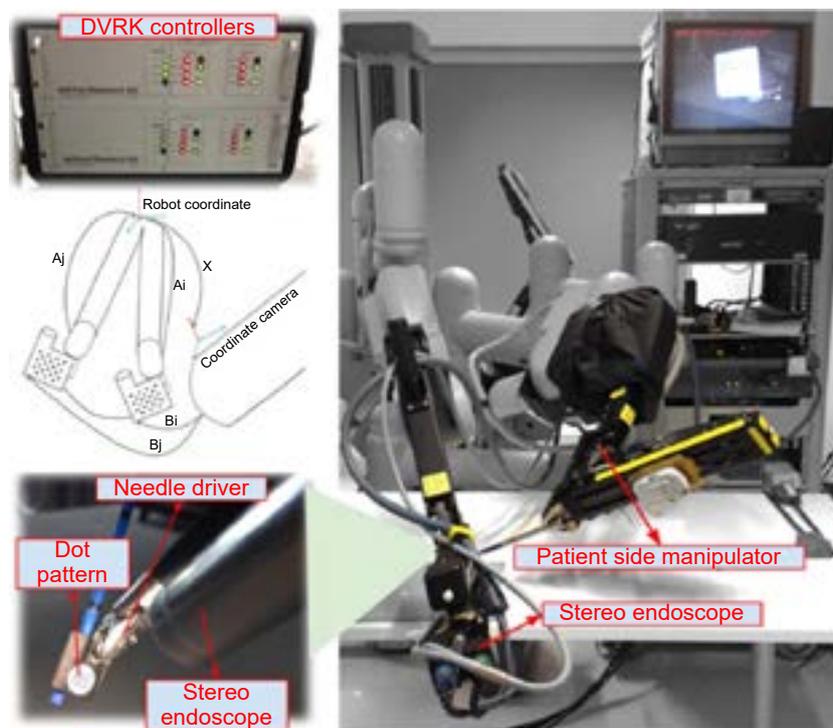


圖 8. 達文西手臂手眼校正實驗架設⁽²⁴⁾。



圖 9. ABB 雙臂機器人之手眼校正配置⁽²⁾。

➤ $AX = ZB$

與 Eye in hand 的 $AX = ZB$ 相同，其運用方法多為使用線性代數的方法推導出封閉解，有時也可以利用夾爪或是加工主軸等特徵作為相機取像的目標，這個一來也可以同時解決 TCP 校正的問題，許多擬人型機器人都可以應用此方法來做到手眼校正，其相關論文整理於表 2 當中。Lundberg et al. (2014) 使用 ABB 雙臂機器人搭配一台 2D 相機製作擬人機器人平台，其中在機器人手的手背上貼上特殊圖案校正板，以作為手眼校正的判斷依據。特殊的校正板為一黑方塊置於白色底中間，其明顯的差異很適合作為校正板的辨識使用，對於 $AX = ZB$ 的解法則是使用推導線性代數的封閉解。

表 2. Eye to Hand 手眼校正論文分類。

Ref.	年份	應用場域	相機種類	校正板	機械手臂	數學模型	運用方法
(27)	2008	醫療用 內視鏡	3D 相機	黑白點圖	內視鏡探棒	$AX = XB$	Vector quantization approach
(28)	2010	醫療用 內視鏡	2D 相機 雙目視覺	棋盤格	內視鏡探棒	$AX = XB$	Dualquaternions
(5)	2014	物件夾取	—	棋盤格	六軸手臂	$AX = XB$	Closed form solutions
(24)	2017	外科手術	3D 相機	微型點陣列 板	達文西 機械手臂	$AX = XB$	Iterative dual quaternion method
(29)	2011	單純 演算法	2D 相機 雙目視覺	雷射投影於 平面上	六軸手臂	$AX = XB$	Closed form solutions
(2)	2014	物件夾取	2D 相機 雙目視覺	ABB 圖示 取單點	七軸手臂	$AX = XB$	Closed form solutions
(30)	2017	單純 演算法	2D 相機 雙目視覺	黑白點圖	六軸手臂	$AX = XB$	Particle swarm optimization
(25)	2016	單純 演算法	NDI Polaris optical tracker 系統	NDI Polaris optical tracker 系統	六軸手臂 + 四軸手臂	$AX = XB$	Closed form solutions & Iterative method
(7)	2016	醫療用途	NDI Polaris optical tracker 系統	NDI Polaris optical tracker 系統	內視鏡探棒	Point to Point	Invariant point & Levenberg- marquardt algorithm
(26)	2018	物件夾取	3D 相機	有色方塊	六軸手臂	Point to Point	Artificial network based fuzzy interference system
(6)	2018	外科手術	3D OCT 系統	針尖端	手術針	Point to Point	Singular value Decomposition & Quaternion

➤ $AXB = CYZ$

這種類型的手眼校正相當特殊，總共會有兩個機器人，一個固定著相機，一個則固定著校正板。這樣的問題需要同時找出相機到第一個機器人的關係、校正板到第二個機器人的關係、第一個機器人到第二個機器人的關係。同時會有三個矩陣需要求解，因此問題複雜度會提高不少，如圖 10 所示。在該論文當中利用四元數分解旋轉矩陣，並利用推導封閉解的方式取得初始解，並利用線性近似法迭代優化更新找到更好的解。

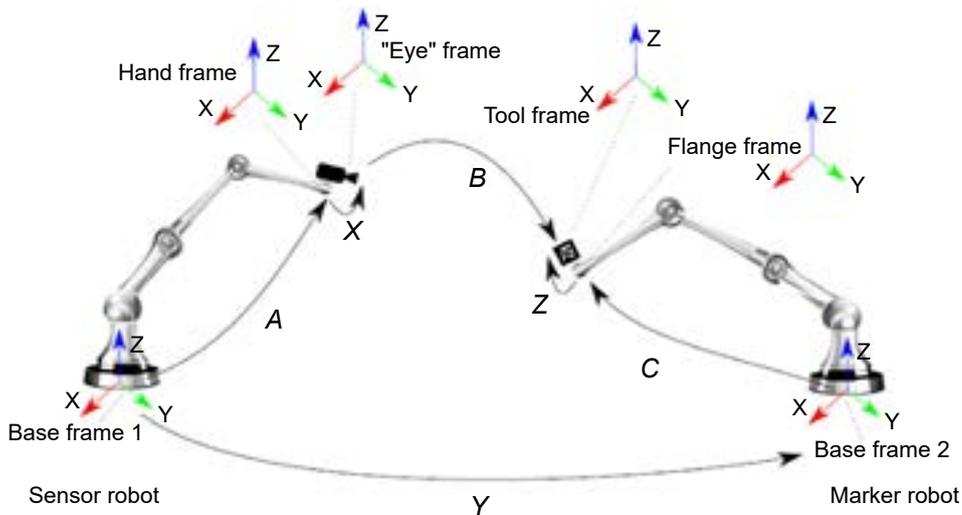


圖 10. $AXB = CYZ$ 關係示意圖⁽²⁵⁾。

➤ Points to Points

這類型的問題又比其他的數學模型更加直觀，但是通常都是建立在 3D 成像光學系統成熟的時期才會開始研究，因此論文發表年代都會比其他方法更晚。在機器人座標系可以藉由順向運動學取得點座標；而 3D 相機也能夠直接取得該點在相機座標系下的座標值，因此靠著各種方法將兩組點位進行配對，就可以直接找出相機與手臂之間的關係 (如圖 11 所示)。Wang (2018) 則提出使用類神經網路進行兩組點位的配對，由架設圖可以看出，文獻中所使用相機為深度相機，可以藉由內部參數及外部參數直接從像素座標系轉換為笛卡爾座標系，且校正物也不再是使用棋盤格等物品，而是任一可以藉由影像處理辨識出的物體即可，只需要單一點的資訊就可以進行更進一步的演算法運算。

四、結論

本篇文章是一篇針對手眼校正演算法進行統整的文獻回顧，主要以相機擺放位置以及方式將論文分成 Eye in hand 與 Eye to hand 兩種進行整理。本文章首先對在手眼校正的重要元件及元件之間的關係進行描述，並對其進行數學模型的建立，依照其校正手法及流程主要可分為 $AX = XB$ 與 $AX = ZB$ ，前者旨在求得相機與手臂之間的轉換；後者則是會同時求得相機與手臂和手臂與校正板之間的關係。而在 Eye to hand 中又有兩種變形，分別為 $AXB = CYZ$

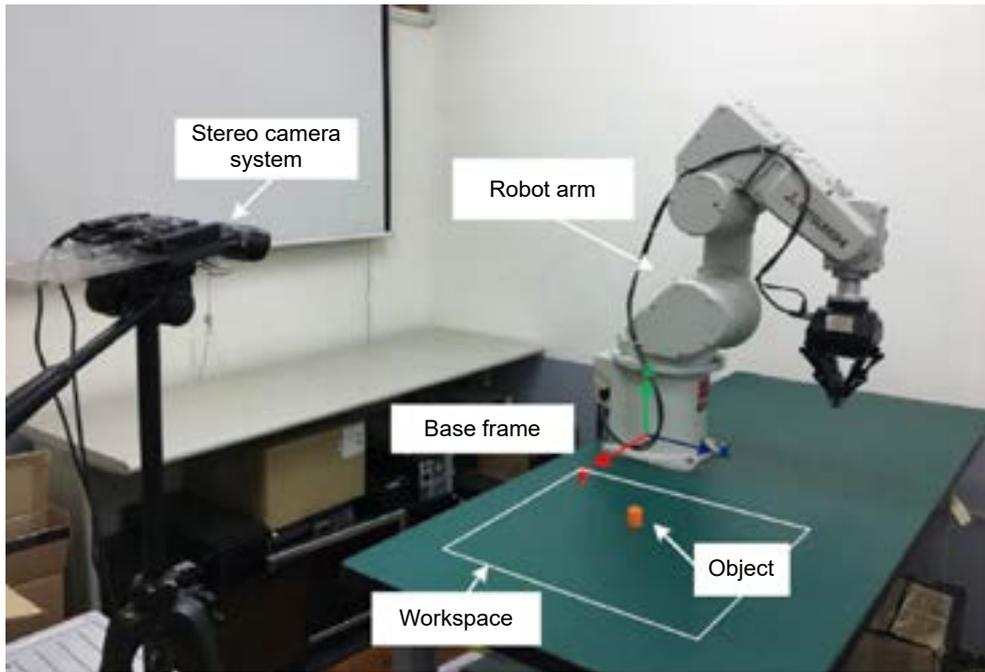


圖 11. Point to Point 相機與手臂架設⁽²⁶⁾。

以及 Points to Points。本報告依序整理出數篇相關論文，以其年份、應用場域、相機種類、校正板、機械手臂、數學模型及其重要優化方法來作為分類依據，讀者只要根據自身需求，如應用的場域或者是相機擺放位置，就可以找到相關論文進行參考以及研究的目的。

手眼校正是一項相當重要的技術，在面對工業 4.0 的彈性製造需求下，機械手臂不能再只是靠著固定教導好的路徑移動執行任務，而是要根據當下的判斷隨機應變。伴隨著計算硬體的進步，許多技術如深度學習等都得以發展，使得影像辨識與決策判斷得到飛躍性的進步，因此機械手臂與光學系統的搭配更是應用於越來越多的產業中，然而對於手眼校正未來的挑戰，則是會在如何更快速地完成校正及動態補償誤差之技術。

參考文獻

1. Y. C. Shiu and S. Ahmad, *IEEE Transactions on robotics and automation*, **5** (1), 16 (1989).
2. I. Lundberg, M. Bjorkman, and P. Ögren, "Intrinsic camera and hand-eye calibration for a robot vision system using a point marker", *2014 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, November 18-20, (2014).
3. Y. Motai and A. Kosaka, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **55** (10), 3731 (2008).
4. K. Pachtrachai et al., *Annals of biomedical engineering*, **46** (10), 1606 (2018).
5. H. Pan, N. L. Wang, and Y. S. Qin, *Industrial Robot: An International Journal*, **41** (6), 567 (2014).
6. M. Zhou et al., *IEEE Robotics and Automation Letters*, **3** (4), 3944 (2018).
7. S. Thompson et al., *International journal of computer assisted radiology and surgery*, **11** (6), 1071 (2016).
8. C.-T. Cao, V.-P. Do, and B.-R. Lee, *Applied Sciences*, **9** (9), 1940 (2019).
9. J. Heller, D. Henrion, and T. Pajdla, "Hand-eye and robot-world calibration by global polynomial optimization", *2014 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*, May 31 - June 7, (2014).
10. M. Shah, *Journal of Mechanisms and Robotics*, **5** (3), 2013.
11. R. Y. Tsai and R. K. Lenz, *IEEE Transactions on robotics and automation*, **5** (3), 345 (1989).
12. K. Daniilidis, *International Journal of Robotics Research*, **18** (3), 286 (1999).

13. N. Andreff, R. Horaud, and B. Espiau, *The International Journal of Robotics Research*, **20** (3), 228 (2001).
14. F. H. Shi, J. H. Wang, and Y. C. Liu, "An approach to improve online hand-eye calibration", in *Pattern Recognition and Image Analysis, Pt 1, Proceedings*, vol. 3522, J. S. Marques, N. PerezdelBlanca, and P. Pina, Eds. (Lecture Notes in Computer Science, Berlin: Springer-Verlag Berlin, 647 (2005).
15. K. H. Strobl and G. Hirzinger, "Optimal hand-eye calibration", *2006 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems*, Oct 9-15 (2006).
16. Y. Liu, H. Liu, F.-l. Ni, and W.-f. Xu, *Journal of Central South University of Technology*, **18** (4), 1087 (2011).
17. J. Heller, M. Havlena, and T. Pajdla, "Globally optimal hand-eye calibration using branch-and-bound", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **38** (5), 1027 (2015).
18. H. Wang, X. Lu, Z. Hu, and Y. Li, *Industrial Robot: An International Journal*, **42** (1), 64 (2015).
19. Q. L. Ma, H. Y. Li, and G. S. Chirikjian, "New Probabilistic Approaches to the AX = XB Hand-Eye Calibration without Correspondence", *2016 Ieee International Conference on Robotics and Automation*, A. Okamura et al., Eds. (IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA, New York: Ieee, 4365 (2016).
20. J. Zeng, G.-Z. Cao, W.-B. Li, and B.-C. Chen, "An algorithm of hand-eye calibration for arc welding robot", *2019 16th International Conference on Ubiquitous Robots (UR)*, June 24-27 (2019).
21. H. Zhuang, Z. S. Roth, and R. Sudhakar, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **10** (4), 549(1994).
22. R. L. Hirsh, G. N. DeSouza, and A. C. Kak, "An iterative approach to the hand-eye and base-world calibration problem", *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 01CH37164)*, **3**, 2171 (2001).
23. A. Li, L. Wang, and D. Wu, *International Journal of the Physical Sciences*, **5** (10), 1530 (2010).
24. Z. Zhang, L. Zhang, and G.-Z. Yang, *International journal of computer assisted radiology and surgery*, **12** (10), 1775 (2017).
25. L. Wu, J. Wang, L. Qi, K. Wu, H. Ren, and M. Q.-H. Meng, *IEEE TRansactions on robotics*, **32** (2), 413(2016).
26. M.-S. Wang, *Microsystem Technologies*, **24** (1), 305 (2018).
27. J. Schmidt and H. Niemann, *International Journal of Robotics Research*, **27** (9), 1027 (2008).
28. A. Malti, J. P. Barreto, and Ieee, "Robust Hand-Eye Calibration for Computer Aided Medical Endoscopy", *2010 Ieee International Conference on Robotics and Automation (IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA, New York: Ieee, May 3-8 (2010).*
29. J. S. Hu, Y. J. Chang, and Ieee, "Calibration of an Eye-to-Hand System Using a Laser Pointer on Hand and Planar Constraints", *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA, New York: Ieee, May 9-13 (2011).*
30. L. Wu and H. L. Ren, *Ieee Transactions on Automation Science and Engineering*, **14** (1), 314 (2017).

作者簡介

李俊則先生為國立清華大學動力機械工程學系博士生。

Chun-Tse Lee is currently a Ph.D. Student in Department of Power Mechanical Engineering at National Tsing Hua University.

張禎元先生為美國卡內基美隆大學機械工程博士，現為國立清華大學動力機械工程學系特聘教授。

Jen-Yuan Chang received his Ph.D. in Mechanical Engineering Department from Carnegie Mellon University. He is currently a distinguished professor in Department of Power Mechanical Engineering at National Tsing Hua University.

疊紋光學量測法介紹

Introduction of Moiré Method and Application

高國書

Kuo-Shu Kao

隨著科技的持續發展，相關檢測尺度越來越微小，越來越精密。因此，相關量測技術逐漸從傳統的接觸式量測轉變為光學的非接觸式量測技術。光學量測技術具有非接觸、全場性、速度快與高精密等優勢，除了運用於傳統的領域外，同時運用在高科技領域，如半導體工業、微機電系統、微奈米科技、生醫技術等研發及製程上。此外，除了具有非接觸式與非破壞性檢測的特點外，更具有不易與量測環境發生作用產生危險以及應用範圍廣的優點，目前廣泛應用在工程上應力、應變與產品表面形貌的分析量測，是一項非常重要的技術。光學量測技術總類相當多，本文主要著重於疊紋 (Moiré) 量測技術介紹，依據目前主流技術發展其疊紋技術包含幾何疊紋法 (Geometric Moiré)、陰影疊紋 (Shadow Moiré)、疊紋干涉儀 (Moiré Interferometry)、投射疊紋 (Projection Moiré)、與 Sampling Moiré 等，其介紹內容包含量測原理、發展趨勢、應用領域及未來技術發展等，期望透過本文的說明介紹，能夠對疊紋技術有更深一層的了解。

The detection scales are getting smaller and more precise with the development of science and technology. Therefore, the measurement technology has gradually changed from traditional contact measurement to optical non-contact measurement technology. As representative non-contact optical techniques, Moire methods have been extensively used to visualize deformation distributions of materials, arrangements of structures, and shape features of objects in research and industrial fields. This paper focuses on the introduction of Moiré measurement technology including Geometric Moiré, Shadow Moiré, Moiré Interferometry, Projection Moiré, and Sampling Moiré. The Moiré techniques are promoted by the demands of high-accuracy, multi-scale, extremely small- or large-scale, high-temperature, dynamic, on-line measurements and three-dimensional.

一、前言

人類科技的日新月異，因此各類電子產品朝向微小化、精密化、複雜化的需求日以俱增。在半導體產業中，製程過程中樣品表面狀況及殘留應力影響產品品質甚鉅，需要一套表面量測裝置加以量測。由於光學量測具有非接觸 (non-contact)、非破壞性 (non-destructive) 的優點，所以不會對待測物體表面造成不必要的損壞，加上量測方法如果能夠達到全域性及

即時性功能，及配合電腦影像處理系統功能，將使光學量測發展成為自動化的線上檢測系統。一般而言，目前光學量測技術相當多樣化，其包含疊紋法 (moiré technology)、共焦差動顯微技術 (confocal microscopy)、干涉法 (interferometry)、雷射三角量測法 (laser triangulation measurement method)、錐狀全像 (conoscopic holography)、結構光 (structured light) 等。其應用領域也相當廣泛，包含工業應用領域如模具加工製造、電子封裝製造、逆向工程、品質檢測、汽機車製造、零件製造業等。土木應用領域如房屋建築、地形探勘、橋梁工程等。醫學工程領域如義肢設計、關節矯正、整形外科、齒模掃描、假牙設計等。多媒體應用領域如藝術文物數位展、古文物數位 3D 建檔、遊戲物件創作等。而本文主要鎖定疊紋法 (moiré technology) 進行介紹。

疊紋為稱為雲紋、莫爾，源自於法國文字「moiré」，指的是一種紡織品，傳統絲綢或合成纖維，將兩層絲綢重疊在一起後，相對地移動透過光線將會有類似飄動的雲狀條紋出現。直到西元 1874 年英國人 Lord Rayleigh 提出利用此種疊紋現象可以量測物體的形變量，其稱這種干涉條紋為疊紋 (moiré fringes)，後來這種方法就被稱為疊紋 (moiré) 技術。

疊紋技術需要兩個光柵，一個光柵與移動物件相連一起移動 (試體柵)，另一個光柵固定不動 (參考柵)，兩光柵因此產生相對位移條紋，將兩個相同的光柵重疊起來，可以看到明顯的黑白相間的條紋，這些條紋就被稱為疊紋條紋，如圖 1 所示。此疊紋法是一種非相干涉光學量測法，利用兩組重疊的光柵相互遮光所出現的疊紋條紋來測量物體表面輪廓，形變和振動幅度的新興量測技術。

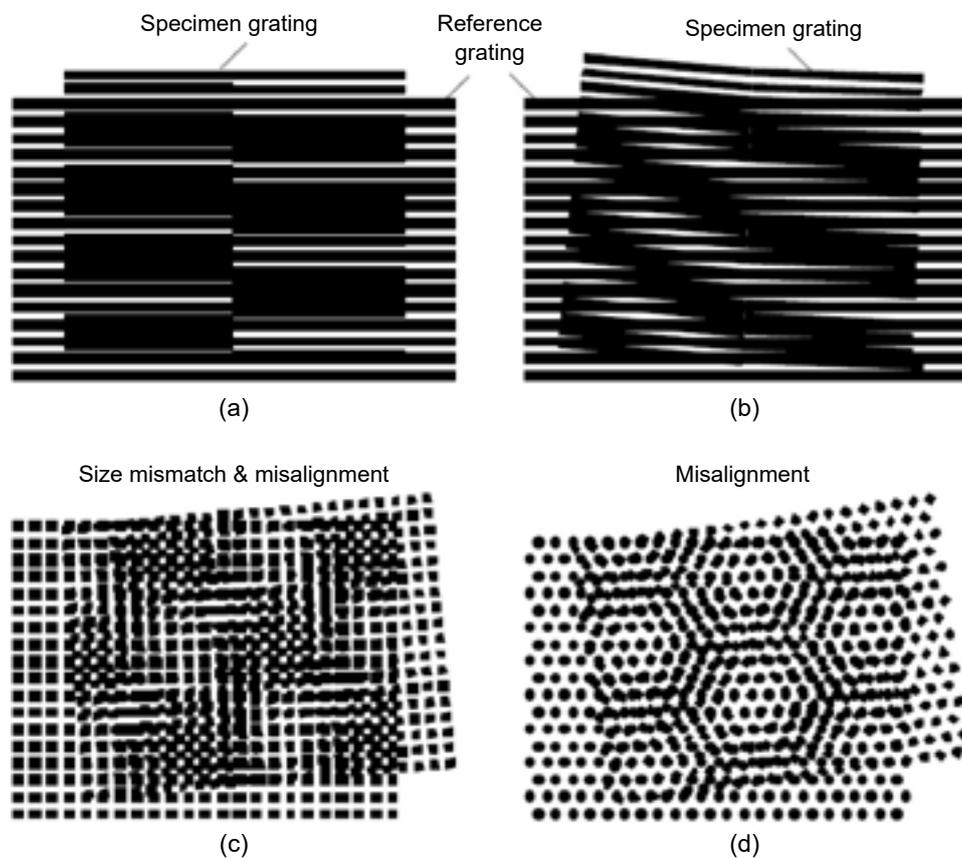


圖 1. 基本疊紋條紋型式。

使用疊紋法量測物體的變形時，需同時使用兩片柵片，一片黏貼在物體表面上，隨物體變形而變形，此柵片稱為試件柵。另一片柵附在試件柵上，當物體變形時，它保持不變，稱為參考柵。當試件柵隨著物體變形時，透過參考柵便可以看到不同的疊紋條紋，這些條紋反映了沿柵線方向的變形，在配合數位影像處理系統，可以迅速得到物體的變形行為。由疊紋技術發展出一系列相關的光學技術，包含可以測量同平面內位移場的疊紋干涉技術 (moiré interferometry)、顯微疊紋干涉技術 (microscopic moiré interferometry)，可以量測平面外位移的陰影疊紋術 (shadow moiré)、投影疊紋技術 (projection moiré) 等。本文主要介紹內容包含疊紋法技術發展趨勢、疊紋法種類、疊紋法的應用等，期望透過本文說明能夠對疊紋法有更深一層的了解。

二、疊紋光學量測法技術發展趨勢

視覺量測系統迅速的發展，是各種干涉術之未來趨勢。在這個趨勢之下，人工智慧和量測系統的結合也就應運而生了。電子條紋分析自動化，可以使干涉條紋訊息合併處理，不但量測快，而且處理速度高，量測設備可靠性大、操作十分安定。此外，隨著工業生產需求的進步，產品要求全檢，傳統的離線式抽檢已無法滿足需求。因此，相關檢測技術逐漸跨入自動化光學檢測 (automated optical inspection, AOI) 技術。廣義的 AOI 設備為結合光學感測系統、訊號處理系統、分析軟體及自動化系統等。例如，太空計畫的宇宙探測、生物醫學的 X 射線斷層掃描、機器人、無人駕駛汽車、指紋比對、字形辨認 (筆跡)、人像比對、文件識別、工業生產的品質檢測、數位博物館的典藏文物、虛擬實景等皆為此類設備的應用面，而狹義的 AOI 設備為目前急需於工業上使用的檢測設備。

在產品製造過程中，由於各種原因，零件不可避免的會產生多種缺陷，如印製電路板上出現孔錯位、劃傷、斷路、短路、污染等缺陷，液晶面板的基板玻璃和濾光片表面含有針孔、劃痕、顆粒、mura 等缺陷，帶鋼表面產生裂紋、輓印、孔洞、麻點等缺陷，這些缺陷不僅影響產品的性能，嚴重時甚至會危害到生命安全，對用戶造成巨大經濟損失。傳統缺陷檢測方法為人工目視檢測法，目前在手機、平板顯示、太陽能、鋰電池等諸多行業，仍然有大量的產業工人從事這項工作。這種人工視覺檢測方法需要在強光照明條件下進行，不僅對檢測人員的眼睛傷害很大，且存在主觀性強、人眼空間和時間解析度有限、檢測不確定性大、易產生歧義、效率低下等缺點，已很難滿足現代工業高速、高解析度的檢測要求。隨著電子技術、圖像傳感技術和計算機技術的快速發展，利用基於光學圖像傳感的表面缺陷自動光學（視覺）檢測技術取代人工目視檢測表面缺陷，已逐漸成為表面缺陷檢測的重要方法，因為這種方法具有自動化、非接觸、速度快、精度高、穩定性高等優點。

針對本文著重之疊紋量測技術發展趨勢如下：

1. 量測尺度朝向微小化與超大型尺度，微小化方面朝向微米 (micro)/奈米 (nano)/原子 (atomic) 等尺度，而超大型方面則朝向公尺 (meter)/公里 (kilometer) 等尺度。微小化尺度量測，需要使用聚焦離子束銑削 (ion beam milling)，電子束光刻 (electron beam lithography)，納米壓印光刻 (nanoimprint lithography)，全像照相光刻 (holographic photolithography) 製造等技術製作微米/納米尺度的光柵。
2. 大面積量測精度，光柵面積尺寸為光柵間距的 $10^3 - 10^6$ 甚至 10^9 倍。
3. 需要具備動態量測功能，且量測速度大於 10^3 frames per second，並且需要搭配高速相機。

4. 需要能夠在高溫環境下量測如 500 °C 或是更高溫度，所以光柵需要能夠耐高溫。
5. 需要可以量測極微小尺度、極大尺度、高溫環境、動態等之三維結構外型形變行為。
6. 需要多尺度量測，尺度範圍從原子尺度到公尺尺度。
7. 需要克服量測時之噪聲消除和抗振性。

三、疊紋光學量測法技術種類

目前疊紋光學量測技術主要細分為平面內 (in-plane) and 平面外 (out-of-plane) 如表 1 與圖 2 所示，其中平面內疊紋技術主要包含 (1) 幾何疊紋 (geometric moirè)、(2) 疊紋干涉儀 (moirè interferometry)、(3) sampling moirè 等技術，其量測原理為利用兩組黑白相間隔的光柵互相重疊干涉以產生的條紋圖形，一組是依附於試片上的試片光柵，另一組是位於光源與試片之間的參考光柵。當試片受外力變形時，試片上的光柵便隨之變形，與保持不變的參考光柵互相重疊干涉，雲紋干涉條紋圖便由此產生。平面外疊紋技術主要包含 (1) 陰影疊紋 (shadow moirè)、(2) 投射疊紋 (projection moirè)，其量測原理是利用一組光柵及其投影在物體表面的陰影，因互相重疊干涉所產生的條紋圖形，以量測待測區域內的平面外位移場。以下將針對各別疊紋技術進行細部介紹：

表 1. 疊紋技術分類。

In-plane 位移場 (U, V)	Out-of-plane 位移場 (W)
<ul style="list-style-type: none"> • 幾何疊紋 (Geometric Moirè) • 疊紋干涉儀 (Moirè Interferometry) • Sampling Moirè 	<ul style="list-style-type: none"> • 陰影疊紋 (Shadow Moirè) • 投影疊紋 (Projection Moirè)

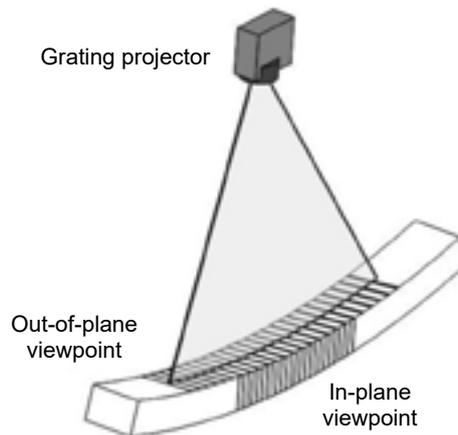


圖 2. In-plane and Out-of-plane 量測示意圖。

1. 幾何疊紋法 (Geometric Moirè)⁽¹⁾

幾何疊紋在 20 世紀初期已被提出，由於當時技術上的困難，無法製造出高頻率的光柵，所以只能對於一些幾何現象加以說明。使用疊紋法量測時，需要使用兩片柵片，一片黏貼在物體表面上，隨物體變形而變形稱為試件柵，另一片柵附在試件柵上，當物體變形時，

它保持不變稱為參考柵，如圖 3 所示。當試件柵隨著物體變形時，透過參考柵便可以看到不同的疊紋條紋，這些條紋反映了沿柵線方向的變形，配合數位影像處理系統之後，可以迅速得到物體的變形行為。

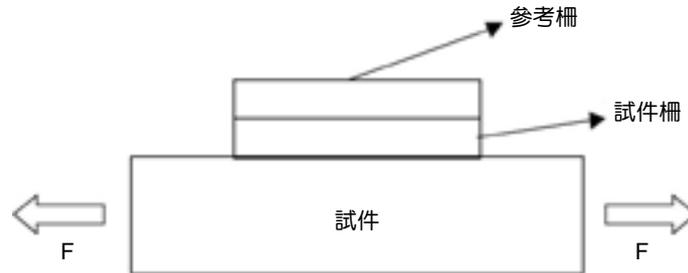


圖 3. 幾何疊紋法示意圖。

幾何疊紋量測理論架構如圖 4 所示，在試片為變形前，依據三角形正弦定理，在同樣以邊長 a 做為斜邊之兩個直角三角形中，可以得到方程式 (1)。同理，在相同以邊長 b 做為斜邊之兩個直角三角形中，可以得到方程式 (2)。

$$\frac{P}{\sin \theta} = \frac{a}{\sin 90^\circ} = \frac{\delta}{\sin(\phi - \theta)} \quad (1)$$

$$\frac{P}{\sin(180 - \theta)} = \frac{b}{\sin 90^\circ} = \frac{P}{\sin(\phi - \theta)} \quad (2)$$

方程式中 θ 為光柵間的夾角、 P 為光柵間距、 ψ 為條紋與參考光柵間夾角 a 、 b 為兩斜邊。由方程式 (2) 可得之 $\phi = 90^\circ + \theta/2$ ，在試片受力而變形後，試片柵的間距由 P 變成 P' ，試片柵和條紋與參考光柵間夾角也隨之由 θ 和 ψ 變成 θ' 和 ψ' ，所以方程式 (1) (2) 可以改寫成方程式 (3) (4)。

$$\frac{P}{\sin \theta'} = \frac{\delta'}{\sin(\phi' - \theta')} \quad (3)$$

$$\frac{P}{\sin(180 - \phi)} = \frac{P'}{\sin(\phi' - \theta')} \quad (4)$$

由方程式 (3) (4) 可得：

$$\delta' = \frac{\sin \phi'}{\sin \theta'} P' \quad (5)$$

$$\phi' = \tan^{-1} \left(\frac{P \sin \theta'}{P \cos \theta' - P'} \right) \quad (6)$$

在均勻變形與微小轉動下，因為 θ 非常小，因此 θ' 趨近於 θ ，所以方程式 (5) (6) 變成為

$$\delta' = \frac{\sin \phi'}{\sin \theta'} P' \quad (7)$$

$$\phi' = \tan^{-1} \left(\frac{P \sin \theta}{P \cos \theta - P'} \right) \quad (8)$$

由方程式 (7) (8) 可以得知，在幾何疊紋量測實驗中，根據所形成之干涉條紋所給予的資訊，則可以選定 δ' 與 ϕ' 做為量測中的參數。

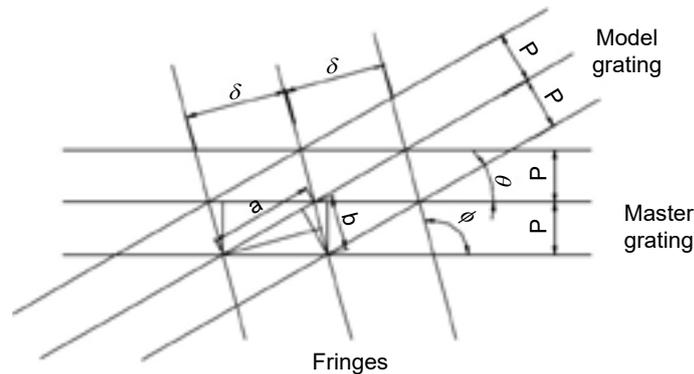


圖 4. 幾何疊紋量測法理論架構圖。

2. 陰影疊紋 (Shadow Moiré)⁽²⁾

陰影疊紋是一種全域性、非接觸性、非破壞性的光學量測方法，常用於平面外位移與表面形貌之量測，量測範圍與解析度主要與其參考光柵之間距相關。陰影疊紋法的原理是透過分析參考光柵與其投影至待測物表面之陰影光柵相互疊合而成的干涉條紋來做量測，故待測物之表面必須具有鏡面反射性質以反射參考光柵所投影之陰影光柵，因此通常需要於待測物表面噴灑反射漆，使其能夠反射足夠清晰的陰影光柵，方可形成干涉條紋。陰影疊紋法是將參考光柵置於待測物上方並保持一微小距離，兩者距離不宜過近或是過遠，過近會使待測物變形時接觸到參考光柵，過遠則不足以產生清晰的干涉條紋。當光源與光柵法線維持一個角度入射至參考光柵，而取像裝置則於法線另一側維持特定角度，如此將可以擷取到一組干涉條紋。

陰影疊紋法量測原理如圖 5 所示主要區分為平行光源與點光源，其中圖 5(a) 為平行光源，當一道平行光投射至參考光柵，穿過光柵並於待測物表面反射後再投射至參考光柵上，可由其幾何關係得知

$$\overline{BC} = W(x, y)(\tan \alpha + \tan \beta) = NP \quad (9)$$

將式 (9) 整理即可獲得平面外位移 $W(x, y)$

$$W(x, y) = N \left(\frac{P}{\tan \alpha + \tan \beta} \right) \quad (10)$$

其中定義 $W(x, y)$ ：平面外位移量； N ：條紋等級； P ：參考光柵之光柵間距 (Pitch)； α ：光源入射方向與參考光柵法線夾角； β ：取像裝置與參考光柵法線之夾角。其中 α 、 β 、 P 皆為實驗架設時所設定的已知數值，因此得知平面外位移量與條紋等級呈現正比關係，故可由適當之參考點作為零等級條紋位置，相當於此點將可依序推導出全場的對平面外位移量。

圖 5(b) 為點光源法，光源與取像裝置會置於同一水平面上，即兩者與參考光柵的垂直距離會相等。如同方程式 (10)，待測物上一點 S 的平面外位移可表示為

$$W(x, y) = N \left(\frac{P}{\tan \alpha' + \tan \beta'} \right) \quad (11)$$

其中 α' ：點光源入射至物體方向與參考光柵法線之夾角； β' ：取像裝置至物體方向與參考光柵法線之夾角。若點光源與取像裝置的水平距離為 D ，點光源以及取像裝置與參考光柵之垂直距離為 L ，由此幾何關係可知， $\tan \alpha' = \frac{X}{L+W}$ 以及 $\tan \beta' = \frac{D-X}{L+W}$ ，代入 (11) 可獲得

$$W(x, y) = N \left(\frac{P}{\frac{x}{L+W} + \frac{D-x}{L+W}} \right) = NP \left(\frac{L+W}{D} \right) \quad (12)$$

將方程式 (4) 整理後可得到

$$W(x, y) = \frac{NP}{\frac{D}{L} - \frac{NP}{L}} \quad (13)$$

由方程式 (13) 得知，於此架設下平面外位移與條紋等級不再呈現正比關係，但架設中之點光源與取像裝置間的水平距離遠大於參考光柵間距，亦即 $D > P$ ，則方程式 (13) 近似 (10)

$$W(x, y) = \frac{NP}{\frac{D}{L} - \frac{NP}{L}} \approx \frac{NP}{\frac{D}{L}} \approx \frac{NP}{\tan \alpha + \tan \beta} \quad (14)$$

因此；不論用何種架設方式，只要經過適當調整，皆可以得到方程式 (10) 之關係，即平面外位移量與條紋等級呈現正比關係，另外系統解析度與 α 、 β 、 P 有關，故藉由採用不同光柵間距的參考光柵並選定適當的光源入射角以及取像角度，可運用於不同解析度要求之待測物體。

3. 疊紋干涉儀 (Moiré Interferometry)⁽³⁾

疊紋干涉術在 1956 年由 Guild 所提出，其主要利用幾何疊紋原理再加上物理光學的繞射 (diffraction) 原理與干涉 (interference) 現象來量測物體的變形量。疊紋干涉術具有許多優點，包含全時間全場量測 (full field)，可直接取得大量動態資料，對於平面內位移具有極

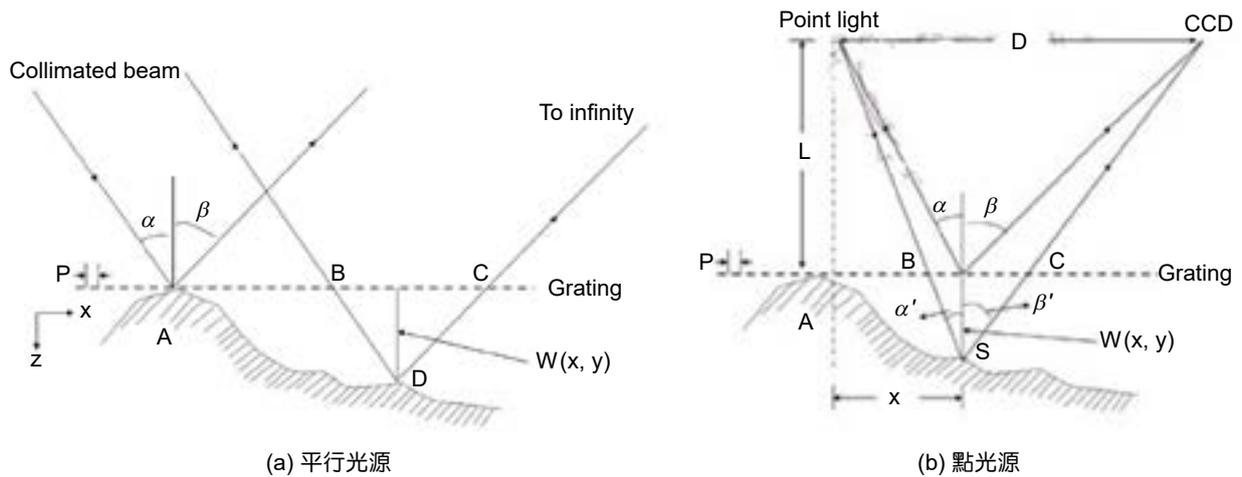


圖 5. 陰影疊紋法示意圖⁽¹⁾。

高靈敏性 (high sensitivity)，具有高度空間解析度，對於雜散對比相當低，適合定量定性分析。所形成的每一條干涉條紋都代表等量的位移。

假設兩具有相同週期的線性光柵之穿透函數 (transmission function) 分別為

$$W_1(x, y) = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi x}{p} + \phi_1 \right) \right] \quad (15)$$

與

$$W_2(x, y) = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi x}{p} + \phi_2 \right) \right] \quad (16)$$

其中 p 為光柵之節距， ϕ_1 和 ϕ_2 分別為兩光柵之初始相位，此初始相位源自於光柵條紋與假設的座標原點於 x 軸方向之偏移距離。若兩光柵平面間無距離，且當一擴束準直光通過第一光柵 G_1 後的光柵條紋產生形變，此形變的條紋 q_1 可表示為

$$q_1(x, y) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos \left[\frac{2\pi x}{p} + \varphi(x, y) + \phi_1 \right] \right\} \quad (17)$$

其中 $\varphi(x, y)$ 為條紋位移形變所引入的相位差。此光場在通過第二光柵 G_2 後所觀察到的二維光強度分佈可表示為

$$\begin{aligned} q(x, y) &= q_1(x, y) \times W_2(x, y) \\ &= \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos \left[\frac{2\pi x}{p} + \varphi(x, y) + \phi_1 \right] \right\} \times \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi x}{p} + \phi_2 \right) \right] \end{aligned} \quad (18)$$

上式經展開後可得

$$q(x, y) = \frac{1}{4} \left\{ 1 + \cos \left[\frac{2\pi x}{p} + \varphi(x, y) + \phi_1 \right] + \cos \left(\frac{2\pi x}{p} + \phi_2 \right) \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \cos \left[\frac{4\pi x}{p} + \varphi(x, y) + \phi_1 + \phi_2 \right] + \frac{1}{2} \cos [\varphi(x, y) + \phi_1 - \phi_2] \right\} \quad (19)$$

上式中，最後一項僅與條紋位移形變所產生的相位差有關，此即疊紋干涉術所欲擷取分析之 moiré 條紋，條紋的相位分佈為 $\varphi(x, y)$ 。第二、三與四項為與光柵柵線有關的高頻諧波雜訊，經濾除後即可獲得 moiré 條紋，可表示為

$$q(x, y) = q_0(x, y) \{ 1 + \gamma(x, y) \times \cos [\varphi(x, y) + \phi_1 - \phi_2] \} \quad (20)$$

其中 $q_0(x, y)$ 為平均光強度， $\gamma(x, y)$ 為對比度。且在不影響 moiré 條紋的二維相對相位分布下，可省略兩光柵間之初始相差 $\phi_1 - \phi_2$ 。由 (20) 式可知，相關待測的資訊，例如表面形貌、光束的收斂或發散度與應力等，將被紀錄在 moiré 條紋的相位分佈 $\varphi(x, y)$ 中，因此可藉由量測此相位分佈求得所待測之訊息。

4. 投射疊紋 (Projection Moiré)⁽⁴⁾

投影疊紋量測技術與陰影疊紋法相同，都是屬於量測平面外技術，其主要為克服陰影疊紋法中光柵需要大於樣本的需求。此外；陰影疊紋法為量測實際物理現象，單一影像。但是投影疊紋法為電腦運算結果，兩個影像。投影疊紋法為投影一組光柵於物體表面並保持不動，透過連續取像而得。

投影疊紋技術主要將兩張影像作疊合，第一張是實際獲取的影像而第二張是由電腦做出來的參考影像，經過運算後即獲得疊紋影像。投影疊紋法可以用來測量物體表面輪廓、形變和振動振幅的疊紋技術。當使用白光或雷射光穿越刻印著許多平行等距直線的振幅光柵元件，或應用干涉儀形成的直線干涉條紋，將此直線條紋投射於物體上，由於物體表面曲度及深度的變化使條紋變形，利用適當的方式 (如 CCD 相機) 擷取此變形條紋的影像，配合所推導出的條紋變形量與物體高度變化的關係式，即可算出物體的表面輪廓。當使用兩次曝光的技巧時，即在物體受力前後各曝光一次，使得物體受力前後各別的變形條紋影像記錄在同一張底片上，則所形成的疊紋條紋將是受力前後表面位移或形變的一種表示。

而投影疊紋技術原理如圖 6 所示，通常使用投影儀將 p 間距 (pitch) 的光柵條紋投影在樣本物體表面上，並且記錄其影像。當物體產生變形從表面 S (第一光柵圖像) 變化至表面 S' (第二光柵圖像)，並將兩張光柵圖像記錄在同一張影像上，則可以觀察兩個圖像重疊而產生的疊紋條紋。假設表面 S 上的點 A 水平移動到表面 S' 上的位置 A' ，水平移動距離為 w ，垂直於照明方向的距離為 d 。疊紋條紋階數 N 等於 d/p ，則平面外位移 w 可以表示成

$$W = \frac{Np}{\sin \alpha} \quad (21)$$

此公式就是投影疊紋法基本方程式。

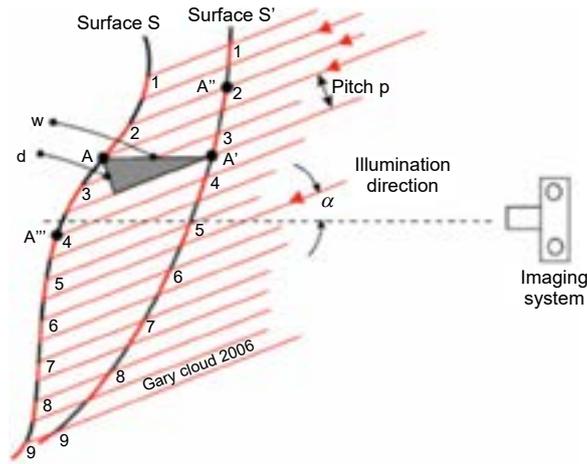


圖 6. 投影疊紋量測法理論架構圖。

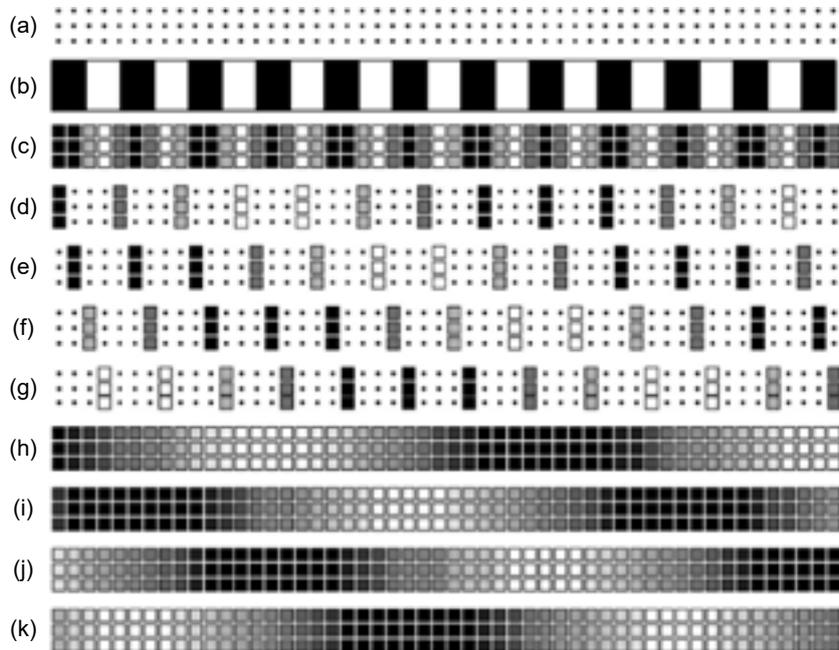


圖 7. Sampling Moiré 量測法理論架構圖。其中 (a) 為相機的取樣點。(b) 為標本光柵。(c) 為標本光柵的取樣影像。(d) 取樣影像的稀疏影像 ($N = 4, \alpha = 0$)。(e) 取樣影像的稀疏影像 ($N = 4, \alpha = \pi/2$)。(f) 取樣影像的稀疏影像 ($N = 4, \alpha = \pi$)。(g) 取樣影像的稀疏影像 ($N = 4, \alpha = 3\pi/2$)。(h) 為 (d) 的插值圖像。(i) 為 (e) 的插值圖像。(j) 為 (f) 的插值圖像。(k) 為 (g) 的插值圖像。⁽⁵⁾

5. Sampling Moiré 法⁽⁵⁾

Sampling Moiré 是一種新開發的疊紋條紋技術，使用圖像處理器處理光柵圖案，進而測量形狀或位移或應變分佈。Sampling Moiré 技術原理如圖 7 所示，其疊紋條紋是通過從連續像素向下取樣，然後進行數字強度插值而產生。其中 (d) 是通過選擇第一個像素並對每個第 N 個像素取樣 (其中稀疏指數 $N = 4$)。(e) 是通過選擇第二個像素取樣點具有 $\pi/2$ 相位移。同

理 (f) (g) 分別為選擇第三與第四個像素取樣點，其分別具有 π 與 $3\pi/2$ 相位移。如果所有取樣圖像都被稀疏至 (d-g)，並透過插值則圖像將變得清晰且易於觀察。(h)-(k) 主要顯示線性差值影像，然後，從 (c) 單一圖片獲得疊紋條紋圖案的多個相位移影像。

第 k 個相位移圖像的強度可以大致表示如下：

$$I_k(i, j) = I_a(i, j) \cos \left[\phi(i, j) + k \frac{2\pi}{N} \right] + I_b(i, j) \quad (k = 0, 1, \dots, N_T - 1) \quad (22)$$

其中 $I_b(i, j)$ 代表圖像中的背景強度， $I_a(i, j)$ 代表光柵強度的幅度， $\phi(i, j)$ 為初始相位值。疊紋條紋圖案的分布可以從方程式 (22) 頻率 1 的傅立葉轉換獲得。因此，頻率 1 的 wrapped 相位如方程式 (23) 所示

$$\theta = a \tan 2 \left[\frac{\text{Im}\{F(1)\}}{\text{Re}\{F(1)\}} \right] = a \tan 2 \frac{\sum_{k=0}^{N-1} I_k \sin \left(k \frac{2\pi}{N_T} \right)}{\sum_{k=0}^{N-1} I_k \cos \left(k \frac{2\pi}{N_T} \right)} \quad (23)$$

其中 $\text{Im}\{F(1)\}$ 與 $\text{Re}\{F(1)\}$ 分別為頻率 1 的實部與虛部，如果樣品光柵的亮度分布為正弦曲線，則可以獲得的相位精度很高，然而，即使分布為非正弦曲線，當折射率 NT 值大時，其精度也會很高。即使當折射率 NT 數值小時，通過在照相機的散焦下紀錄光柵與圖像將成為近似餘弦。疊紋條紋的相位是參考光柵相位 ϕ_r 與標本光柵相位 ϕ_s 之差

$$\phi_m = \phi_r - \phi_s \quad \text{and} \quad \phi_s = \phi_r - \phi_m \quad (24)$$

其中相位 ϕ_m 是分析數值，相位 ϕ_r 為已知，因此 ϕ_s 可以計算獲得。當取樣的相位偏移 2π ，即參考光柵的一個間距時，疊紋條紋的相位偏移 2π 。當疊紋條紋的相位也因為變形而變化時，此時變形前後的光柵線的相位差 $\Delta\phi_s$ 等於疊紋條紋的相位差 $\Delta\phi_m$ 。所以變形量為

$$u = p \frac{\Delta\phi_m}{2\pi} = p \frac{\Delta\phi_s}{2\pi} \quad (25)$$

其中 p 為標本光柵的間距，方程式 (23) 對應於波的傅立葉頻率 1 的相位，其提供了最自然餘弦波相位應用於原始強度波。

經由上述各種疊紋法技術與原理說明介紹後，依據其量測規範，彙整出如表 2 所示之技術比較表。

四、疊紋光學量測法技術應用

疊紋量測技術 (moiré measurement technology) 依其技術區分為幾何疊紋法 (geometric Moiré)、陰影疊紋 (shadow moiré)、疊紋干涉儀 (moiré interferometry)、投射疊紋 (projection moiré)、sampling moiré，其量測優點在於非接觸式、非破壞性、全域性、影像解析度高等特性，因此；廣泛應用於土木建築、機械加工、半導體電子元件、藝術創作、及醫學應用等領域。在建築領域方面，主要用於量測橋樑、大樓建築物受外力 (車輛、風力) 之變形量

表 2. 疊紋量測法技術比較表。

疊紋技術總類 (Moiré Techniques)		參考光柵 (Reference Grating)	光柵間距 (Common Specimen Grating Pitch (Ps) and Reference Grating Pitch (Pr))	寬度 (Common View Field Width)	位移敏感度 (Displacement Sensitivity)	動態量測 (Dynamic test)
平面內 (For in-plane)	幾何疊紋法 (Geometric Moiré Method)	Entity grating	$pr \approx ps = 10 \text{ um} - \text{m}$	Less than 400 pr	1pr/fringe	OK
	疊紋干涉法 (Moiré Interferometry Method)	Diffracted beams	$2pr \approx ps = 0.833 \text{ um}$ or 0.417 um , or 1.67 um	Dozens – hundreds of millimeters	1pr/fringe	OK
	(Sampling Moiré Method)	Virtual digital grating	As long as grating can be recorded. $ps = \text{nm} - \text{m}$.	Less than 400 pr	0.001 – 0.01 ps/pitch	OK
平面外 (For out-of-plane)	陰影疊紋法 (Shadow Moiré Method)	Entity grating	$pr = 10 \text{ um} - \text{m}$	Less than 400 pr	1pr/fringe when illumination angle is 45° and observation angle is 0°	OK
	投影疊紋法 (Projection Moiré Method)	Projected grating	$pr = 1 \text{ um} - \text{m}$	Millimeters ~meters	1pr/fringe when the angle between illumination and observation is 90°	OK

量測。半導體電子元件方面，可以量測電子元件封裝結構體外觀的變形量 (warpage)、應力 (stress) 與應變 (strain) 等。機械加工方面，主要用於量測加工面的平整性與粗糙度等。藝術創作方面，可以透過疊紋干涉的技術特性，進行藝術創作。以下將介紹相關疊紋量測技術的實際應用。

1. 陰影疊紋 (shadow moiré)

陰影疊紋法與投影疊紋法與都是應用於 Out-of-plane 量測，各有其優缺點，陰影疊紋技術系統容易安裝、校準與圖像計算，常運用於各樣式的半導體元件封裝形變量測。其應用包含機械相關零組件表面狀況觀察、薄膜結構應力量測、封裝結構體變形量量測^(9, 10)、材料玻璃轉換特性量測⁽¹¹⁾等。Chen⁽⁶⁾ 等人使用陰影疊紋法量測鑽石研磨盤的表面狀況，鑽石研磨盤主要運用於化學機械研磨製程，鑽石研磨盤的表面狀況嚴重影響 wafer 研磨品質，透過陰影疊紋法定時量測鑽石研磨盤表面狀況，改善研磨品質如圖 8 所示。Chen^(7, 8) 等人使用雙光束陰影疊紋法 (double beam shadow moiré interferometer) 量測軟性基板上 ITO 薄膜的殘留應力，其量測精準度相當高，誤差只有 1.26% 如圖 9 所示。Yinyan Wang⁽⁹⁾ 等人使

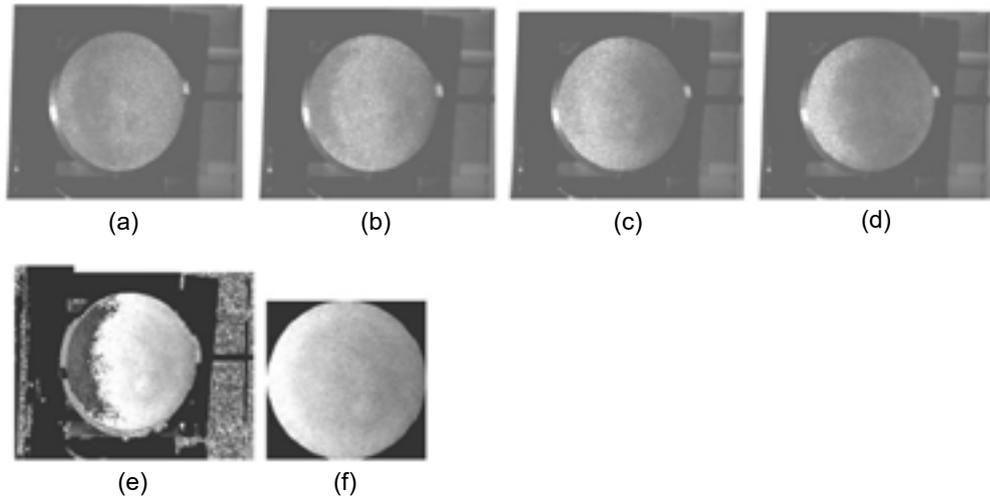


圖 8. 鑽石研磨盤表面形變量測⁽⁶⁾。

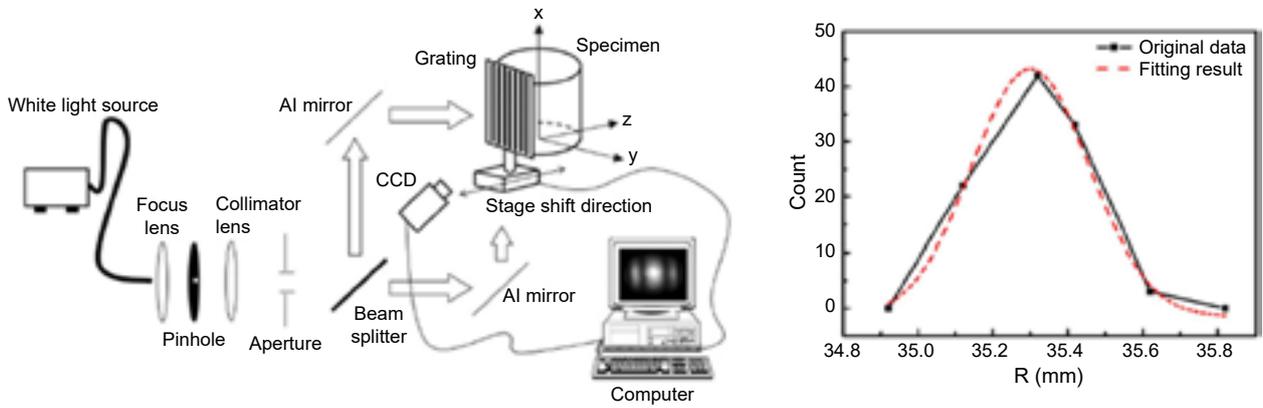


圖 9. 軟性基板 ITO 薄膜殘留應力量測^(7,8)。

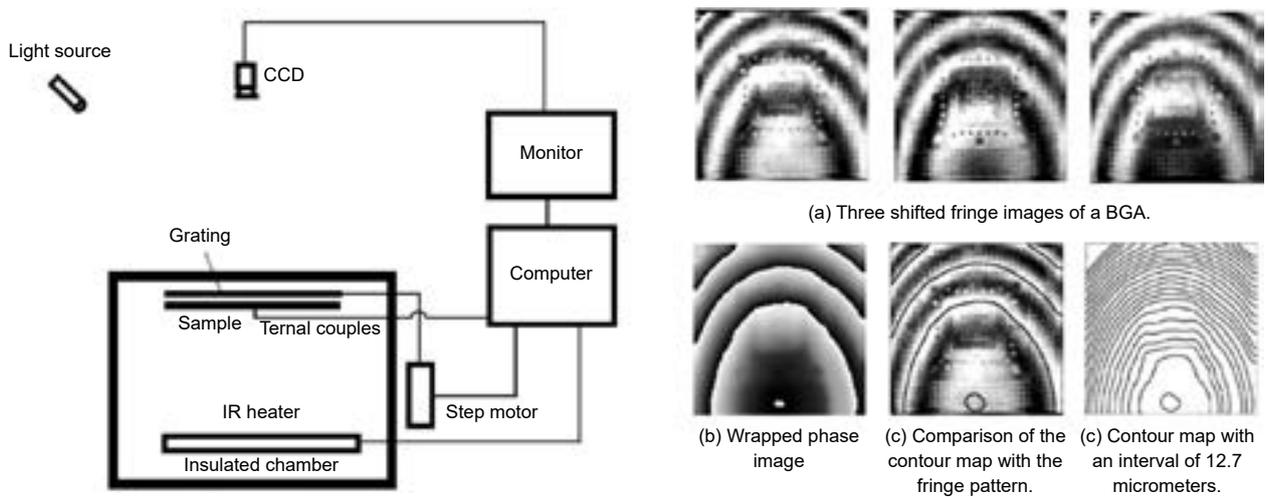


圖 10. BGA 封裝結構體變形量測⁽⁹⁾。

用 Phase Stepping Shadow Moiré 方式量測 BGA 封裝結構體的變形量 Phase Stepping Shadow Moiré 的優點為依據條紋偏移的特性，可以直接自動定義結構翹曲的方向如圖 10 所示。Dirk Zwemer⁽¹⁰⁾ 等人採用 Phase Stepping Shadow Moiré 法量測 PCB 基板在 TCT (-50 °C - 150 °C) 條件下的變形行為確認。Jiong-Shiun Hsu⁽¹¹⁾ 等人使用 Phase Stepping Shadow Moiré 方式量測 Polymer 材料的玻璃轉換溫度。透過使用 Phase Stepping Shadow Moiré 可以提高量測解析度 1.56 μm ，精準量測獲得 Polymer 材料的真實 Tg 溫度如圖 11 所示。

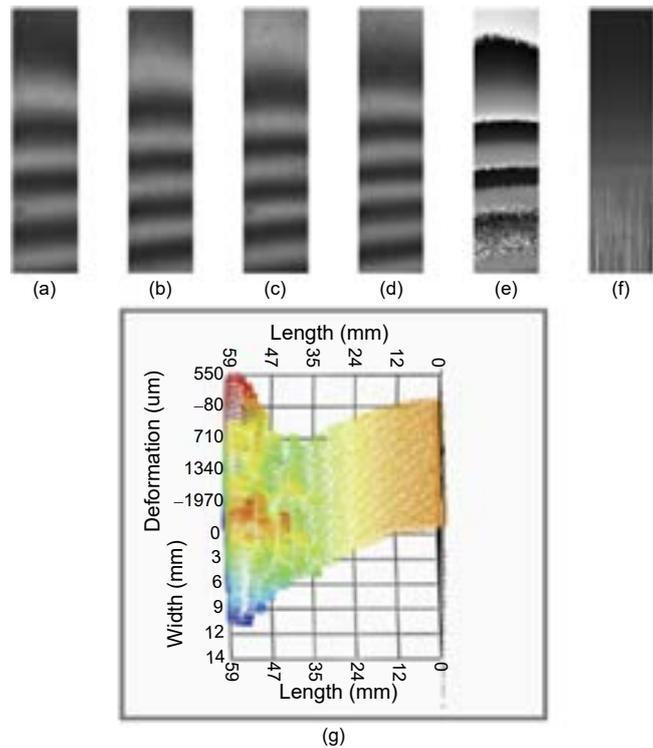


圖 11. Polymer 材料玻璃轉換溫度量測⁽¹¹⁾。

2. 疊紋干涉儀 (moiré interferometry)

疊紋干涉法是一種全場域光學量測技術，具有高靈敏性與高信噪比，屬於平面內量測，常運用於各樣式的半導體元件封裝形變量測。元件封裝結構包含 ACF 覆晶封裝結構、扇形封裝結構體、離散式封裝元件。Jin-Hyoung Park⁽¹¹⁾ 等人利用疊紋干涉法量測 ACF 覆晶封裝結構受濕熱可靠性測試的變形行為，其中採用 Twyman-Green interferometry 方法量測結構的翹曲行為，並且採用疊紋干涉儀量測晶片內的剪應變分布。因為 ACF 封裝結構體的破壞模式為 ACF 材料層發生脫層其發生原因為晶片邊緣剪應變所致，因此，需要確認結構體在可靠度過程中的結構剪應變行為如圖 12 所示。Bulong Wu^(12, 13) 等人使用疊紋干涉法量測 Fan-Out wafer level package 結構在 TCT 測試條件下的整體結構型變 (warpage) 與微接點 (micro bump) 形變量測。透過此方式確認其結構可能的破壞點，進而解決封裝結構的可靠度失效原因，如圖 13 所示。Dae-Suk Kim⁽¹⁴⁾ 等人使用疊紋干涉法量測離散式功率元件在溫度循環測試 (TCT) 環境下的結構變形行為探討，如圖 14 所示。

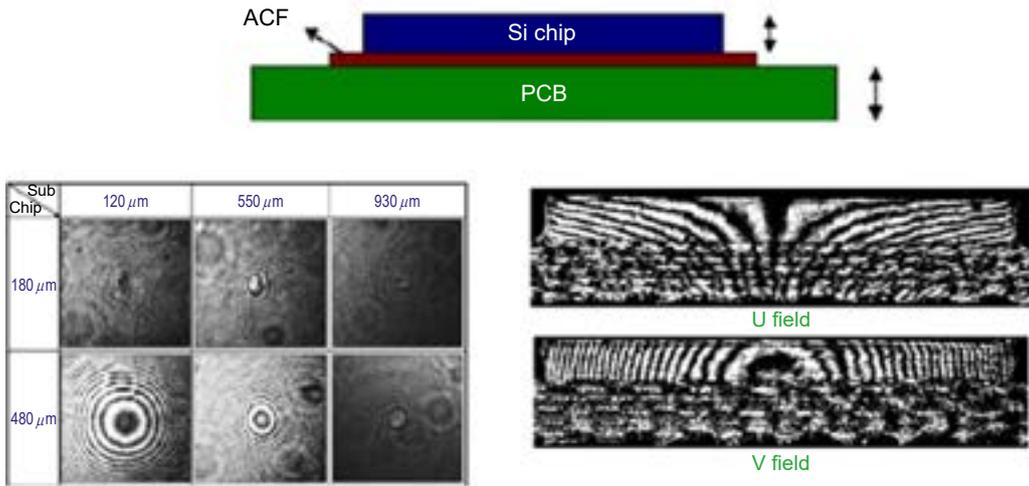


圖 12. ACF 封裝結構體⁽¹¹⁾。

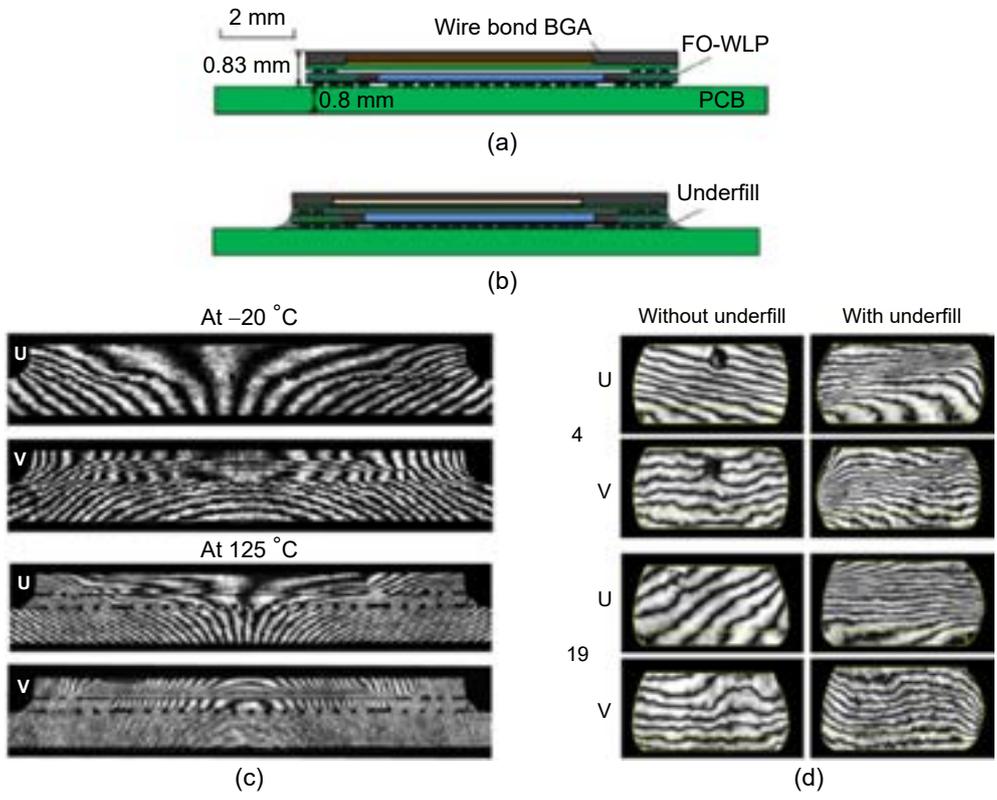


圖 13. 扇形封裝結構體^(12, 13)。

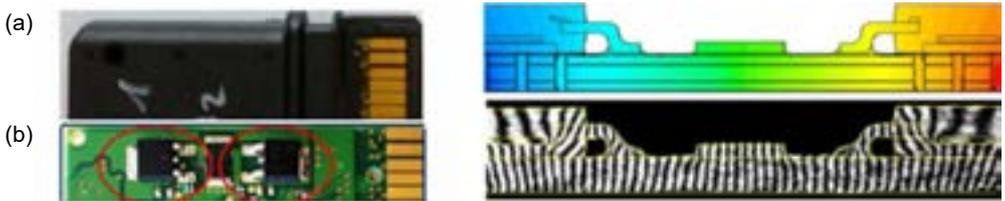


圖 14. 離散式元件封裝結構體⁽¹⁴⁾。

3. 投射疊紋 (projection moiré)

投影疊紋法與陰影疊紋法都是應用於 Out-of-plane 量測，各有其優缺點，陰影疊紋技術系統容易安裝、校準與圖像計算，相較之下，投影疊紋法系統安裝上就較為複雜。此外，投影疊紋法不需要準備玻璃光柵，其光柵採用投影方式，且具有良好的景深，適合用於量測如印刷電路板的翹曲行為。投影疊紋系統可以輕鬆調整以測量不同的表面尺寸和細節。當用於測量小樣本時，它具有更好的分辨率。其應用實例包含電子元件基板變形量測、軟性複合材料變形量測、3D 結構外型量測、及機械零組件表面形狀量測。針對電子元件基板變形部分，Joe Thomas and Hai Ding^(15, 16) 等人，利用投射疊紋法量測電子元件與 PCB 基板受熱影響其所產生的翹曲變形，透過此技術確認封裝體失效模式，進行修正封裝體結構設計，如圖 15 所示。

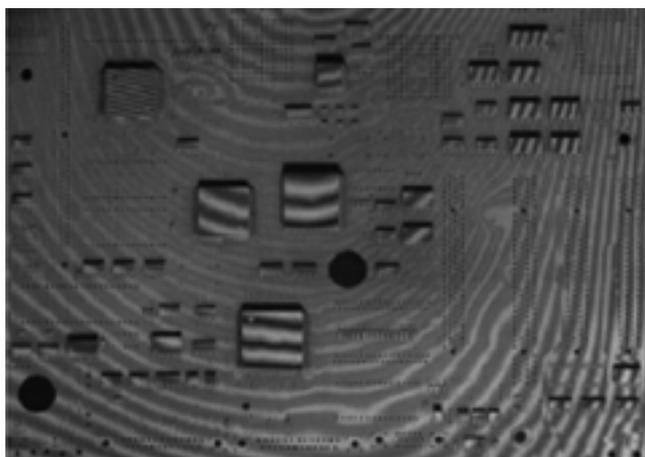


圖 15. PCB 基板翹曲量測^(15, 16)。

針對軟性複合基板材料變形量測部分，Y. Pourvais⁽¹⁸⁾ 等人使用 digital projection moiré (DPM) 方法量測多層軟性複合材料結構 (flexible-core sandwich structures) 的彎曲變形量測，其量測變形量與 CAE 數值相近如圖 16 所示。Kun Huang Chen⁽¹⁷⁾ 等人使用投射疊紋搭配 heterodyne interferometry 量測軟性基板上薄膜材料層的表面狀況與應力值，如圖 17 所示。

針對 3D 結構外型量測部分，Jun Yao^(19, 20) 等人利用投射疊紋方法量測靜態立體浮雕紙張的立體外型，如圖 18 所示。此外；Yi Cheng Chen⁽²¹⁾ 等人亦利用投射疊紋方法量測齒輪結構外型尺寸與表面狀況，如圖 19 所示。

4. Sampling Moiré

sampling moiré 是一種相當方便的相位分析方法，其分析精度約在光柵間距的 1/100 至 1/1000 範圍，因為可以從單張圖像完成相位分析，所以非常適合用於即時量測。其應用實例包含電子封裝元件變形量與應變量測、大型物體與建物的變形量測、旋轉物體外型與形變量測。針對電子封裝元件變形量與應變量測部分，Masaaki⁽²²⁾ 等人使用 X-Ray 觀察多層晶片堆疊 BGA 結構封裝前後的 Au bump 形變影像，再依據此影像並搭配 phase-shifted sampling moiré method 量測電子元件封裝結構體的殘留應力與應變量測，透過此技術確認封裝體失效模式，進行修正封裝體結構設計如圖 20 所示。

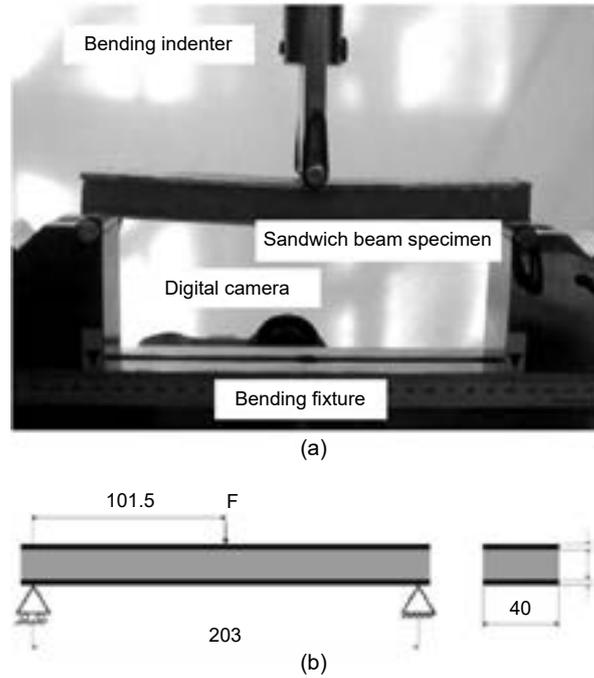


圖 16. 複合材料結構變形量測⁽¹⁸⁾。

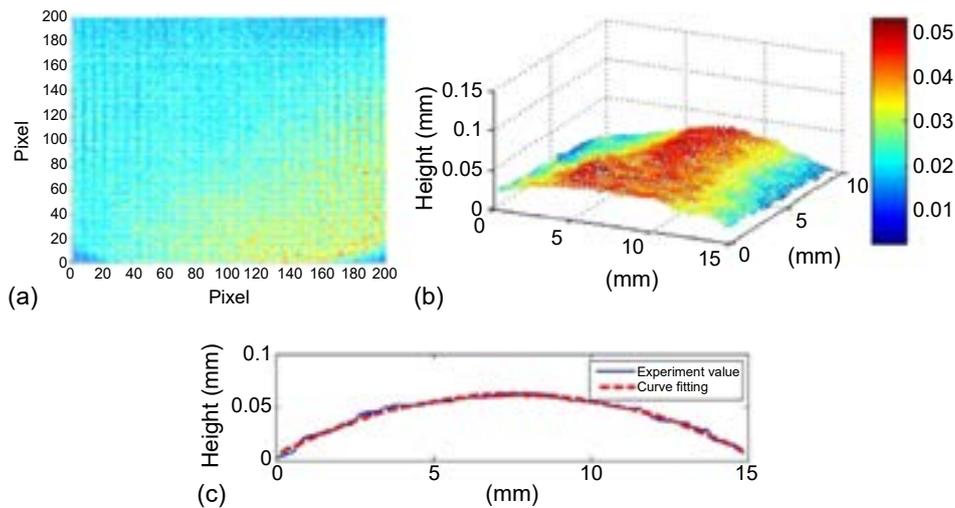


圖 17. 軟性基板薄膜表面狀況量測⁽¹⁷⁾。

針對大型物體與建物的變形量測部分，Shien Ri⁽²³⁻²⁶⁾ 等人主要利用 *sampling moiré* 量測大型結構體如橋樑、大樓結構體與火力發電廠結構等，其中橋樑結構體主要觀察火車通過橋樑時，其橋樑結構的受力變形行為，藉此確認橋樑的安全。大樓結構體主要觀察大樓結構受風力作用，其大樓結構的變形狀況，藉此確認大樓結構的安全。火力發電廠結構主要觀察大型輸送管路的受熱變形行為，藉此確認管路的安全性如圖 21、22、23 所示。

針對旋轉物體外型與形變量測部分，Motoharu^(27, 28) 等人主要利用 *sampling moiré* 動態量測高速旋轉輪胎的外型變形量與應變分佈，藉此確認輪胎在高速行駛下的安全性，作為輪胎開發依據如圖 24 所示。

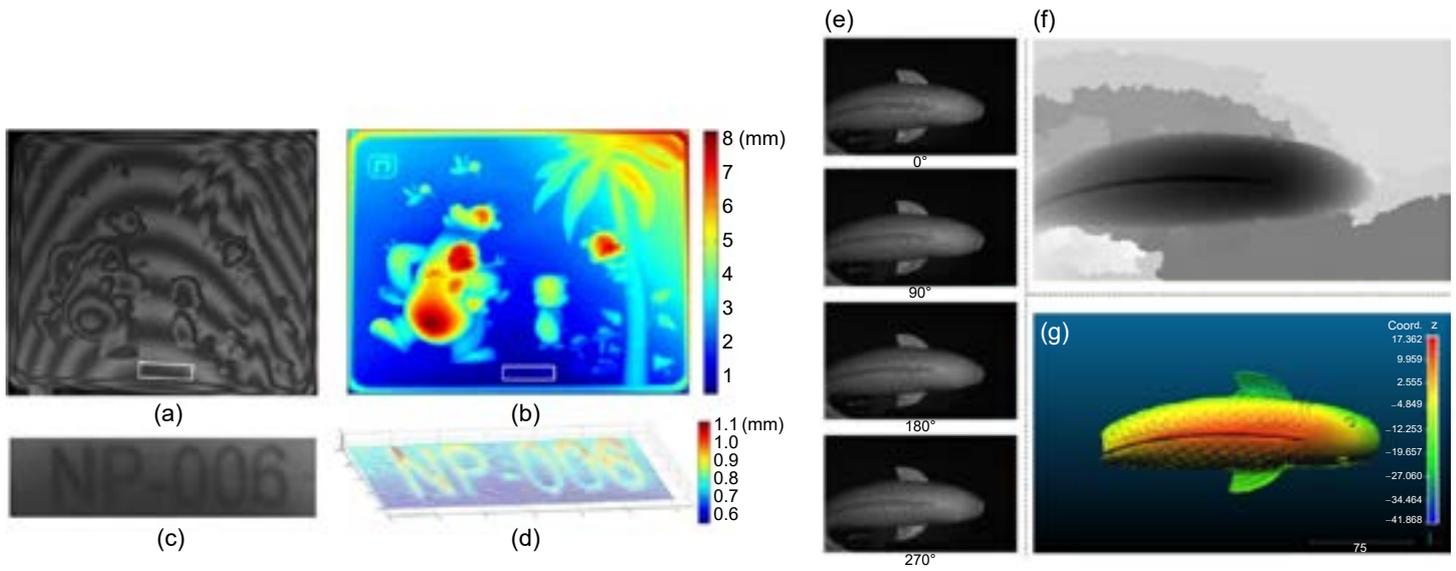


圖 18. 3D 物體外型量測^(19,20)。

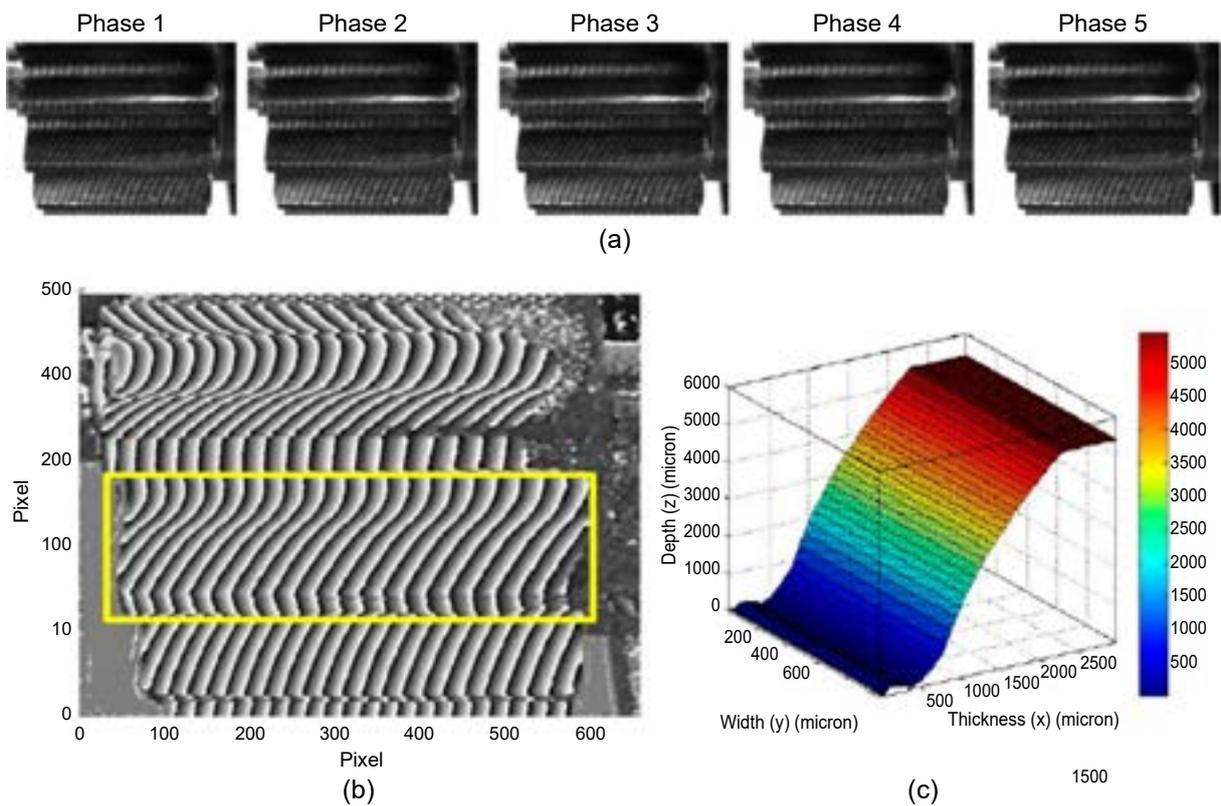


圖 19. 齒輪 3D 輪廓量測⁽²¹⁾。

五、結論

經由上述介紹清楚理解疊紋量測技術具備非接觸式、非破壞性、全域性、影像解析度高等特性。依其技術區分為幾何疊紋法、陰影疊紋、疊紋干涉儀、投射疊紋以及 Sampling Moirè，廣泛應用於土木建築、機械加工、半導體電子元件、藝術創作、及醫學應用等領

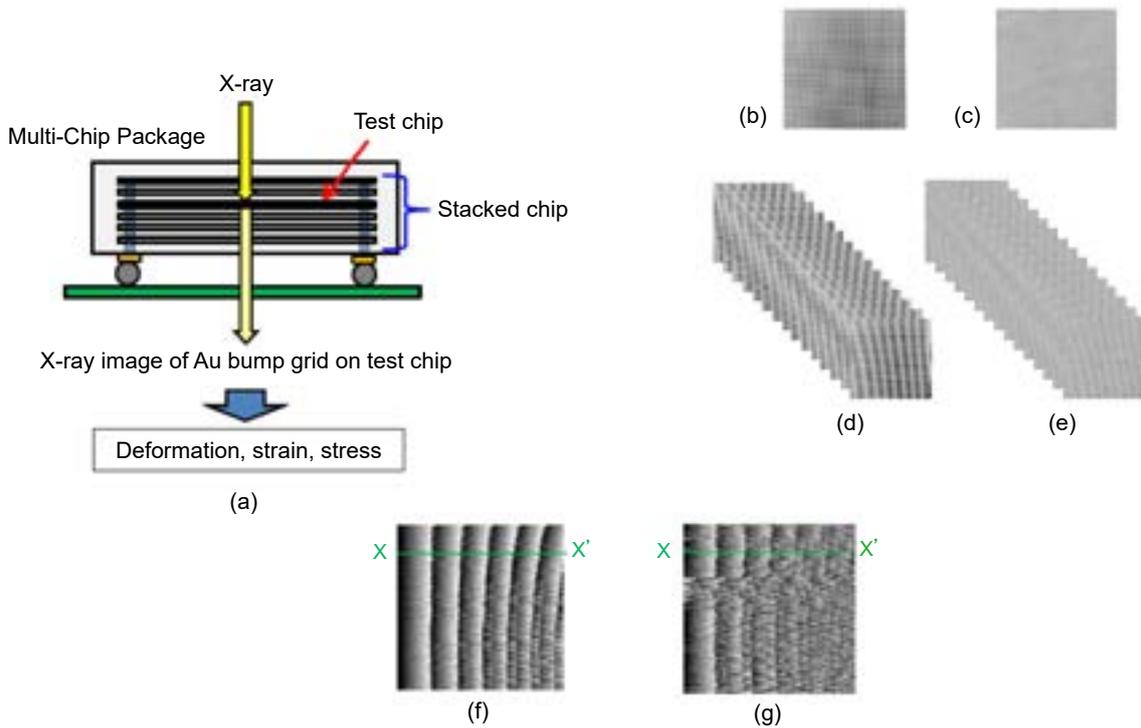
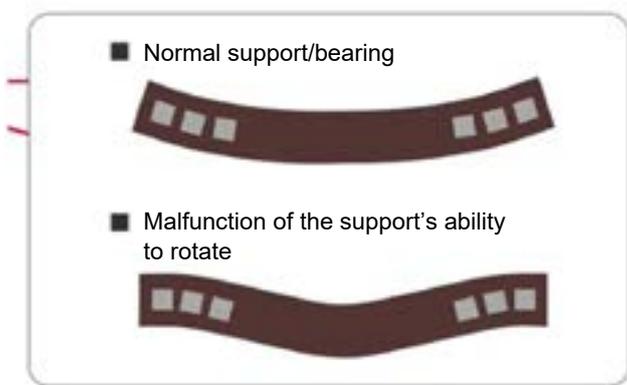


圖 20. 多層晶片堆疊 BGA 結構量測⁽²²⁾。



Girders and bases that cannot deflect under load will incur damage

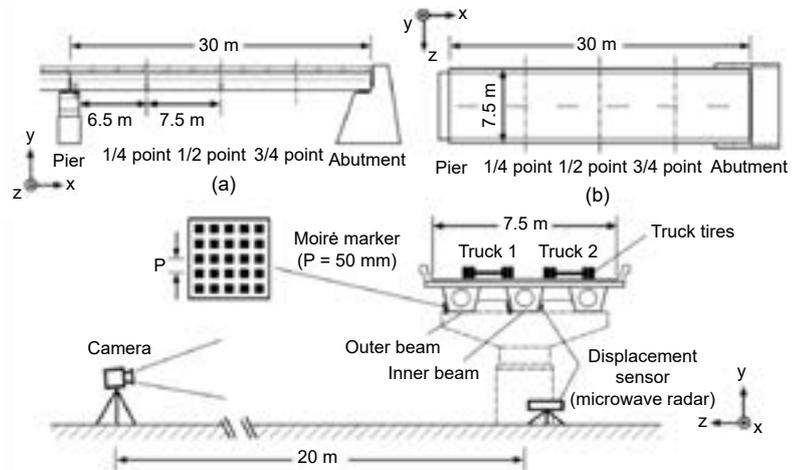


圖 21. 橋樑形變行為量測^(24, 25)。

域。在建築領域方面，主要用於量測橋樑、大樓建築物受外力（車輛、風力）之變形量量測。半導體電子元件方面，可以量測電子元件封裝結構體外觀的變形量、應力與應變等。機械加工方面，主要用於量測加工面的平整性與粗糙度等。藝術創作方面，可以透過疊紋干涉的技術特性，進行藝術創作。疊紋量測技術發展趨勢包含 (1) 量測尺度朝向微小化與超大型尺度、(2) 大面積量測精度、(3) 需要具備動態量測功能、(4) 需要能夠在高溫環境下量測、(5) 需要可以量測極微小尺度、極大尺度、高溫環境、動態等之三維結構外型形變行為、(6) 需要多尺度量測，尺度範圍從原子尺度到公尺尺度。

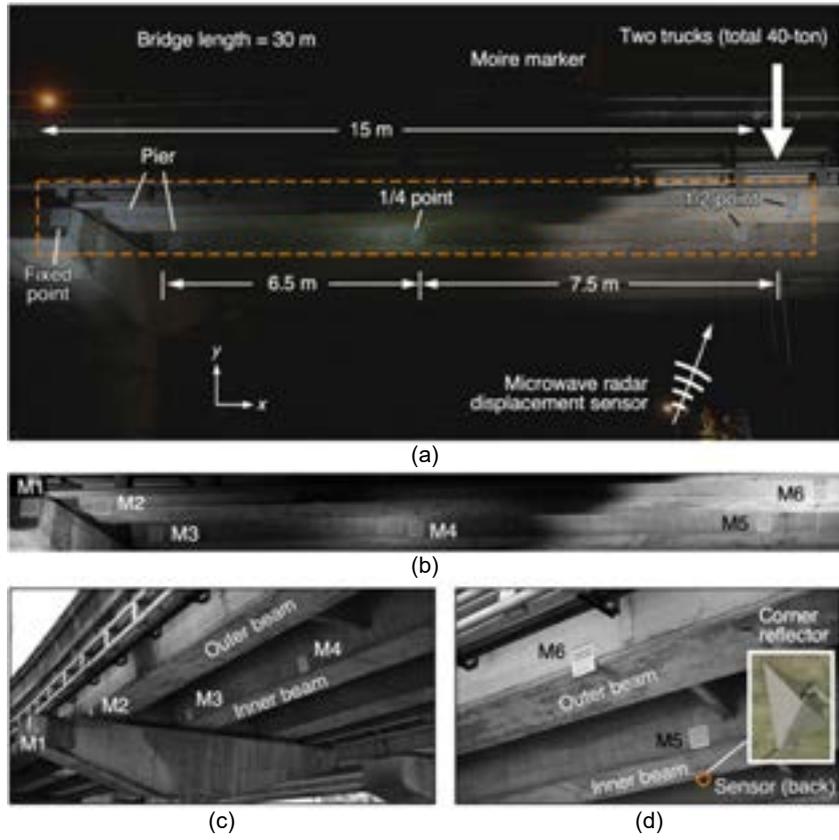


圖 22. 橋樑結構^(24, 25)。

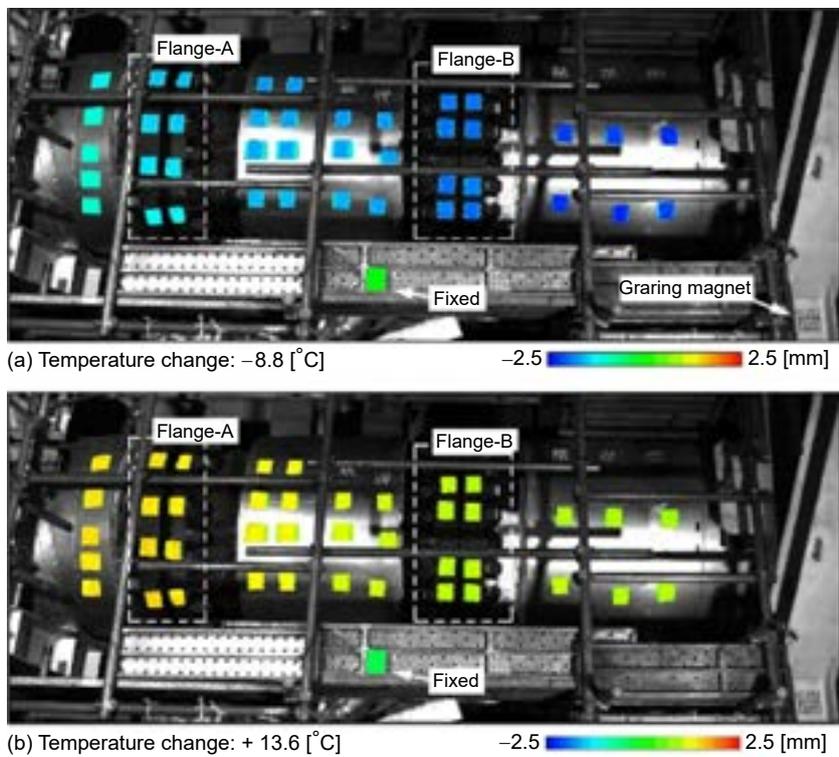


圖 23. 火力發電設施⁽²⁶⁾。

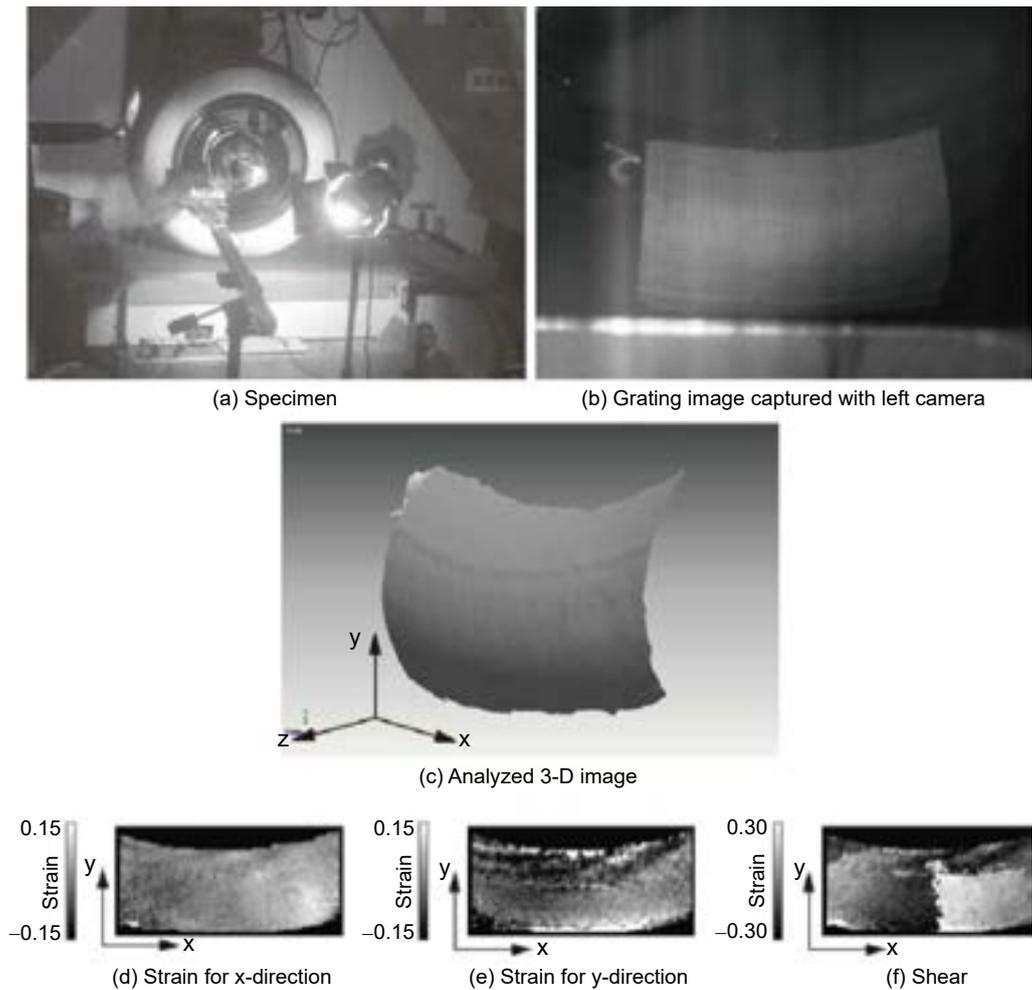


圖 24. 高速輪胎動態量測。

參考文獻

1. 謝昌中, 疊紋量測技術之建立及應用, 國立成功大學機械工程學系碩士論文, (2001).
2. 康文譯, 應用數位相位移式陰影雲紋法於透明材料之表面形貌量測, 國立清華大學動力機械研究所碩士論文, (2013).
3. 張巍耀, 外差疊紋干涉術原理與其應用之研究, 國立交通大學光電工程學系博士論文, (2015).
4. Qinghua Wang, Hiroshi Tsuda and Huimin Xie, *Recent Patents on Materials Science*, **8**, 188 (2015).
5. Yoshiharu Morimoto and Motoharu Fujigaki, "Accuracy of Sampling Moiré Method", ICEM 2008.
6. Chen, Terry Yuan-Fang, Lin, Jie, "Automated surface profile measurement of diamond grid disk by phase-shifted shadow Moiré", International Conference on Experimental Mechanics 2013 and Twelfth Asian Conference on Experimental Mechanics, edited by Somnuk Sirisoonthorn, Proc. of SPIE Vol. 9234.
7. Kuo-Ting Huang and Hsi-Chao Chen, *Journal of Display Technology*, **10** (7), 609 (2014).
8. Hsi-Chao Chen, Kuo-Ting Huang, Yen-Ming Lo, Hsuan-Yi Chiu and Guan-Jhen Chen, *Optical Manufacturing and Testing*, **8126**, (2011).
9. Yinyan Wang and Patrick Hassell, "Measurement of Thermal Induced Warpage of BGA Package/Substrate Using Phase-Stepping Shadow Moiré". Please refer to the website:
<http://akrometrix.com/wp-content/uploads/2016/02/BGA-Warpage-Using-Phase-Stepping.pdf>
10. Dirk Zwemer, et al., "PWB Warpage Analysis and Verification Using an AP210 Standards-based Engineering Framework and Shadow Moirés", 5th International Conference on Thermal and Mechanical Simulation and Experiments in

- Microelectronics and Microsystems, May 10-12, (2004).
11. Jiong-Shiun Hsu, Bor-Jiunn Wen, Wei Li and Chen-Wei Yang, *Polymer Testing*, **57**, 58 (2017).
 12. Jin-Hyoung Park, Kyung-Woon Jang, Kyung-Wook Paik, and Soon-Bok Lee, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, **33** (1), 215 (2010).
 13. Bulong Wu, Bongtae Han, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, **8** (5), 764 (2018).
 14. Laura Spinella, Jang-Hi Im, and Paul S. Ho, “Reliability Assessment of Fan-Out Package Using High Resolution Moirè Interferometry and Synchrotron X-ray Microdiffraction”, May 31-Jun 03, 2016 IEEE 66th Electronic Components and Technology Conference.
 15. Dae-Suk Kim, Bongtae Han, Arjun Yadur and Przemyslaw Jakub Gromala, “Electronic control package model calibration using Moirè interferometry”, April 4-7, 2014 15th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems.
 16. Joe Thomas, “Projection Moirè vs. Shadow Moirè for Warpage Measurement and Failure Analysis of Advanced Packages”. Please refer to the website:
<https://smtnet.com/library/files/upload/moire-warpage-measurement-failure-analysis.pdf>
 17. Hai Ding, Reinhard E., Carl R. Hanna and I. Charles Ume, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, **25** (4), 714 (2002).
 18. Kun Huang Chen, Jing Heng Chen, Hua Ken Tseng, and Wei Yao Chang, *Optical Engineering*, **55** (6), 064102 (2016).
 19. Y. Pourvais, P. Asgari, A. R. Moradi, and O. Rahmani, *Proceedings of SPIE*, **9117**, (2014).
 20. Ying Tang et al., *Optics and Laser in Engineering*, **104**, 135 (2018).
 21. Jun Yao and Jubing Chen, *Optic and Laser in Engineering*, **110**, 1 (2018).
 22. Yi Cheng Chen and Jr Yi Chen, *Sensors*, **19** (6), 2 (2019).
 23. Masaaki Koganemaru, Masakazu Uchino, Akihiro Ikeda, and Tanemasa Asano, “Examination of Residual Stress Measurement in Electronic Package Using Phase-Shifted Sampling Moirè Method and X-Ray Images”, Sep 16-18, ESTC 2014, Electronics System-Integration Technology Conference.
 24. Shien Ri and Hiroshi Tsuda, “Measuring small deformations of large structure using a digital camera”, the international society for optics and photonics, 2013. Please refer to the website: <https://spie.org/news/4877-measuring-small-deformations-of-large-structures-using-a-digital-camera>
 25. S. Ri, H. Tsuda, K. Chang, S. Hsu, F. Lo and T. Lee, *Experiment Techniques*, **44**, 313 (2020).
 26. Takuya Hara, Makiko Nakabo, Motoharu Fujigaki, “Dynamic Deformation Measurement of Real Bridge using Sampling Moirè Camera”, Jan1-8, IEEE Conference Anthology 2013.
 27. Shien Ri, Satoshi Hayashi, Shinji Ogihara and Hiroshi Tsuda, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, **8692**, (2013).
 28. Yoshiharu Morimoto, Motoharu Fujigaki and Akihiro Masaya, *Journal of the Vacuum Society of Japan*, **54** (1), 32 (2011).
 29. Motoharu Fujigaki, Kosuke Shimo, Akihiro Masaya and Yoshiharu Morimoto, *Optical Engineering*, **50** (10), 101506 (2011).
 30. 陳國烈, 幻彩疊紋-微形圖像元素表現疊紋效果之數位藝術創作, 國立臺中教育大學碩士論文, (2013).

作者簡介

高國書先生現為國立清華大學動力機械工程系在職博士生，目前為工業技術研究院電子與光電研究系統研究所專案副理。

Kuo-Shu Kao is currently a part time PhD. student in Department of Power Mechanical Engineering at National Tsing Hua University. He is an deputy project manager in Electronic and Optoelectronic System Research Laboratories at Industrial Technology Research Institute.

類神經網路視覺對位演算法之光學檢測於基於全面性摺疊測試的軟性顯示器

Optical Inspection of Neural Network Vision Alignment Algorithm for Flexible Displays Based on Whole-folding Test

溫博浚、洪品軒、曾亭瑜

Bor-Jiunn Wen, Pin-Hsuan Hung, Ting-Yu Tseng

為了檢測光學檢測軟性顯示器的耐用性，本研究創建了一個自動光學檢測系統 (optical detection system, ODS)，該系統包括一個類神經網路作為對準控制演算法，可在 XYZ 平台和一個帶有可旋轉平台四個自由度上的影像擷取儀進行軟性顯示器的光學影像量測。此外，本文提出了一種自動全面性摺疊測試系統 (automatic whole-folding testing system, AWTS)，可以為整個樣本的摺疊或彎曲操作調整摺疊或彎曲半徑。在軟性顯示器的全面性摺疊測試期間，軟性顯示器在不同尺寸下需要軟性顯示器的相應旋轉角度以進行垂直法線方向之光學檢測。根據 AWTS 上不同尺寸大小的軟性顯示器的光學影像量測，本研究利用 ODS 進行正交對準，並通過類神經網路視覺對準演算法自動將軟性顯示器對齊到顯示面的中心進行光學自動化檢測。最後，本研究利用類神經網路來控制四個自由度之 ODS，其最大控制誤差百分比為 2%。此外，本研究還針對軟性膽固醇液晶顯示器進行了全面性摺疊測試。結果發現衰減光學特性隨著摺疊次數的增加而增加，並且在全面性摺疊測試之後此軟性膽固醇液晶顯示器的部分區域光學灰度值的最大衰減百分比為 10%。因此，根據本研究之量測結果和本研究所創建的類神經網路視覺對位演算法之自動光學檢測方法，其適用於基於全面性摺疊測試來評估軟性顯示器的性能，以提供改善軟性顯示器的軟性特性。

In order to inspect the durability of flexible displays, this study creates an automatic optical detection system (ODS), which includes a neural network as an alignment control algorithm, an XYZ platform with a rotatable stage, and the image capture instrument performed optical image measurement of flexible displays in four degrees of freedom. In addition, this study creates an automatic whole-folding testing system (AWTS), which can adjust the folding or bending radii for the whole sample folding or bending operation. During the whole-folding test of the flexible display, the flexible display requires the corresponding rotation angle of the flexible display in different sizes to perform the optical inspection in the vertical normal direction. According to the optical image measurement of flexible displays based on different sizes on the AWTS, this study

uses ODS for orthogonal alignment, and automatically aligns the flexible display to the center of the display surface by using a neural network vision alignment algorithm for automatic optical inspection. Finally, this study uses a neural network to control the ODS of four degrees of freedom, and the maximum control error percentage is 2%. In addition, this study measures the optical characteristics of the flexible cholesteric liquid crystal display for a whole-folding test. As a result, it is found that the attenuation optical characteristics increased as the number of folds increased, and the maximum attenuation percentage of the optical gray value in some local areas after the whole-folding test is 10%. Therefore, based on the measurement results of this study and the neural network vision alignment algorithm created by this study, the automatic optical inspection method is suitable for evaluating the performance of flexible displays based on whole-folding tests to provide the improved flexible characteristics of flexible displays.

一、前言

根據顯示技術的發展與市場摺疊手機的販賣，具有摺疊特性的軟性顯示器已逐漸成為下一代顯示器的趨勢。由於其可彎曲和摺疊的特性，它可以實現剛性的顯示器無法實現的目標，然後發展成為各種產品，例如可穿戴設備、便攜式摺疊式螢幕，甚至用於照明設備與技術。因此，目前各大研究單位與顯示器大廠，都如火如荼地在研究和討論軟性顯示器的摺疊特性及其產品壽命時，通過重複摺疊動作來測試顯示器的特性變化是一種相對直觀和參考的方法。觀察摺疊測試後變化的常用方法有兩種：一種是在顯示器上測量簡單電路的電阻，摺疊前後的電阻變化值定義了軟性顯示器的損耗。另一種是以量測軟性顯示器的顯示影像，並對影像進行光學分析，以解釋軟性顯示器的衰減特性。自動光學檢測是一種利用機械視覺做為檢測標準的技術，以改良傳統以人力操作光學儀器進行檢測的缺點，有自動化、高精度、高效率、即時、非接觸檢測等優點特性。通常光學檢測是以光學儀器獲得被檢測物的光學特性狀態，之後以電腦軟體的影像處理技術對被檢測物的影像進行分析後檢測出被檢測物的瑕疵或損耗。因此，光學檢測對於軟性顯示器的摺疊破壞是非常適合的量測方法。根據許多軟性電子或顯示器測試平台的文獻，由於機構的結構，系統只能執行局部徑向彎曲或有限的彎曲角度，從而導致較差的彎曲或折疊效果⁽¹⁻⁵⁾。例如有上述文獻藉由大小不同半徑的滾子設計一滾子型測試機構，但此設計對於全面性的摺疊特性檢測能力較差，而滾子與軟性顯示器間的摩擦力亦會使軟性顯示器造成額外的傷害，對摺疊特性的檢測會造成額外的誤差。甚至上述有些文獻的彎曲測試設計，在彎曲或摺疊測試前必須有一個初始曲率半徑，使軟性顯示器可能在夾持動作時不小心損壞或是在初始彎曲半徑下就造成軟性顯示器的毀壞。此外，在上述設計中，只能測試樣品的一部分區域，因此它們不適用於整個樣品的軟韌性或可摺疊性測試。所以本文提出了一種自動全面性摺疊測試系統 (automatic whole-folding testing system, AWTS)，可以為整個樣本的摺疊和彎曲操作調整摺疊或彎曲半徑。對於軟性顯示器測試，對所測試的軟性顯示器的顯示影像進行光學分析也是重要的檢測方法。為了光學檢測軟性顯示器的耐用性，本研究創建了一個基於類神經網路作為對準控制算法的自動光學檢測系統 (optical detection system, ODS)。最後，本研究利用類神經網路視覺對位演算法來控制四個自由度之影像擷取平台。最終，本研究還完成測量了可撓性膽固醇液晶顯示器 (cholesteric liquid crystal display, ChLCD) 的整體摺疊性能。因此，根據量測結果和本研究所創建的類神經網路視覺對位演算法之自動光學檢測方法，其適用於基於全面性摺疊測試來評估軟性顯示器的性能，以提供其製程改善依據。

二、全面摺疊測試系統

AWTS 包括一個螺桿式機構、在螺桿式機構上移動平台與一個固定平台，該螺桿式機構使用螺桿控制移動平台的來回運動。並且在移動平台與固定平台上，都具有一個夾持試片機構。執行全面摺疊測試時，首先將軟性測試試片緊緊地放在兩端夾持試片機構上，如圖 1 所示。其中，由於每次軟性待測試片的尺寸大小與測試之全面性摺疊測試的摺疊半徑都在不同條件狀態下，試片的初始試片平面外法向量 (out-of-plane normal) 會與 AWTS 的移動平台之夾持式片機構產生一個逆時鐘的角度。

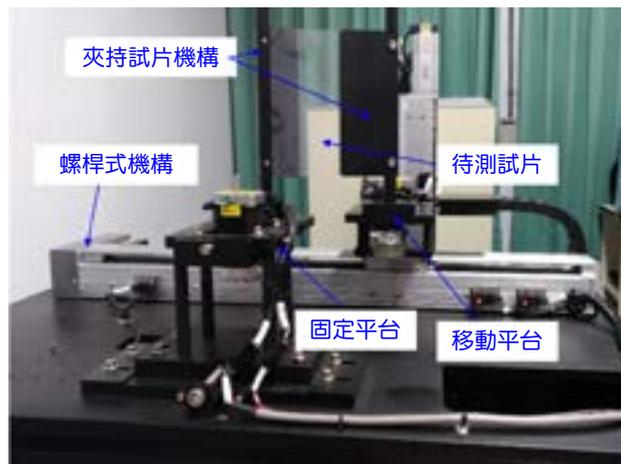


圖 1. AWTS 上軟性測試試片的初始平坦狀態。

其次，透過馬達驅動螺桿式機構將移動平台往固定平台方向移動，同時固定與移動平台之試片隨著旋轉馬達的推壓並被迫緩慢拱起，同步旋轉移動平台慢慢形成固定與移動平台上之夾持試片形成平行狀態。當移動與固定平台在最小距離時，其之間的距離即是軟性測試試片的摺疊半徑。接著，馬達繼續驅動移動平台繼續往前移動，致使軟性測試試片緩慢拉開直至完全壓平，以完成整個全面性摺疊過程的一半。最後，馬達反向驅動旋轉，使移動平台向後移動，將樣品摺回到其原始位置，從而完成整個摺疊過程。圖 2 展示了 AWTS 如何以 20 mm 的摺疊半徑完成整個摺疊過程。

根據 AWTS 的作動機制可知，摺疊測試試片在平坦狀態時，其試片大小與摺疊半徑會使得馬達驅動螺桿式機構致使移動平台移動的距離與固定和移動平台之旋轉馬達的旋轉角度會有所不同。因此，本研究也透過貝氏類神經演算法，在試片寬度在 10–15 公分之間下，可以依造摺疊半徑於 0.3–1.5 公分之設定下，完成控制試片之全面性摺疊測試，並利用 LabVIEW 軟體完成其程式人機介面建立⁽⁶⁾，如圖 3 所示。在此程式中，使用者只要輸入摺疊半徑 (綠區)、摺疊次數 (藍區)、摺疊速度 (藍區)，甚至可以設定一次摺疊下之停止時間 (藍區)，即可以完成摺疊測試設定。除此之外，AWTS 於其夾持試片機構上設計了四點探針阻值量測電極，可以在摺疊測試的同時量測待測試片的阻值變化⁽⁶⁾，如圖 4 所示。而程式人機介面之自動阻值變化量測設定，如圖 3 之紅色區域。

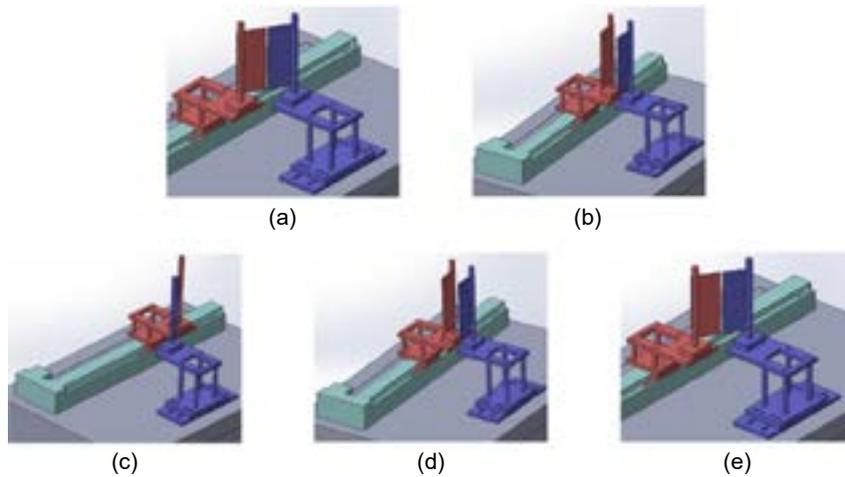


圖 2. AWTS 在一個完整全面性摺疊週期內依次 (a)、(b)、(c)、(d) 和 (e) 的步驟完成 20 mm 的摺疊半徑測試。並且當 AWTS 在 (b) 與 (d) 時，將會造成試片呈現 20 mm 的摺疊半徑彎曲。

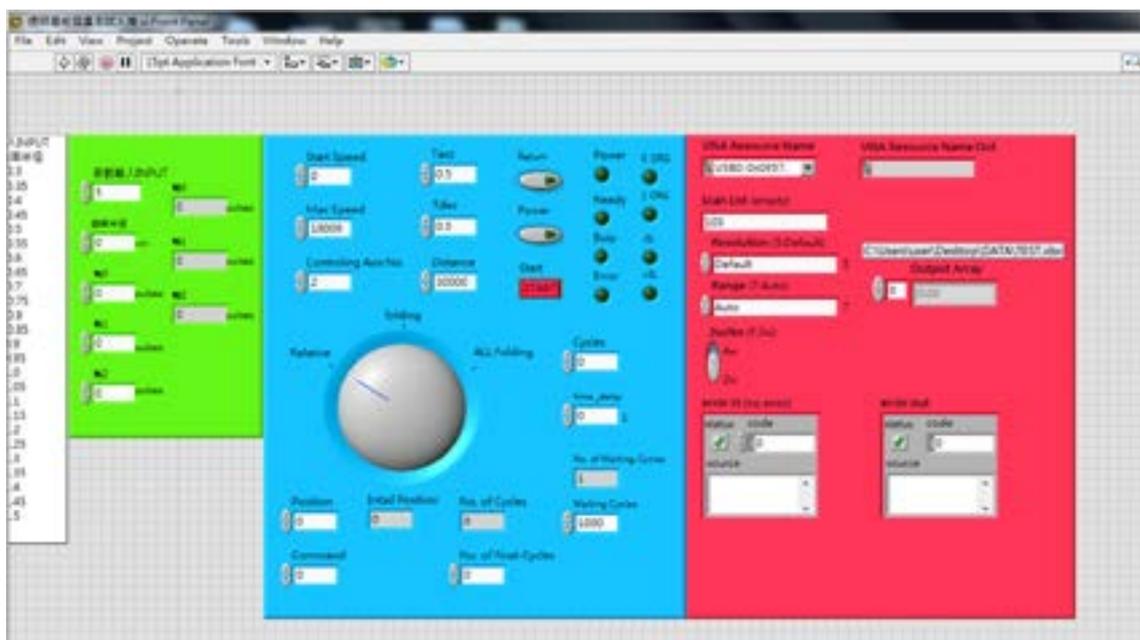


圖 3. AWTS 程式人機介面。

三、類神經網路視覺對位

為了光學檢測軟性顯示器的耐用性，本研究創建了一個 ODS，它包括一個 XYZ 平台，一個帶旋轉平台的感光耦合元件 (charge-coupled device, CCD) 攝影機以及一個四個自由度影像擷取平台上的光源，如圖 5 所示。其中光源的目的是當檢測待測軟性試片為一反射式顯示器，例如可撓性膽固醇液晶顯示器等，此時光源的穩定性與照射均勻性就是一個重要的顯示品質關鍵。因此，對於本研究的光源之穩定性與均勻性，本研究採用一張顏色為灰色的紙張

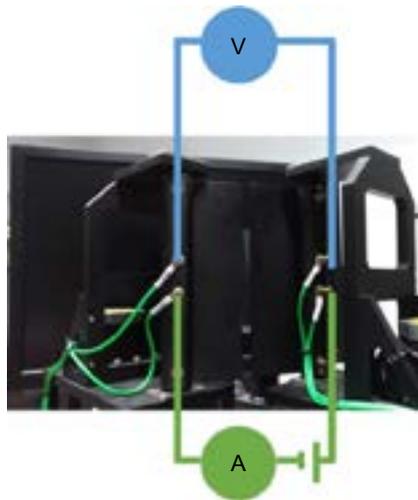


圖 4. AWTS 夾持試片機構之四點探針阻值量測電極原理。

架設於 AWTS 上，以 ODS 之 CCD 在對準於紙張的法線方向上，透過在歷經時間從 0 分鐘至 50 分鐘之間下每五分鐘擷取的 11 張影像，並且擷取影像中之 9 宮格的 9 個 150 pixels × 150 pixels 的範圍並對其中的灰階值做觀察。由實驗結果可以觀察出，各個範圍的灰階值在時間遞增下變化非常小，標準差皆不超過 1 a.u.⁽⁷⁾。因此，可以證明本研究採用之光源的穩定性佳。除此之外，從 9 個影像取像量測結果中可知，各範圍的灰階值平均值為 115 a.u.，而灰階值標準差約為 6.8 a.u.⁽⁷⁾，在可以接受的範圍之內，證明此光源的均勻性佳。

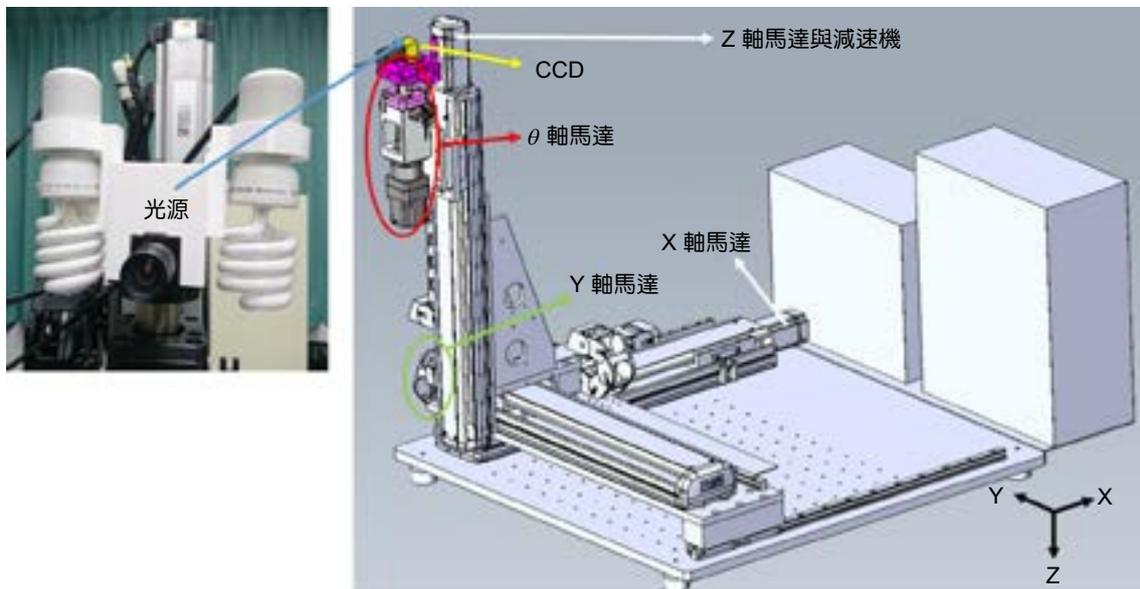


圖 5. ODS 的示意圖。

由於 AWTS 的作動機制，摺疊測試試片在平坦狀態時，其試片大小與摺疊半徑會使得馬達驅動螺桿式機構造成移動平台移動的距離與固定和移動平台之旋轉馬達的旋轉角度會有所不同。導致 AWTS 上的軟性待測試片會有試片的初始試片平面外法向量會與 AWTS 的移

動平台之夾持式片機構產生一個逆時鐘的角度，以致形成初始軟性待測試片平面外法向量不會垂直於 ODS 的 CCD 測量軸的方向，且依據每次待測試片的大小與摺疊半徑的設定不同下，逆時鐘的角度都會不同。因此，待測軟性顯示器在 AWTS 的全面性摺疊測試期間，軟性顯示器的不同尺寸與不同的摺疊測試半徑下，需要 ODS 的 CCD 相對試片之逆時鐘的角度做正交對位與對焦以進行光學檢測。因此，本研究為了因應軟性顯示器在 AWTS 上於不同尺寸與不同的摺疊測試半徑下產生不同逆時鐘的角度，於軟性顯示器之夾持試片機構上黏貼定位點，在執行全面摺疊之軟性顯示器的光學擷取影像同時擷取軟性顯示器夾持試片機構上黏貼定位點的影像，並取得坐標作為影像反饋的輸入值，如圖 6 所示。在圖 6 中，為了取得這四個定位點之座標資訊，本研究在一開始軟性測試試片並未正交於 ODS 之 CCD 時，拍攝了一張影像，並採用了影像處理的影像切割、影像灰階、影像 Sobel 邊界對比增加⁽⁸⁾、影像 Otsu's law 二質化⁽⁹⁾與影像形態學⁽¹⁰⁾，最終可以得到四個定位點之座標資訊 (x, y) ⁽⁷⁾。接著再以四個定位點之 x_1, x_2, x_3, x_4 與 y_1, y_2, y_3, y_4 ，共 8 個值，作為貝氏類神經網路演算法的輸入資料。而 X, Y, Z, θ 分別代表 ODS 之 CCD 為了對位於待測軟性顯示器之 X, Y, Z, θ 四個軸的移動或轉動需求，作為貝氏類神經網路演算法的輸出目標資料，以完成監督式貝氏類神經網路模型建立⁽⁷⁾。最終，讓 ODS 之 CCD 透過初始四個定位點之座標資訊，使用貝氏類神經網路視覺對準算法，使得從 ODS 自初始位置，移動 ODS 使得 CCD 測量軸與 AWTS 上的軟性測試樣品垂直，並且軟性待測物的顯示中心與 CCD 之間的距離為 550 mm，如圖 7 所示。其中，圖 7 中 $\angle 1$ 為初始逆時鐘的角度，而透過 CCD 拍攝的一張軟性測試試片並未正交於 ODS 之 CCD 的照片後，利用影像處理與貝氏類神經網路演算法後，CCD 首先轉了一個 $\angle 2$ ，致使軟性測試試片與 ODS 之 CCD 呈現正交。接著，依據貝氏類神經網路演算法控制 ODS 之 CCD 的 X, Y 與 Z ，來達到軟性測試試片與 ODS 之 CCD 呈現距離為 550 mm 的光學量測距離。關於 ODS 的影像處理與 CCD 對位控制，最終都利用 LabVIEW 軟體完成程式人機介面建立⁽⁷⁾，如圖 8 所示。其中，透過人機介面，可以依序先針對四個定位點之座標資訊拍照與影像處理，接著即可以透過貝氏類神經網路演算法控制 ODS 之 CCD 的 X, Y, Z 與 θ ，來完成 CCD 與待測軟性顯示器的對位控制。當然 ODS 的 X, Y, Z 與 θ 之位移與角度的速度與加速度，也都可以於程式中設定好。



圖 6. AWTS 之夾持試片機構之四個黃色定位點。

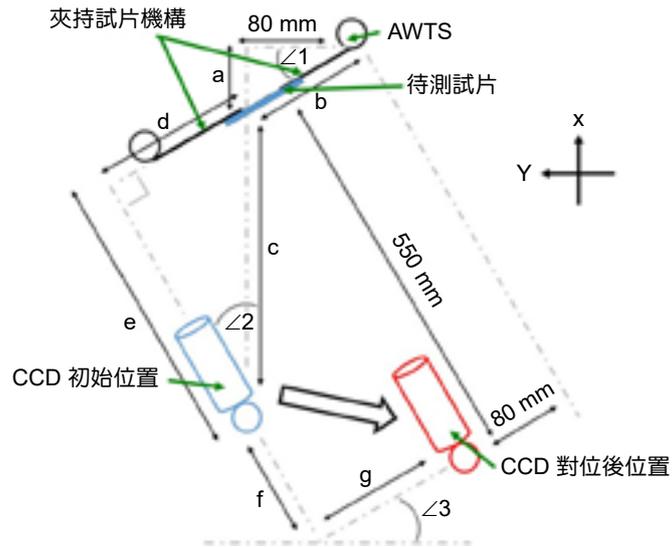


圖 7. AWTS 上的軟性測試樣品垂直於 ODS 之 CCD 測量軸的方向並且軟性待測物的顯示中心與 CCD 之間的距離為 550 mm 之示意圖。



圖 8. ODS 程式人機介面。

四、實驗結果

本研究利用 AWTS 上夾持 10 種不同寬度尺寸 (10–15 公分) 之軟性待測試片，再利用以監督式貝氏類神經網路模型控制 ODS，完成軟性測試樣品垂直於 ODS 之 CCD 測量軸的方向並且軟性待測物的顯示中心與 CCD 之間的距離為 550 mm。最終，最大控制誤差百分比為 2% (軟性待測物的顯示中心與 CCD 的量測軸準直且之間的距離為 550 mm 時，夾持試片機構上四個定位點之 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 與 y_1 、 y_2 、 y_3 、 y_4 和監督式貝氏類神經網路模型

控制 ODS 後之定位點誤差)⁽⁷⁾。除此之外，本研究利用 AWTS 與 ODS 來針對 ChLCD，完成 11,000 次全面性摺疊測試的光學量測與分析 (圖 9) (表 1)。ChLCD 是一種反射式的軟性顯示器，此類液晶具在自然情況下有兩種穩態特性。其中一個狀態為平面穩態狀態 (planar stable state)，此狀態下液晶分子排列非常整齊所以可以針對特定波長來反射光線，因此稱之為亮態；另一種狀態為聚焦圓錐穩態狀態 (focal conic stable state)，在此狀態下液晶分子排列混雜凌亂，將會造成入射光呈現散射，引此稱為暗態；此外還包含一種稱為垂直狀態 (homeotropic state) 的暫時狀態，此時的液晶分子呈全部垂直的狀態，因此不反射光線而可以穿透到液晶層之下一層的吸收光物質。但是，此狀態是屬於很短時間的暫態狀態，並不容易觀察的到。ChLCD 中的液晶分子透過改變電場，將可以在這三種狀態下改變，由於狀態改變反射出的光線也會改變，因此可以讓使用者看到不同的影像⁽¹¹⁾。另外 ChLCD 也會遵守布拉格定律 (Bragg's law)，透過調整液晶的旋距，搭配底層塗上的顏色吸收層，可以由布拉格反射定律中的建設性干涉現象，製作包含雙色的 ChLCD 面板。而 ChLCD 本身就是反射性顯示器，所以不需要一般顯示器的背光模組，甚至在強光下依然可以清楚的辨識畫面⁽¹²⁾。而本研究採用的 ChLCD 是由台灣工業技術研究院所提供，以聚對苯二甲酸乙二酯 (polyethylene terephthalate) 材質作為顯示器基板，在其上分別以透明氧化銦錫導電層 (indium tin oxide)、微細胞化膽固醇液晶層、黑色吸收光層、上板導電層的順序向上堆疊製作，其中微細胞化液晶的直徑大小約為 10 μm 。這類 ChLCD 軟性顯示器雖然需要利用較高的外加電場電壓來轉變顯示穩定態，且兩個穩定態的轉變之反應速度不快之下，作為電子紙、電子標籤與看板等應用是足夠的。其中，相關連續式捲對捲方式 (roll-to-roll) 製程與專利技術由美國柯達公司 (Kodak) 開發，並於 2007 年技術轉移給工業技術研究院⁽¹¹⁾。

在圖 9 中，本研究擷取四個量測區域 (region of interest, ROI)，並分別在摺疊前、摺疊 2,000、4,000、6,000、8,000 與 11,000 後，AWTS 會讓 ChLCD 在平整狀態下停留 5 秒，此時以 ODS 連續取得其光學灰度值，其量測平均數據如表一所示。根據表一中的測量結果，可以發現衰減光學灰度值特性隨著摺疊次數的增加而增加，最終在 11,000 次全面摺疊測試後，其中 ROI 2 之光學灰度值衰減百分比為量測四個區域中的最大，並達到 10%。因此，根據量測結果和本研究所創建的類神經網路視覺對位演算法之自動光學檢測方法，其適用於基於全面性摺疊測試來評估軟性顯示器的性能，以提供其製程改善依據。



圖 9. ChLCD 的圖像測量區域。

表 1. 11,000 次全面性摺疊測試的 ChLCD 之光學灰度值測量結果。

全面性摺疊 次數	ROI 1 (a.u.)	ROI 2 (a.u.)	ROI 3 (a.u.)	ROI 4 (a.u.)
0	203	197	200	204
2000	200	193	198	200
4000	198	189	193	197
6000	195	185	189	196
8000	190	181	185	195
11000	185	177	183	196
衰減比率 (%)	8.9	10	8.5	3.9

五、結論

本文成功地提出了一種基於類神經網路視覺對位演算法於 AWTS 和 ODS 量測系統，來針對軟性顯示器的光學特性做檢測。由實驗結果可知，本研究使用貝氏類神經網路演算法來控制四個自由度的影像量測 ODS 平台，其最大控制誤差百分比為 2%。此外，本研究也完成針對 ChLCD 軟性顯示器，在 11,000 次全面性摺疊測試下之光學特性檢測。由測試結果可以得到，ChLCD 軟性顯示器的部分區域之灰度值的最大衰減百分比為 10%。因此，根據本研究之量測結果和提出之基於類神經網路視覺對位演算法的自動光學檢測方法，其適用於基於全面性摺疊測試來評估軟性顯示器的性能，以提供改善軟性顯示器的軟性特性。對於未來軟性顯示器的摺疊特性及其產品壽命分析，本研究結果將是可以當作一個很好的參考文獻與測試工具的提供。

誌謝

此研究工作感謝科技部「利用自動化影像相位延遲檢測技術於軟性透明導電基板全面性摺疊測試之應力集中與電性分佈分析研究 (MOST 104-2218-E-019-002)」以及「軟性透明導電基板全面性摺疊測試之自動化影像式殘留摺疊、熱應力和電性特性量測與分析研究 (MOST 105-2221-E-019-029)」的研究經費補助。也感謝工業技術研究院之軟性膽固醇顯示器的提供，使得本研究順利完成。

參考文獻

1. Lewis J, et al., *Applied Physics Letters*, **85**, 3450 (2004).
2. Lewis J, et al., *Materials Research Society Symposium Proceedings*, **814**, 18.5 (2004).
3. Bor-Jiunn Wen, et al., *Displays*, **32**, 296 (2011).
4. Søndergaard RR, et al. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, **51** (1), 16 (2013).
5. Bor-Jiunn Wen, et al., *Control Engineering Practice*, **21**, 593 (2013).
6. 曾亭瑜, 軟性透明導電基板之全面性摺疊測試研究, 國立臺灣海洋大學碩士論文, (2018).
7. 洪品軒, 軟性顯示器摺疊測試的光學檢測之類神經網路視覺自動對位研究, 國立臺灣海洋大學碩士論文, (2018).
8. Sobel I, *Computer Graphics and Image Processing*, **8**, 127 (1978).
9. N. Otsu, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, **9** (1), 62 (1979).

10. R.C. Gonzalez, et al., Digital Image Processing, Prentice Hall, (2002).

11. 胥智文, 科學月刊, **482**, (2010)。

12. 顏擎, 膽固醇均勻橫向螺旋態中配向角相依之光軸偏離角, 國立陽明交通大學碩士論文, (2019).

作者簡介

溫博浚先生為國立交通大學機械工程學系博士，現為國立台灣海洋大學機械與機電工程學系副教授。

Bor-Jiunn Wen received his Ph.D. in Mechanical Engineering from National Chiao Tung University in Taiwan. He is currently an associate professor of Department of Mechanical and Mechatronic Engineering at National Taiwan Ocean University in Taiwan.

洪品軒先生為國立台灣海洋大學機械與機電工程學系碩士，現為緯創資通股份有限公司工程師。

Mr. Pin-Hsuan Hung received his M.S. from Department of Mechanical and Mechatronic Engineering at National Taiwan Ocean University in Taiwan. He is currently an engineer of WISTRON CORPORATION in Taiwan.

曾亭瑜先生為國立台灣海洋大學機械與機電工程學系碩士，現為精材科技股份有限公司工程師。

Mr. Ting-Yu Tseng received his M.S. from Department of Mechanical and Mechatronic Engineering at National Taiwan Ocean University in Taiwan. He is currently an engineer of Xintec Inc. in Taiwan.

塑膠循環經濟下聚氨酯化學回收技術的發展

The Development of Polyurethane Chemical Recycling Technology under Plastic Circular Economy

芮嘉瑋

Chia-Wei Jui

聚氨酯 (polyurethane, PU) 的用途與日俱增，其產生的廢棄物處理問題亦日形重要。基於循環經濟所指的「循環」，係以可被回收且再利用的方式開發可持續性的 PU 塑料較佳使用一種化學再循環方法。本文除了介紹 PU 主要的化學回收傳統技術 (水解法、醇解法、胺解法、磷酸酯法及酸解法) 外，為了掌握最新 PU 化學回收的產業技術現況與發展，亦就近期國內外開發具競爭力的 PU 新型化學回收技術，分享其化學回收技術上的突破。

The use of polyurethane (PU) is increasing day by day, and the waste disposal problems it generates are also becoming increasingly important. Based on the "circulation" referred to by the circular economy, it is preferable to use a chemical recycling method to develop sustainable PU plastics in a way that can be recycled and reused. In addition to introducing PU's main chemical recycling traditional technologies (hydrolysis, glycolysis, aminolysis, phosphate esters and acid hydrolysis), this article also shares recent breakthroughs in the development of competitive PU new chemical recycling technologies at home and abroad to grasp the current status and development of the latest PU chemical recycling industry technologies.

一、前言

工業革命以來，為了追求更好的物質生活，人們一直採用線性的生產消費模式，大量生產、大量消費、再大量廢棄，導致環境被汙染、能源逐漸枯竭。在氣候變遷、自然生態惡化、大量廢棄物、原物料需求與開採成本持續攀升等各種問題下，資源從開採、製造、使用到廢棄，呈現以生產、使用、丟棄處置為基礎之一條直線的「線性經濟」(linear economy)，並未對資源進行再利用或再生，造成資源衰竭降低了傳統製造業的競爭力⁽¹⁾。

隨著永續發展、環保意識抬頭以及新興市場急速的膨脹，促使全球由過去線性經濟演進到循環經濟 (circular economy)⁽²⁾，如圖 1 所示，從線性模型轉變為提供「資源再利用」的閉環 (closed loop) 模型，目的是減少浪費和自然資源的使用⁽³⁾。



圖 1. 循環經濟的演進。(Source：台綜院)

循環經濟 (circular economy) 的概念已被喚起且在國際間不斷地被宣揚。「循環經濟」最早由英國經濟學家 K. E. Boulding 於 1966 年提出⁽⁴⁾，強調人類因追求經濟發展而大量開採自然資源與排放汙染廢棄物，有朝一日地球恐因資源耗盡而致毀滅，為使地球持續存在唯一的方式，就是將這些汙染及廢棄物轉換成可再資源。這概念等同於必須不斷重複利用自己有限的資源，透過持續的內部資源循環自給自足延長壽命才能生存下去。1990 年英國學者 Pearce & Turner 也提出「循環經濟」的概念⁽⁵⁾，明確說明傳統開放式經濟並沒有納入回收的概念，反觀，循環經濟則嘗試依據永續發展的原則建立資源管理架構，使經濟系統成為生態系統的組成部分，用以創造出經濟與環境和諧共存的理想境地。致力推廣循環經濟概念的英國艾倫·麥克阿瑟基金會於 2012 年發布的《邁向循環經濟》報告⁽⁶⁾中也指出，「循環經濟」是透過設計具備可恢復性及再生性的產業系統，以循環再生取代生命週期結束的概念，重新定義產品和服務；同時最大程度地減少廢棄物對環境帶來的負面影響。圖 2 顯示艾倫·麥克阿瑟基金會將循環體系分成工業和生物兩大類。其中，工業循環依據 Govindan 和 Hasanagic 的觀點⁽⁷⁾，將原有的線性模式加上 3R (reduce、reuse、recycle) 之外，再加上另一個 3R (redefine、redesign 和 remodel)，讓產品盡可能以最高價值的方式保留在循環系統中重複使用，不會造成資源浪費；生物循環則是倡導資源在自然界中流動，由生質材料所製成之產品經過使用後，不可回收再應用的資源可再回歸到大自然成為生物養分，回歸土壤，有助於農林漁牧業之發展。

在傳統線性經濟 (linear economy) 模式中，「資源」屬於消耗材，並沒有對資源進行再利用或再生的政策，造成資源價值的浪費。但在循環經濟 (circular economy) 的概念下，資源利用率被重新思考，未來產業的理想境界將不會有真正的廢棄物，因為原先產業的廢棄物



圖 2. 循環經濟系統圖⁽⁸⁾。(Source：塑膠中心)

可能會變成新興產業的能源，使資源價值最大化。循環經濟的新商業模式就是透過重新定義廢棄物、重新設計產品與製程，運用新科技讓資源、原材料與廢棄物回到產業鏈內不斷循環，大幅減少能源與資源的消耗和廢棄物的產生。因此，循環經濟在定義上是一個可恢復且可再生的產業體系，講求的是「再生恢復」，即使用可再生能源、拒絕使用妨礙再利用的有毒化學物質，並藉由重新設計材料、產品及商業模式，以消除或降低廢棄物產生，並促使資源更有效率地被利用，達到對環境的破壞降到最低，並藉由資源利用最大化，降低經濟發展所造成之社會成本，確保整體社會朝永續發展邁進⁽⁹⁾。

與循環經濟主題相關聯之材料中，塑膠是現代最被廣泛使用的材料⁽¹⁰⁾。自 1964 年代以來，全球塑料產量增長了 20 倍，2014 年達到 3.11 億噸，圖 3 顯示自 1950 年至 2014 年全球塑料產量增長趨勢，預計在未來 20 年內全球塑料產量將再次翻倍，到 2050 年幾乎是兩倍成長⁽¹¹⁾。

儘管塑料的特性使其成為一種用途非常廣泛的材料，但其耐用性卻使其能夠在我們的生態系統中停留相當長的時間，這對海洋生物造成了嚴重影響。海洋受到塑料廢棄物的污染愈來愈嚴重，每年全球有 10% 的塑料污染最終排入海洋⁽¹²⁾，嚴重威脅海洋生物。塑膠製品以某種形式長期存在污染了我們的水域，成為殺死海洋野生動物的主要原因。塑膠從人類「幫手」黑化成環境「殺手」，解決因塑膠衍生的環境生態問題刻不容緩。圖 4 統計全球塑膠垃圾產生量與處理情形，儘管全球每年約可生產 3 億噸塑料並逐年有愈來愈多的趨勢，但其中僅約 9% 被回收，12% 被焚燒，有高達 79% 的塑膠垃圾在垃圾掩埋場或流入自然環境中⁽¹³⁾。如果依照目前產生塑膠廢棄物的速度，海洋中的塑膠垃圾總重將會大於所有魚類的重量⁽¹⁴⁾。

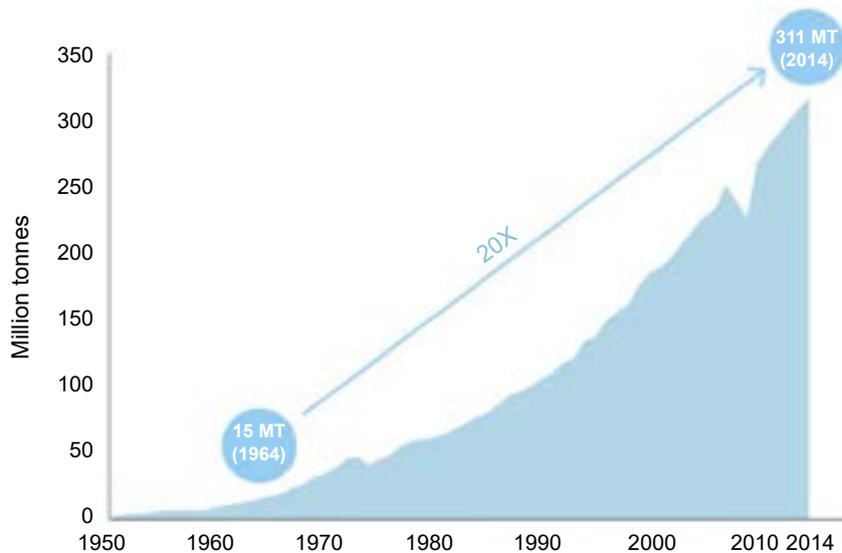


圖 3. 1950—2014 年全球塑料產量增長。(Source: PlasticsEurope)

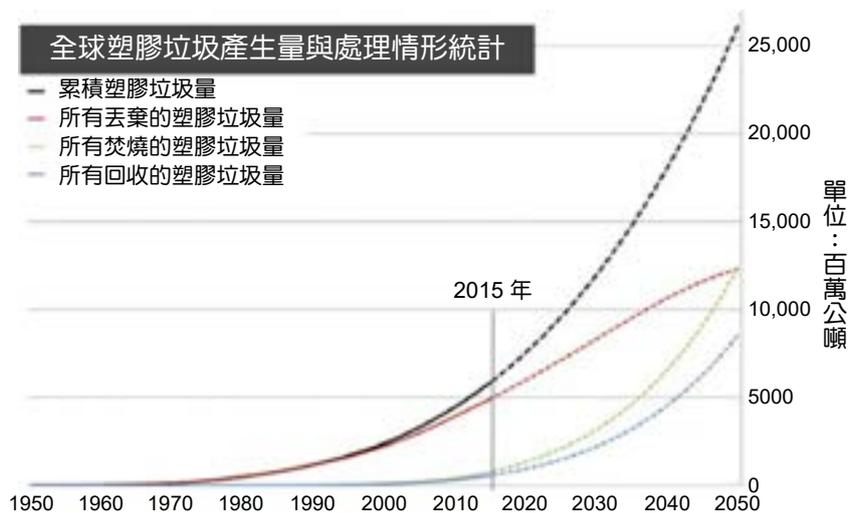


圖 4. 全球塑膠垃圾產生量與處理情形⁽¹⁵⁾。(資料來源：塑膠中心)

塑料廢物棄置多、回收少，嚴重影響全球環境生態。以歐洲為例，歐洲每年就產生了 2,580 萬噸塑料廢物，但其中只有不到 30% 的塑料廢棄物被回收利用⁽¹⁶⁾。歐洲是減塑環保政策的先行者，為了支持環保政策，歐盟在 2018 年 5 月正式宣佈將在 2030 年全面禁止一次性塑膠製品，歐洲政府並設定目標企圖以成本有效的方式對塑料進行回收再利用。聯合國環境署聯合艾倫·麥克阿瑟基金會於 2019 年 3 月與各國超過 350 家廠商聯合簽署『新塑膠經濟全球承諾』，規定在 2025 年 100% 的塑膠包裝材料需要可重複使用、可回收或可堆肥，使得塑膠循環經濟的概念在政策決策者的心中變得越來越重要⁽¹⁷⁾。因此，塑膠產業循環經濟被公認為是資源和廢棄物戰略的關鍵舉措，塑膠更是被公認為是實現循環發展的優先領域⁽¹⁸⁾。

二、塑料的回收與再生方法的演進

目前包括塑膠在內的聚合物的生產和處置是不可持續的，在過去的二十年中，解決聚合物可持續性問題的一項策略是使用可生物降解的聚合物，但這種類型的聚合物降解不會回收任何材料，不但在經濟上效率低，且最終進入垃圾填埋場造成過多的廢物和相關的環境問題。此外，絕大多數合成聚合物的設計目的是性能和耐用性，而非降解性和可回收性，在過去的幾十年中大量增加了聚合物廢棄物與環境的負荷⁽¹⁹⁾。塑膠是一種在一定溫度和壓力下可以塑製成形的合成高分子材料，具有很高的化學穩定性，埋在地下多年也不會腐爛，其耐酸、耐鹼、不腐蝕及難以分解的特性造就了塑膠廢棄物持續地在人類生存的環境中累積，形成嚴重的公害而有「白色汙染」之稱，這主要與塑膠材料的結構有關⁽²⁰⁾。由於高分子是由許多的小分子(單體)以某種方式連接起來形成的聚合物，而塑膠是高分子化合物的一種。高分子化合物有一個共同特點，即分子中的碳原子與碳原子之間多是以碳碳化學鍵連接起來而形成碳鏈，這種特殊的結構和巨大的分子量使其具有高強度、高熔點、高耐腐蝕性等優異的物理、化學和力學性能，且其分子中的碳鏈十分牢固，要削弱或打斷該鏈變成小分子(即降解)是相當困難的。

面對成長迅速的塑膠廢棄物，存在三種主要的常規方法來處理它們，包括將它們掩埋在垃圾填埋場中，進行焚化和機械回收。然而，塑膠並非是可降解的綠色聚合物，以垃圾掩埋的方式更是無法回收的。而焚燒通常會產生不安全的廢氣，並且能量回收效率很低。全球的塑料回收技術大多仍以物理方式加工塑料廢物的機械回收為主(機械回收又被稱為物理回收)。機械回收涉及自其污染物分離出聚合物及經由機械方法將其再處理成顆粒。機械回收(物理回收)雖被認為是一種臨時解決方案，涉及在熔融加工以生產新的聚合物材料之前對消費後的聚合物產品進行研磨、粉碎、洗滌、乾燥和熔化，但常因廢料中殘留的催化劑、水分和其他污染物而導致在二次熔融加工過程中性能顯著的惡化；並且有色塑膠的機械回收也會帶來其他的挑戰，例如無法去除添加劑如色料、抗氧化劑等成分，且經過多次加工再製造容易造成塑料劣化，回收後的塑料通常也只能降階使用等⁽²¹⁾。為了最大程度地減少對環境的負面影響，理想解決方案是開發一種循環經濟的方法，以可被回收且再利用的方式開發可持續性的聚合物。這種再循環策略就是所謂的化學再循環方法(chemical recycling method)，其涉及一種解聚製程(depolymerization process)，在該解聚製程中，聚合物廢物在受控的條件下解聚回到其原料中，先進行純化，然後再進行聚合，以得到純質(virgin-quality)的聚合物材料；或者是一個再利用的製程(repurposing process)，其中該聚合物廢物可被轉化為新的增值聚合物材料的組成。圖 5 呈現的就是這種再循環策略的概念，透過解聚和再利用製程對聚合物廢料進行化學回收，以塑膠的聚合物為例，就是利用化學反應方式將塑膠高分子結構裂解成單體原料的化學再循環方法⁽²²⁾。

塑料回收與再生利用的技術，從掩埋、焚燒、物理回收技術演進到了化學回收技術。最近在開發用於聚合物廢料的化學回收的再利用和解聚工藝方面的研究仍是一個新興的研究領域，面對成長迅速的塑膠使用量，全球研究人員相繼針對可循環回收再利用的議題提供技術上的解決方案，開始採用化學回收再生技術開發，使回收塑膠可轉化為更有價值的產品。

由於主導全球發泡材產量的聚合物塑料為聚氨酯(polyurethane, PU)，PU 發泡材佔整個聚合物發泡材市場的一半⁽²³⁾。有鑑於此，本文以 PU 塑料為例，分享其利用化學回收循環再利用的產業技術現況與發展。

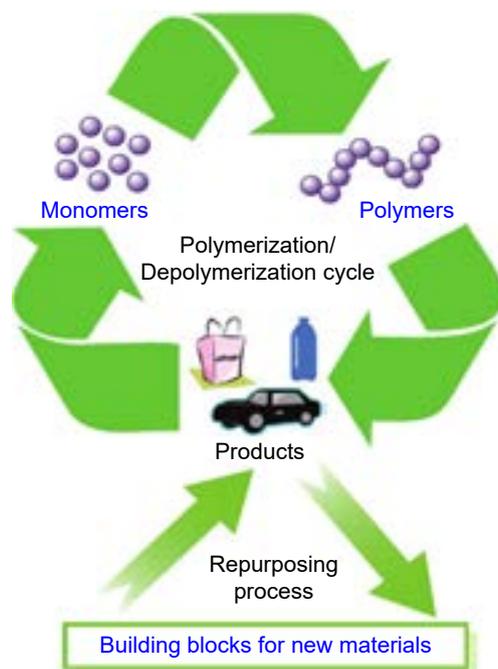


圖 5. 利用解聚與再利用製程進行聚合物廢料的化學回收。(Source : Green Chemistry, 2017)

三、PU 塑料化學回收技術

聚氨酯 (polyurethane, PU) 是透過多元醇的 OH (羥基) 基團與異氰酸酯的 NCO (異氰酸酯官能基) 基團之間的反應所形成的聚合物，其名稱係取自於所產生的氨基甲酸酯鍵結(urethane linkage)。如圖 6 所示，該反應為放熱反應，並導致氨基甲酸酯基的產生，其中 r_{iso} 係衍生自異氰酸酯單體 (isocyanate monomer)，而 r_{polyol} 係衍生自多元醇組分 (polyol component)⁽²⁴⁾。



圖 6. 反應產生氨基甲酸酯基團⁽²⁵⁾。

如今 PU 已被用作日常生活產品，且已成為不斷改變人類生活品質的重要聚合物之一，但其廢棄物的處理對環境構成挑戰。PU 的生物降解期長⁽²⁶⁾、至少高達 10 年之久，不適合使用填埋方式處理。再者，又因物理回收法適合與熱塑性聚合物一起使用，大部分 PU 屬於熱固性，使化學回收法是用於 PU 回收的最佳工藝⁽²⁷⁾。

1. PU 化學回收傳統技術

PU 的化學回收是將 PU 的氨基甲酸酯鍵和脲鍵斷鍵，使其降解為原始多元醇、芳香多元醇及芳香胺等產物，並作為 PU 發泡原料循環利用，其應用範圍比 PU 的物理回收更廣。

目前所提出的化學解鏈製成包括水解法、醇解法、胺解法、磷酸酯法及酸解法。分述如下說明：

1. 水解法 (Hydrolysis)

水解法是使用鹼金屬氫氧化物作為催化劑，將氨基甲酸酯基團 (urethane group) 與水反應 (圖 7)，並在 250–340 °C 的水氣作用下產生水解反應，從而將 PU 水解為多元醇、芳香胺及二氧化碳。該反應導致多元醇 (polyol) 和不穩定的氨基甲酸 (carbamic acid) 的形成，其在反應溫度下會脫羧並導致在生成二氧化碳的同時形成二級胺。

由於 PU 的水解通常在高於 200 °C 的溫度和高於 16 bar (230 psi) 的壓力下進行，屬於高溫、高壓下嚴苛的反應條件，芳香胺不能直接用於生產異氰酸酯，且多元醇不易純化，故此法成本高而不易在實際應用中使用。

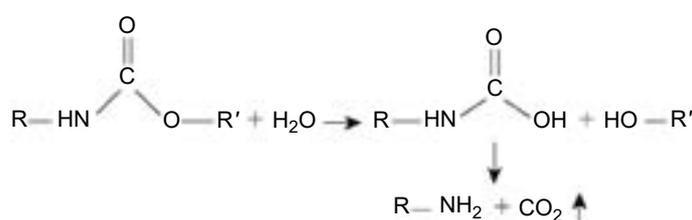


圖 7. PU 水解反應⁽²⁸⁾。

2. 醇解法 (Glycolysis)

醇解法可以在大氣壓下進行，所需的反應溫度低、反應時間短，且降解效率高，從而為目前最被廣泛使用的 PU 化學回收製程。醇解產物是原始多元醇、含異氰酸酯的多元醇和殘留的醇解劑。在催化劑和高沸點多元醇的作用下，PU 可在約 180–220 °C 降解得到高品質的多元醇，副產物為氨基甲酸酯及芳香胺 (圖 8)。

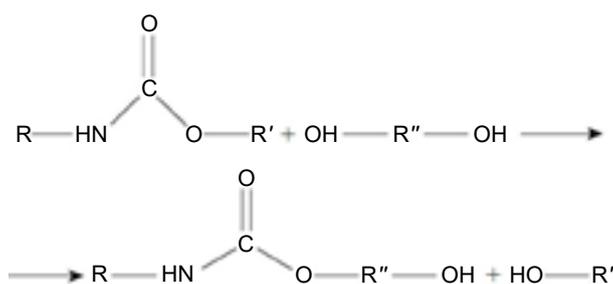


圖 8. PU 醇解反應⁽²⁹⁾。

由於醇解反應是由酯交換反應組成，其中與氨基甲酸酯的羰基 (carbonyl) 的碳相連的酯基 (ester group) 被乙二醇的羥基 (hydroxyl group) 交換。然而，PU 結構不僅由氨基甲酸酯單元形成，而且還與其他官能基如脲基 (urea) 合成。這些脲基 (urea groups) 的出現是由於在 PU 合成之氣體形成反應中形成的胺，因胺在其步驟中可以與游離異氰酸酯 (isocyanate) 反應得到脲。如圖 9 所示，脲基也易受醇解過程的影響，從而產生低重量的氨基甲酸酯 (carbamate) 和芳香胺 (aromatic amine)。

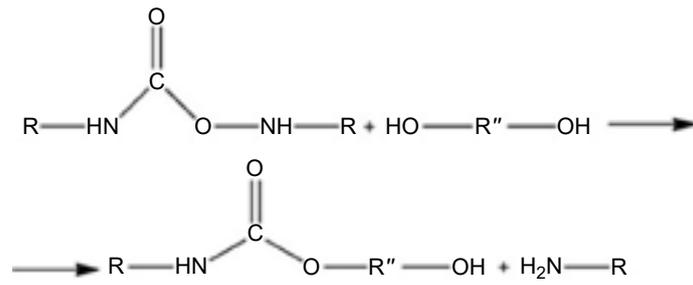


圖 9. 聚脲 (Polyurea) 醇解反應⁽³⁰⁾。

依照醇解劑的種類可進一步將其分為單層 (single-phase) 醇解法與分相 (split-phase) 醇解法。美國的 Troy Polymers 公司發展兩步驟 PU 單層醇解製程，並於 2001 年申請一種利用醇解反應化學回收包含聚氨酯廢料的方法專利⁽³¹⁾。該聚氨酯廢料，例如可從汽車碎屑殘餘物 (automotive shredder residue, ASR) 中分離出。在該方法的第一步驟中，使含聚氨酯的廢料進行化學分解反應以產生化學分解多元醇產物。在該方法的第二步驟中，將化學分解多元醇產物在與環氧烷反應中用作引發劑以生產用於製備聚氨酯的烷氧基化多元醇。該回收方法係將一部分烷氧基化多元醇產物返回並在化學分解反應中用作反應物，其中環氧烷係選自環氧丙烷以及環氧丙烷與環氧乙烷的混合物。其中每 1 當量的引發劑使至少約 1 當量的環氧烷反應。Troy Polymers 公司開發了二種規格的多元醇產品，分別為可用於高回彈性軟泡合成的 InfiGreen 320，以及可用於 PU 硬泡合成的 InfiGreen 420⁽³²⁾。

圖 10 示出了根據該發明的化學回收方法。在大氣壓下操作，以約 14 : 1 輕質 ASR : 二丙二醇的比例操作。輕質 ASR 在反應器中進行醇解過程，以產生主要為多元醇的醇解產物。過濾醇解產物並除去固體廢物。然後，在供應有加壓惰性氣體和真空的反應器中，將醇解產物用作引發劑並與環氧丙烷和/或環氧乙烷反應以製備新型多元醇。再次過濾產物並除去固體廢物。最多返回 25% 的多元醇產物，並與輕質 ASR 和二丙二醇一起用作反應物。

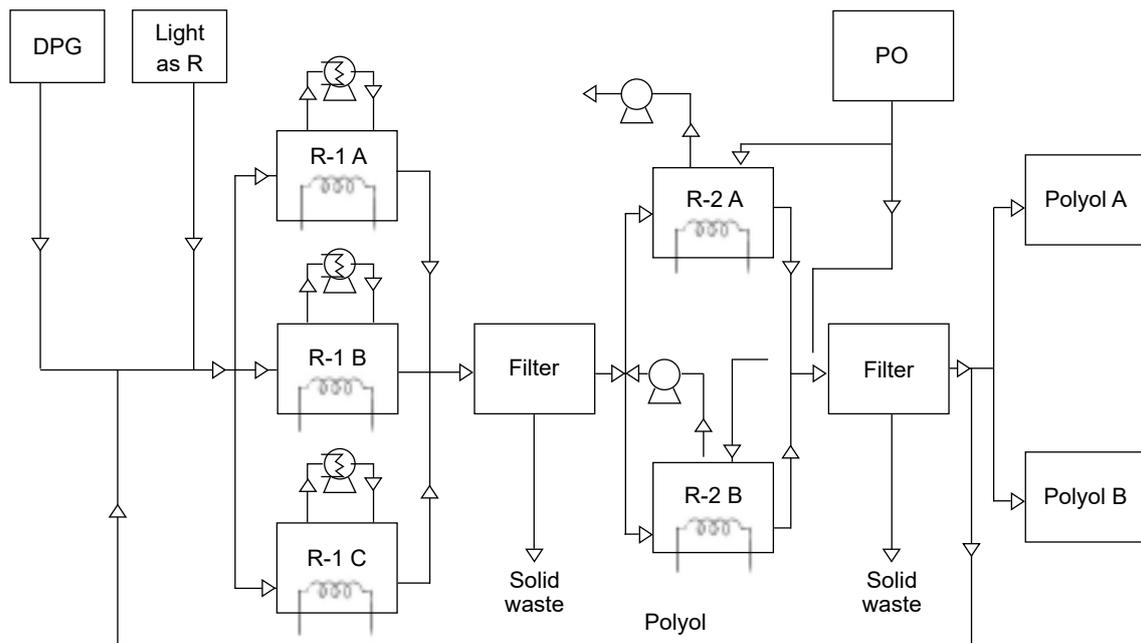


圖 10. Troy Polymers 公司化學回收含聚氨酯廢料的方法。(Source : US Patent US6750260B2)

3. 胺解 (Aminolysis)

氨基甲酸酯基團可以與胺反應形成脲素 (圖 11)。PU 在鹼金屬氫氧化物作為催化劑下，與一級胺或二級胺反應產生多元醇、胺基甲酸酯和芳香胺，而為了提升產品性能藉由加入環氧丙烷與胺反應，可產生胺基多元醇，最終分離多元醇與殘留的胺類即可回收多元醇。

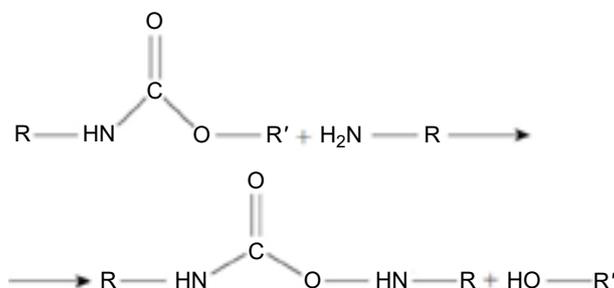


圖 11. PU 胺解反應⁽³³⁾。

4. 磷酸酯法 (Phosphate ester)

PU 在無催化劑下，與磷酸酯發生烷基反應、自由基反應和酯交換反應，最終產物為含磷化合物及含氮寡聚物，可用作非反應性添加劑以提升阻燃性能。磷酸酯法可在相對溫和的條件下使用，但產品主要是用作包裝，因使用範圍非常有限，故實際使用量也較少。

5. 酸解法 (Acidolysis)

酸解法將 PU 廢料轉化為液體，其使用解鏈劑 (通常為二元羧酸) 與氨基甲酸酯基團反應並逐漸解聚成小分子 (即二氧化碳和水等反應副產物) (圖 12)。在催化劑和二羧酸的作用下，PU 可降解得到多元醇產物及異氰酸酯衍生羧酸副產物，藉由將末端為羧基之副產物轉化為異氰酸酯衍生多元醇，或是加鹼中和羧酸並過濾出產物中的無機鹽類，即可將產物應用於 PU 再製。

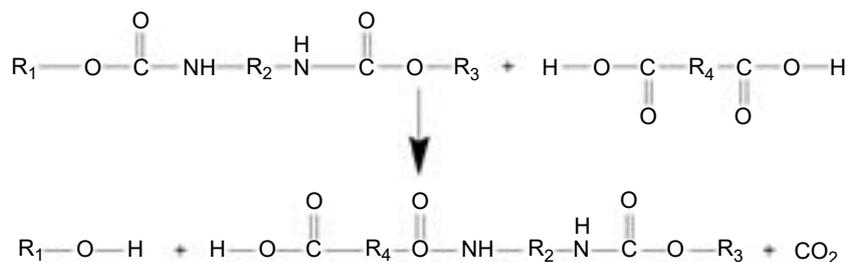


圖 12. PU 酸解反應⁽³⁴⁾。

許多二元羧酸可用於 PU 廢料的酸解，包括草酸 (oxalic acid)、丙二酸 (malonic acid)、丁二酸 (succinic acid) 或己二酸 (adipic acid)，可單獨使用或使用至少兩種的混合物，以調節優化至回收多元醇所需的特性。溫度和反應時間是重要的參數，因為它們必須保持在特定範圍內，以使所獲得的多元醇具有適合用於生產聚氨酯發泡材的特性。低溫和短反應時間會產生具有較高酸值、較低羥值、較高分子量和較高粘度的最終產物；較高的溫度和較長的反應時間將會導致多元醇具有較低的酸值、較高的羥值、較低的分子量和較低的粘度，但會使多元醇的顏色變深⁽³⁵⁾。

綜合前述 PU 化學法解鏈回收技術中，醇解法的反應條件較為溫和也可得到品質較佳的多元醇，有利於再循環利用至 PU 發泡製程，因此是目前化學回收的主流方法。水解法、胺解法和磷酸酯法則因不具經濟效益及應用範圍受限等原因而不具商業化規模。

2. PU 化學回收新技術

儘管 PU 有不少的回收方法，但因每種產品之配方皆不同，若未經分類就採用化學法進行解鏈，會得到組成複雜的產物，無法再回用至 PU 泡棉。因此目前歐美僅有中小型的回收再生廠進行 PU 發泡材的再生，以下針對國內外近期試量產的現況介紹。

1. RAMPF 的 PU 化學回收系統

德國 RAMPF 集團的營運模式為提供系統商或 PU 廠客製化的再生服務，而化學回收所得的多元醇則可再導回 PU 泡綿廠取代部分的原料進行發泡。圖 13 為德國 RAMPF 集團展示的一套小型的 PU 化學回收系統，包括了進入料控制、溫度均衡系統及反應系統。RAMPF 的回收製程是將 PUR 切成約 5 公分大小的小碎塊，再將其連續注入已含有長鏈多元醇、短鏈多元醇、羧酸、催化劑與脫胺劑的減壓反應器中，PUR 分子鏈在約 200 °C 下斷裂，持續反應約 7 小時後，多元醇與小分子氨基甲酸酯之混合物經雜質過濾後，即可得到回收多元醇產品 Recypol。Recypol 最高可取代約 60% 的聚醚多元醇原料製作半硬泡 PU，若用於製作軟硬泡 PU 則最高可取代 20% 聚醚多元醇原料⁽³⁶⁾。



圖 13. RAMPF 的 PU 化學回收系統⁽³⁷⁾。

2. 工研院開發 PU 泡綿分相醇解法回收技術

就回收的多元醇純度而言，分相醇解法比單相醇解能更有效地獲得高品質的回收產物。工研院開發 PU 泡綿分相醇解法回收技術，能製備高品質回收多元醇，並可順利回用至軟質或硬質發泡產品。PU 軟質泡綿一般原料為聚醚多元醇與甲苯二異氰酸酯 (TDI)⁽³⁸⁾。藉由醇解劑的調控與產品的純化分離，可得到 OH 值相近於原始多元醇且純度 > 90% 的回收多元醇。近期更開發出無須進行繁複純化步驟之 PU 泡綿醇解回收技術，其醇解產物不僅可全部

作為多元醇回收料並應用於 PU 再製，且具零廢棄物、產物均一性及製程簡單的優點。利用此技術回收多元醇產物羰值介於 60–80 mg KOH/g，圖 14 為不同比例的回收多元醇回用進行 PU 軟泡再製的結果，最多可取代 50% 的聚醚多元醇原料製作 PU 軟泡。

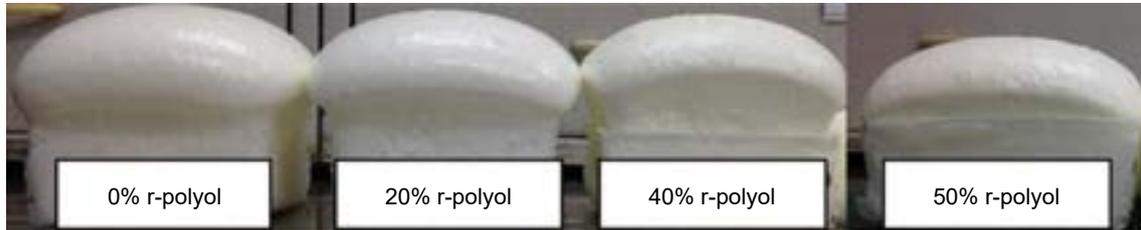


圖 14. 以 0–50% 回收多元醇進行 PU 軟泡再製⁽³⁹⁾。

3. 伊利諾大學 Steven Zimmerman 教授團隊開發 PU 廢料回收新突破

PU 是透過異氰酸酯與多元醇反應形成的聚合物，因其難以分解而具有極高的穩定性，雖在商業上得到廣泛應用，但極高的穩定性也很難對 PU 進行回收。通常多元醇是問題的關鍵，因為它們提取自石油並且不易降解。為解決這困難，近來由 Steven Zimmerman 教授領導的伊利諾大學團隊在聚氨酯廢料回收方面取得了新的突破，透過化學回收方法採用了更易於降解和水溶性的化學單元縮醛，開發了一種分解聚氨酯廢料並將其轉化為其他有用產品的方法。

該新型回收技藝的特點在於聚氨酯中加入了羥基新型縮醛作為單體之一，可在沒有水的情況下溶解聚合物。方法是在室溫下使用三氯乙酸和二氯甲烷溶解聚氨酯廢料，三氯乙酸在二氯甲烷之有機溶劑中的溶液可在短短三小時內溶解聚氨酯，且經過降解後溶解形成的降解產物可以重新用作原料的產品。由於二氯甲烷會使材料膨脹，致使酸能夠到達聚氨酯分子鏈的主鏈，從而使縮醛基團化學鍵斷裂。如圖 15 顯示可降解的聚氨酯材料 (粉紅色帶) 溶脹，然後溶於與有機溶劑混合的酸液中 (兩張照片中的左小瓶)，但置於與水混合的酸液中 (兩張照片中的右小瓶) 則不會有此現象⁽⁴⁰⁾。透過此化學方法改變多元醇的結構解決聚氨酯廢料問題，可將汽車和包裝中廣泛使用的彈性體轉化為黏合劑，且性能可與超強力膠相媲美。

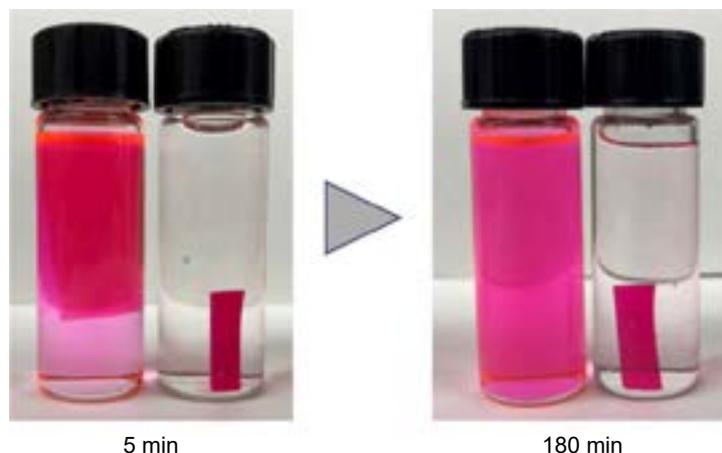


圖 15. 實驗團隊將可降解的聚氨酯材料溶脹並溶於與有機溶劑混合的酸液中。(資料來源：American Chemical Society)

然而，這種新的回收方式仍有不足之處，即用於進行反應的催化原料成本高、毒性大，團隊研究人員目前正嘗試尋找更好的方法來實現相同的降解過程，例如使用像醋這種便宜又溫和的溶劑進行降解來實現相同的過程。

四、結論

循環經濟的重點在創造價值，即「經濟」二字。PU 化學回收方法中往往因分離和純化過程成本過高而損害製程的經濟可行性⁽⁴¹⁾。PU 塑料在物理回收的經濟效益低，若要提高 PU 之回收率與經濟效益，勢必要在化學回收技術上克服現有缺點，諸如成本、溶劑的種類及濃度、觸媒配方及反應條件的控制，特別在製程成本上思考如何透過化學法確保塑料留在經濟中。為開發下一代 PU 化學回收循環再利用技藝，使其容易地降解並可再加工成新的材料，試圖將聚合物分解成最初的原材料，然後重新製作為相同的聚合物並投向市場，如此驅動循環回收創造再利用的循環經濟，不僅將循環經濟的價值創造最大化，使其在資源有限情況下減少資源的浪費，最終也能建立在物質的不斷循環利用上的經濟發展模式而回歸「經濟」二字。

參考文獻

1. Gong, Y., Putnam, E., You, W.M. & Zhao, *Journal of Cleaner Production*, **244**, 118941 (2020).
2. 陳筠淇, 王尚博, 科學發展, **543**, 6 (2018).
3. A. Bastein, E. Roelofs, E. Rietveld & A. Hoogendoorn, Opportunities for a Circular Economy in the Netherlands. TNO, Report Commissioned by the Netherlands Ministry of Infrastructure and Environment (2013), please refer to the web site: <https://www.tno.nl/media/8551/tno-circular-economy-for-ienm.pdf>
4. Kenneth E. Boulding, *The Economics of the Coming Spaceship Earth*, In: Jarrett, H., Ed., Environmental Quality in a Growing Economy, Resources for the Future/Johns Hopkins University Press, Baltimore, 3-14 (1966).
5. David W. Pearce and R. Kerry Turner, *Economics of Natural Resources and the Environment*, Johns Hopkins University Press, Baltimore (1990).
6. Ellen MacArthur Foundation, Towards the circular economy Vol, 1, *Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*, Ellen MacArthur Foundation (2012), please refer to the web site: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/down-loads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Toward-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>.
7. K. Govindan and M. Hasanagic, *International Journal of Production Research*, **56** (1-2), 278 (2018).
8. 陳婉玲, 塑膠產業循環經濟, please refer to the web site: https://www.pidc.org.tw/news_column_show.php?id=98
9. 李宗銘, 工業材料雜誌, **361**, 35 (2017)。
10. 林其瑞, 鄭承熙, 工業材料雜誌, **396**, 51 (2019)。
11. *The new plastics economy: Rethinking the future of plastics*, Chapter 1 : The Case for Rethinking Plastics, Starting with Packaging, 10 (2016).
12. Yu Gong, Ellis Putnam, Weimu You, and Changping Zhao, *Journal of Cleaner Production*, **244**, 118941 (2020).
13. R. Geyer, J. R. Jambeck and K. L. Law, *Science Advances*, **3**, e1700782 (2017).
14. Please refer to the web site: <https://www.ettoday.net/news/20190801/1503052.htm#ixzz6OvQhLgVD>
15. Please refer to the web site: https://www.pidc.org.tw/news_column_show.php?id=83
16. European Commission, A European Strategy for Plastic in a Circular Economy (2018), please refer to the web site: <http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/plastics-strategy.pdf>.
17. G. Brennan, M. Tennant and F. Blomsma, *Business and production solutions: closing the loop in H. Kopnina*, E. Shoreman Ouimet (Eds.), Sustainability: Key Issues. Earth Scan, Routledge, 219-239 (2015).
18. *Journal of Cleaner Production*, C.P., **244**, supra note 12, at 118941.
19. J. R. Jambeck, R. Geyer, C. Wilcox, T. R. Siegler, M. Perryman, A. Andrady, R. Narayan and K. L. Law, *Science*, **347**, 768 (2015).

20. 蘇明德, 科學發展, **448** · 64 (2010).
21. 林其瑞, 鄭承熙, 同註 10, 51 (2019).
22. Miao Hong and Eugene Y.-X. Chen, *Green Chemistry*, **19** (16), 3692 (2017).
23. M. Szycher, *Szycher's Handbook of Polyurethanes*, 2nd ed.; CRC Press: New York, NY, USA (2006).
24. K. Ashida, *Polyurethane and Related Foams Chemistry and Technology*; Taylor & Francis Group: Boca Raton, FL, USA (2007).
25. Ionescu, M. *Chemistry and Technology of Polyols for Polyurethanes*; Rapra Technology Limited: Shawbury, UK, ISBN 1859574912 (2005).
26. Bastian C., *A European strategy for recycling*, UTECH 94 Conference, Hague, 50 (1994).
27. Simon D, de Lucas A., Rodriguez J. F. and Borreguero A. M., *Journal of Applied Polymer Science*, **134** (32), 45087 (2017).
28. Simon D, de Lucas A., Rodriguez J. F. & Borreguero A. M., supra note 27, at 45087.
29. Simon D, de Lucas A., Rodriguez J. F. & Borreguero A. M., supra note 27, at 45087.
30. Simon D, de Lucas A., Rodriguez J. F. & Borreguero A. M., supra note 27, at 45087.
31. Vahid Sendjarevic, Troy Polymers Inc., *Process for chemical recycling of polyurethane-containing scrap*, US Patent US6750260B2 (2004).
32. Simon, D., Borreguero A.M., de Lucas A. & Rodriguez J.F., *Waste Management*, **76**, 147 (2018).
33. Simon D, de Lucas A., Rodriguez J. F. & Borreguero A. M., supra note 27, at 45087.
34. Simon D, de Lucas A., Rodriguez J. F. & Borreguero A. M., supra note 27, at 45087.
35. Nuno V. Gama, Artur Ferreira and Ana Barros-Timmons, *Materials*, **11** (10), 1841 (2018).
36. 林其瑞, 鄭承熙, 工業材料雜誌, **397**, 150 (2020)。
37. Please refer to the web site: <https://www.rampf-group.com/en/>
38. 林其瑞, 胡志明, 黃淑娟, 工業材料雜誌, **381**, 142 (2018).
39. 林其瑞, 鄭承熙, 同註 37, 頁 152.
40. Please refer to the web site: <https://www.acs.org/content/acs/en/pressroom/newsreleases/2019/august/making-polyurethane-degradable-gives-its-components-a-second-life.html>
41. Nuno V. Gama, Artur Ferreira and Ana Barros-Timmons, supra note 35, at 1841.

作者簡介

芮嘉瑋先生為國立清華大學奈米工程與微系統研究所博士，現任職於工業技術研究院技術移轉與法律中心執行長室。

Chia-Wei Jui received his Ph.D. in Institute of NanoEngineering and MicroSystems from National Tsing Hua University, now is working at General Director Office of Technology Transfer and Law Center of Industrial Technology Research Institute.

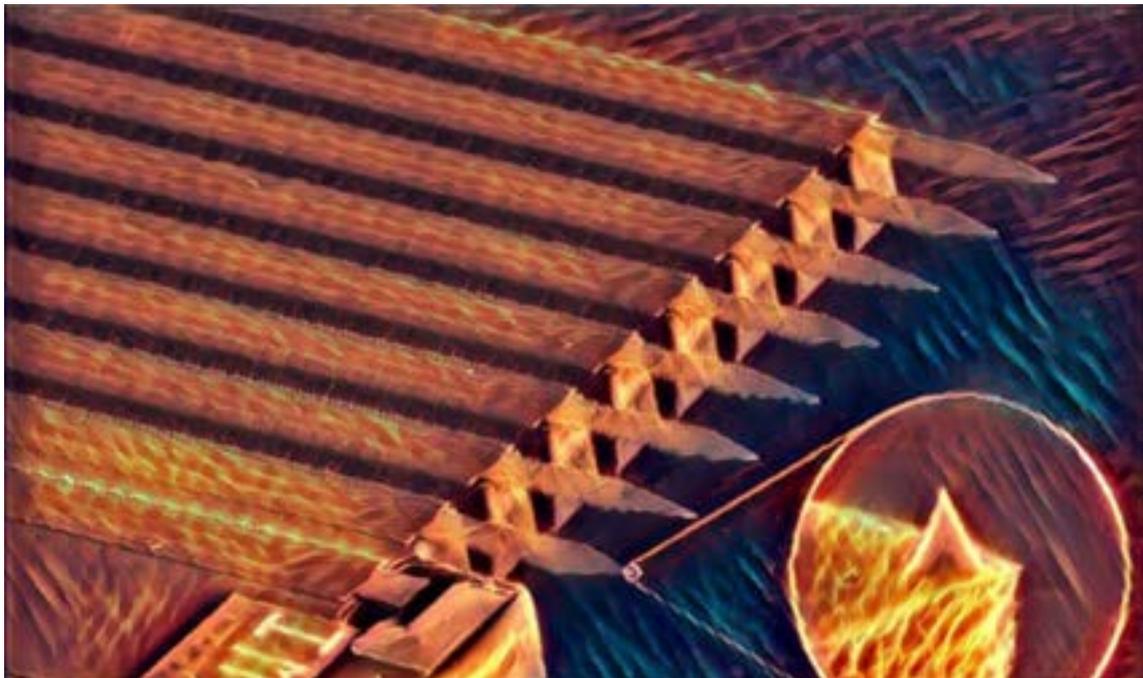
原子力顯微儀發展趨勢「精準探測」

Development Trends of Atomic Force Microscopy - Precision Detection

蘇健穎

James Su

原子力顯微儀如同儀器界的小尖兵，不論待測樣品在真空中、液體中或一般大氣中，皆能勝任超高解析掃描工作！NASA 鳳凰號 6.8 億公里航程之火星任務即搭載 AFM (原子力顯微儀) 前往探險。



原始圖請參考 NASA <https://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA11041>

鳳凰號 (Phoenix) 是美國國家航空暨太空總署 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 之火星偵察計畫而啟動的探測任務，鳳凰號經歷 10 個月飛行 6.8 億公里航程，終於抵達火星北極成功登陸。這項計畫主要目的是探測火星北極地區，搜尋適合微生物生存於火星的證據，其中最重要的是深入研究水資源的歷史軌跡。鳳凰號配備諸多科學儀器酬載，除了立體相機、氣體分析儀、電化學分析儀、導電率分析儀、雷射雷達、光學顯微鏡等儀器之外，特別配置原子力顯微儀 (atomic force microscopy, AFM)，而 AFM 成為鳳凰號火星探測器配備的主因，在於 AFM 具備原子級解析度、加上準確度高、體積小、堅固耐用、不受環境限制，即便處於極端條件下仍然可以執行操作，可以加速取得樣品超高解析三維影像及物理特性分佈情形。



圖 1. 搭載 AFM 之火星探測器 Phoenix 鳳凰號。(原始圖請參考 NASA https://www.nasa.gov/mission_pages/phoenix/images/index.html)。

AFM 是由國際商業機器公司 (International Business Machines Corporation, IBM) 蘇黎世研究中心的 Gerd Binnig (1986 諾貝爾獎得主)、Christoph Gerber 與史丹福大學的 Calvin Quate 共同發明。目的是為克服掃描穿隧顯微儀 (scanning tunneling microscope, STM) 使用電子穿隧效應無法檢測非導體的處境。原子力顯微儀巧妙運用懸臂樑探針的尖端，偵測樣品原子分子之間的作用力並經由掃描取得原子級三維影像。進一步延伸其功能，可以同步取得相對檢測位置之物理特性分佈，例如磁性、電性、力學、熱力學、光學、電化學等特性。

近年來原子力顯微儀的發展趨勢，不僅能更精準控制掃描探針的實際作用力，大幅降低至 pN 等級 (10^{-12} Newton) 的範圍，以利廣泛應用於軟性高分子光電材料及生物樣品等檢測分析，有效延長探針使用壽命並穩固前後檢測結果一致性，實屬非破壞性檢測分析技術。後續新型探針更進一步發展，其共振頻率由 kHz 提升至 MHz 等級，使得原本非常耗時的高解析度影像掃描時間大幅縮短至百分之一以內，有助於即時監控記錄樣品快速變化的過程。

國研院台灣儀器科技研究中心深耕發展原子級檢測分析技術逾 20 年歷史，並通過 ISO/IEC 17025 國際標準認證及經濟部工業局奈米標章驗證服務證書，出具公信力 ILAC-MRA 國際通行之校正報告。榮獲科技部八項台灣奈米影像競賽獎，目前已建立電學、磁學、力學與光學等超過十項檢測技術，屬於非破壞性檢測分析技術，可廣泛應用於實際製程與研發工作，提供產官學研各界技術諮詢與數據分析服務，為材料開發、表面性質研究與元件效率提昇等研發工作不可或缺的判斷依據。國研院台灣儀器科技研究中心深耕發展原子級檢測分

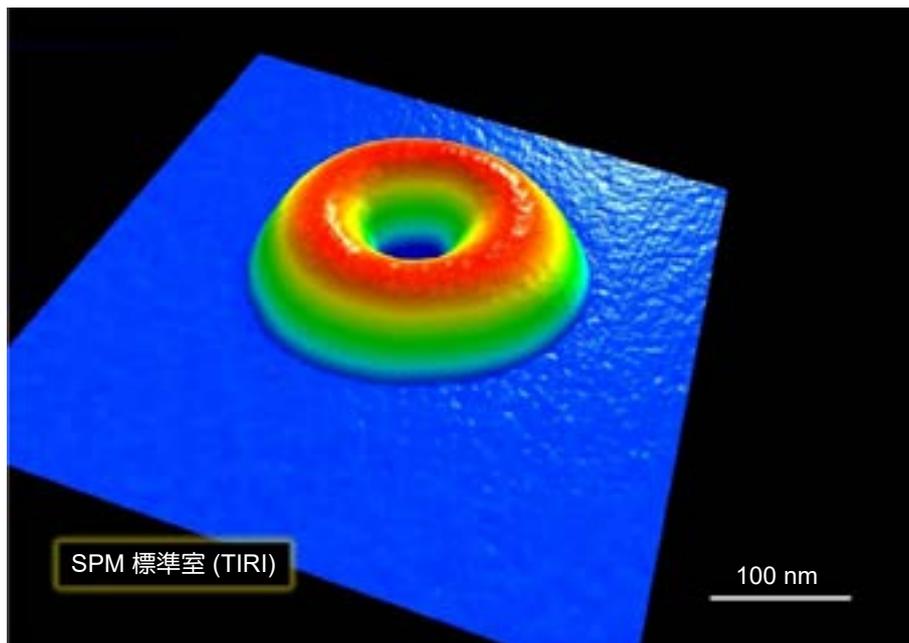


圖 2. AFM 高解析影像之微觀世界 ZnO 甜甜圈 (銀牌獎)。

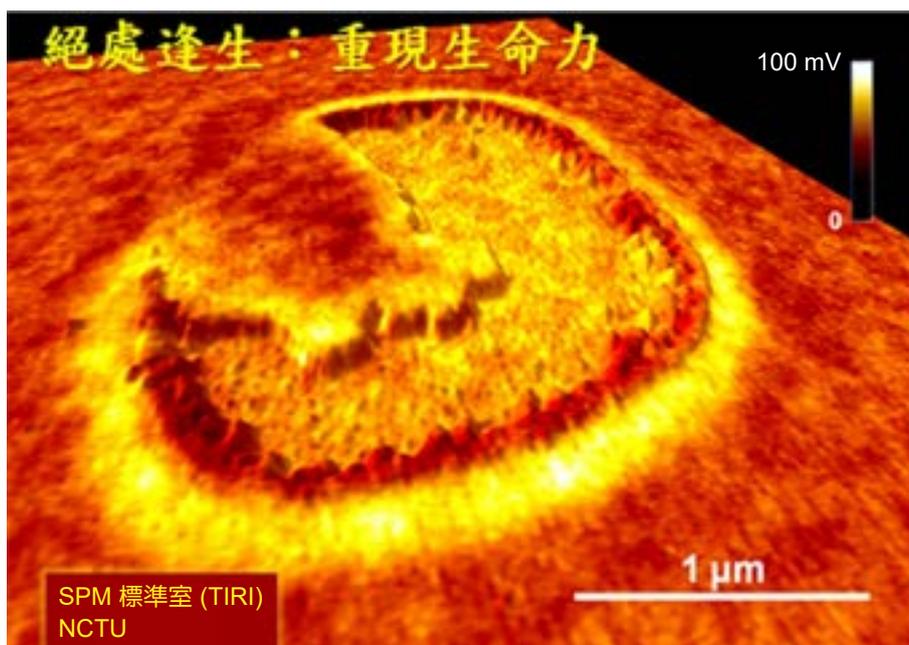


圖 3. AFM 高解析影像之表面電位顯微術 (銀牌獎)。

析技術逾 20 年歷史，並通過 ISO/ IEC 17025 國際標準認證及經濟部工業局奈米標章驗證服務證書，出具公信力 ILAC-MRA 國際通行之校正報告。榮獲科技部八項台灣奈米影像競賽獎，並榮獲第 8 及 13 屆計量科技研發創意獎。目前已建立電學、磁學、力學 與光學等超過十項檢測技術，屬於非破壞性檢測分析技術，可廣泛應用於實際製程與研發工作，提供產官學研各界技術諮詢與數據分析服務，為材料開發、表面性質研究與元件效率提昇等研發工作不可或缺的判斷依據，歡迎聯繫洽詢！(03-5779911#529 SPM 標準室)

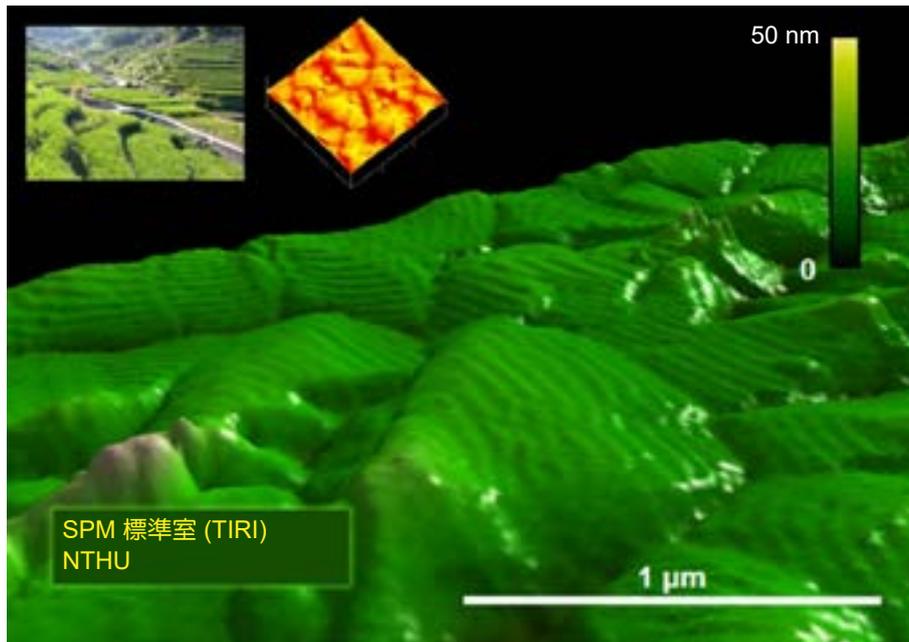


圖 4. AFM 高解析影像之五環素 (pentacene) 梯田風光 (金牌獎)。

蘇健穎先生為國立交通大學博士候選人，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心副研究員。
James Su is a Ph.D. candidate at National Chiao Tung University. He is currently an associate researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

「國研盃 i-ONE 儀器科技創新獎」 得獎作品介紹 2020 年中學組首獎

醫療代步車-AI 輔助煞車系統

Mobility Scooter AI Braking Assistant

桃園市立內壢高級中等學校團隊：羅敦允、賴宥蓁、李文翔、
陳彥儒、陳安儒、呂盈臻

指導老師：廖經益、曾秀燉

一、摘要

本研究因考量數據統計與分析的可視性和易觀察性，因此使用自製改裝腳踏車模擬醫療用代步車，並針對圍繞著輔助煞車系統的多項功能進行實驗與研發。其中功能有：(1) 多個感測器與攝影機結合，提高系統識別精準度。(2) 道路視覺辨識，輔助長輩判別道路即時路況。(3) 軟硬體整合，App 顯示車體即時資訊。(4) 馬達作動轉角與煞車力道關係。(5) 即時測量前方與兩側車距，並在意外突發時，啟動輔助煞車。(6) 依據不同環境參數，計算煞車力道、與作動滑行距離與時間。

二、背景介紹

臺灣於 2018 年邁入「高齡社會」，老年人口達到總人口的 14%。國發會推估在 2026 年臺灣將邁入「超高齡社會」老年人口達到總人口的 20%。交通部於 2017 年起開始管理高齡者的駕照，因此不需駕照又同樣是四輪的醫療用電動代步車，成了高齡長輩的新選擇。但依照交通部解釋，「醫療用電動代步車」、「動力式輪椅」屬於醫療器材，視為「行人」活動之輔助器材。但許多長者卻將醫療電動代步車當成汽、機車般的直駛在道路上。因長輩視聽力等生理機能已相較退化，反應不如常人，老人醫療代步車，成了道路上的潛在危機。

因此，本研究的理念是製作一款：AI 輔助煞車系統。利用各式感測器及攝影機的影像辨識功能偵測周遭環境路況，並與軟體整合，讓輔助煞車系統可以應對騎乘中的突發狀況，並有效降低行車致死率、提升駕駛騎乘的安全性。

三、研究目的

本研究的主旨為透過設計、自製出「輔助煞車系統」並有效降低醫療代步車的車速。藉由電動腳踏車蒐集數據，我們可針對更快速的車速進行數據分析與測量。透過自製傳動、供電系統，我們將車體硬體智慧化，將各部件連網，並於每次啟動前進行自身車體檢測，同時利用手機軟體開發智能儀表板，透過語音和圖示的提醒，更有效的提升長輩的用路安全，並輔助駕駛。此外，我們為了解決家屬擔憂長輩行車安全的問題，我們同時開發家屬專用軟體，家屬可透過軟體得知長輩的即時車況與位置，為了使家屬能在意外發生時掌握即時狀況，我們透過車體上的多重感測器比對，推測意外狀況，並透過簡訊通知家屬。

四、作品實現之過程與步驟

本次作品之研究可分為四大架構，分別為：「輔助煞車時的原理與運用」、「輔助煞車運作流程與設計」、「感測器與車體檢測」、「影像辨識」。

1. 輔助煞車的物理原理與運用

為了確切的計算出騎乘的驅動力與煞車時的制動力，本節針對輪胎與地面所產生的滾動阻力、騎乘時的空氣阻力、非水平面所產生的坡度阻力進行討論與研究，並透過感測器取得即時環境參數，最終得出加速阻力，透過加速阻力，我們可計算出制動時所產生的負加速度，並推測出制動所需時間以及車體滑行距離。

1.1 輔助煞車：車體行駛時的受力分析

• 驅動時所產生的阻力

根據達蘭伯原理 (D'Alembert's principle) 對車體行駛時的力圖分析可得知，移動的行駛方程為：

$$F_t = F_f + F_i + F_w + F_j \quad (1)$$

其中加速阻力與其它阻力共同構成平衡力系，並與車體本身的驅動力相反且相等，如 (圖 1)。

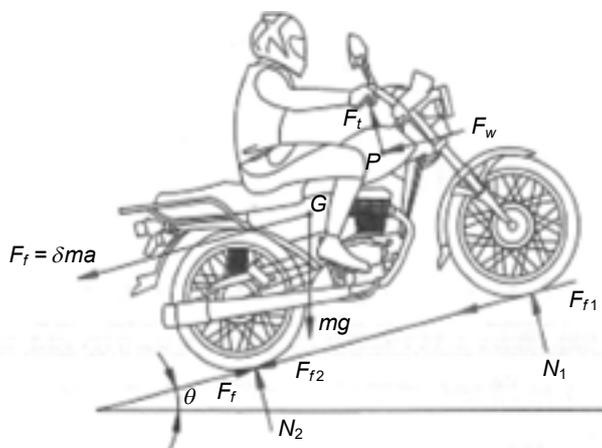


圖 1. 車體行駛時的力圖分析圖。

1.2 輔助煞車：移動行駛方程中的各力分析

1.2.1 滾動阻力

F_f (滾動阻力)：如圖 2，滾動阻力是因為車輪並非正圓，當車體在移動時會因為重力產生阻礙輪胎向前滾動的阻力，計算公式為：

$$F_f = F_{f1} + F_{f2} = N_1 f + N_2 f = (N_1 + N_2) f = W f \quad (2)$$

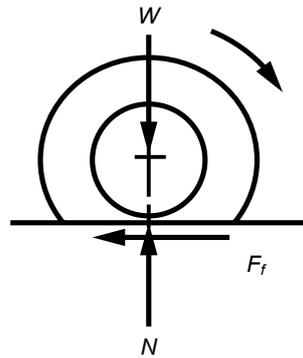


圖 2. 滾動阻力。

1.2.2 坡度阻力

F_i (坡度阻力)：如圖 3，坡度阻力會依照所處環境的傾角，造成移動時的正或負加速度，我們利用三軸感測器，去感測環境坡度，並透過程式計算出因坡度所產生的正、負加速度，計算公式為：

$$F_i = mg \sin \theta \quad (\theta = 5\% , a \pm 0.5g) \quad (3)$$

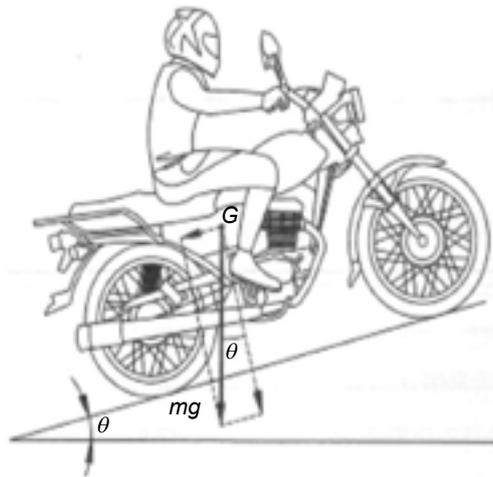


圖 3. 坡度阻力。

1.2.3 空氣阻力

F_w (空氣阻力)：空氣阻力與人車迎風受力面積、環境空氣密度、溫度、風速有關，因影

響與其他阻力相比較小，故我們假設所處環境為室溫 25 °C，和無風狀態，進行計算，計算公式為：

$$F_w = \frac{1}{2} \rho A C_d V^2 (N) \quad (4)$$

1.2.4 加速阻力

F_j (加速阻力)：如圖 4，根據達蘭伯原理摩托車在加速過程中，會受到一個與加速度 a 相反的力，因此稱為加速或慣性阻力，它屬於車體移動時平衡力系的一環，當車速提升時，會形成阻力偶。

將轉動件的旋轉慣性換成等效的平移慣性： δ [旋轉質量換算係數 (Mass Factor)] $\delta = 1.08$ ，計算公式為：

$$F_j = \delta ma \quad (5)$$

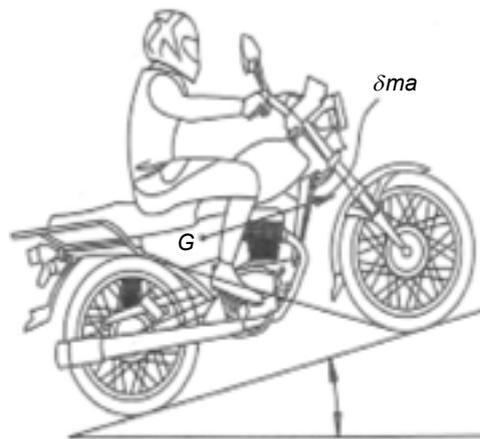


圖 4. 加速阻力。

1.3 輔助煞車：車體制動時的受力分析

· 加速阻力與煞車力度的計算

煞車時，先前在驅動力中所提到的阻力反而會變成煞車力道的助力，換句話說在煞車時，除了制動力為主要作用力之外，滾動、空氣、坡度阻力也能增加其煞車力道。我們透過公式計算出加速阻力與煞車力度，並確保車體能在安全時間內有效煞車。由公式可看出：

$$\begin{aligned} -(F_{b1} + F_{b2}) - (F_{f1} + F_{f2}) - F_w + mg \sin \theta + F_j &= 0 \\ \rightarrow F_b + F_f + F_w &= F_i + F_j \end{aligned} \quad (6)$$

透過以上公式，並利用車上的獨立系統運算，我們可得出加速阻力的負加速度，同時算出輔助煞車系統所需作動的時間以及煞車距離，並與前車距離比對，系統將計算出煞車所需的制動力 $F_b = T/R \Rightarrow F = \mu N \Rightarrow 0.5N \Rightarrow N(\text{kg})/2$ (平均一組制動器所需施加的力道)。

1.4 輔助煞車：制動時地面正向反作用力的變化

• 地面作用於前、後輪的正向反作用力公式推導：

當車體制動時會因為慣性的緣故產生載荷轉移，影響車體制動時的穩定性，為了計算出前、後輪的最佳制動力，本節參考圖 5，當車體制動時透過對前、後輪與路面接觸中心 A、B 取矩，可得出地面作用於前、後輪的正向反作用力：

$$N_1 = \frac{W \times \cos \theta \times \ell_2 + \delta m a \times h - F_w \times h_w + W \sin \theta \times h}{L} \quad (7)$$

$$N_2 = \frac{W \times \cos \theta \times \ell_1 + \delta m a \times h - F_w \times h_w + W \sin \theta \times h}{L} \quad (8)$$

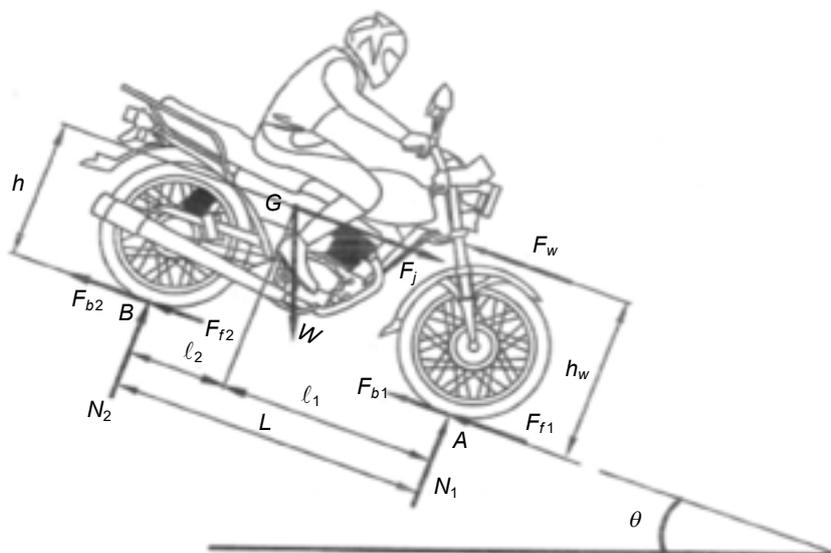


圖 5. 車體煞車制動時的力圖分析。

假設空氣阻力通過「人—車系統」的重心，此時 $h_w = h$ 。因此地面作用於前後輪的正向反作用力變成：

$$N_1 = \frac{1}{L} [W \cos \theta \ell_2 + h(\delta m a - F_w \times h_w + W \sin \theta)] \quad (9)$$

$$N_2 = \frac{1}{L} [W \cos \theta \ell_1 + h(\delta m a - F_w \times h_w + W \sin \theta)] \quad (10)$$

由方程式 (9)、(10) 中的後項 $(\delta m a - F_w + W \sin \theta)h/L$ 又稱為制動載荷轉移力，若車體在平地行駛且忽略空氣阻力，則 $F_w = 0$ ， $\cos \theta = 1$ ， $\sin \theta = 0$ ，上述兩式則變成：

$$N_1 = \frac{1}{L} \left(W \ell_2 + h \frac{w}{g} \delta a \right) = \frac{W}{L} \left(\ell_2 + \frac{\delta a}{g} \right) \quad (11)$$

$$N_2 = \frac{1}{L} \left(W \ell_1 + h \frac{w}{g} \delta a \right) = \frac{W}{L} \left(\ell_1 + \frac{\delta a}{g} \right) \quad (12)$$

由上述方程式可得知，當 a 值越大 (制動力越大)，前輪地面正向反作用力 N_1 越大，而後輪地面正向反作用力 N_2 越小。設輪胎的附著係數相同 ($\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$) 且前後輪同時達到附著極限，車體最大制動減速度為 $a = \varphi g$ ，帶入方程式 (11)、(12)，得：

$$N_1 = \frac{W}{L}(\ell_2 + h\delta\varphi) \quad (13)$$

$$N_2 = \frac{W}{L}(\ell_1 + h\delta\varphi) \quad (14)$$

由上述公式可得知，在最大附著力時，附著係數 φ 越大，制動時前輪地面正向反作用力越大，後輪地面正向反作用力愈小。

1.5 輔助煞車：最佳制動力的推導與運用

• 前、後輪制動百分比

因為車體兩輪中心與重心的水平距離不同，因此造成兩輪有不同的附著係數，為了計算出兩輪的最佳制動力，帶入方程式 (6)，得：

$$F_i + F_j - F_w = F_b + F_f \quad (15)$$

帶入上述阻力公式，可寫成：

$$\delta ma - F_w + W \sin \theta = F_b + fW \quad (16)$$

將方程式 (16) 帶入方程式 (9)、(10)，可得：

$$N_1 = \frac{1}{L}[W \cos \theta \ell_2 + h(F_b + fW)] \quad (17)$$

$$N_2 = \frac{1}{L}[W \cos \theta \ell_1 + h(F_b + fW)] \quad (18)$$

設兩輪的附著係數相同 ($\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$) 且前後輪同時達到可能的最大制動力，此時車體的最大制動力為：

$$F_{b \max} = F_{b1 \max} = F_{b2 \max} = \varphi_1 N_1 + \varphi_2 N_2 = \varphi(N_1 + N_2) = \varphi W \cos \theta \quad (19)$$

將方程式 (19) 代入方程式 (17)、(18)，可得前、後輪最大制動力：

$$F_{b1 \max} = \varphi N_1 = \frac{\varphi W}{L}[\cos \theta \ell_2 + h(\varphi \cos \theta + f)] \quad (20)$$

$$F_{b2 \max} = \varphi N_2 = \frac{\varphi W}{L}[\cos \theta \ell_1 + h(\varphi \cos \theta + f)] \quad (21)$$

經過公式推導並將其程式化後，我們的輔助煞車系統能有效地依照所處的環境參數，計算出前後碟煞所需的最佳制動力比例，並透過調整馬達轉角，分別制動前後輪的煞車模組，達到最高效益的煞車。

最佳制動力：

$$\frac{K_{b1}}{K_{b2}} = \frac{F_{b1 \max}}{F_{b2 \max}} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\cos \theta l_2 + h(\varphi \cos \theta + f)}{\cos \theta l_1 - h(\varphi \cos \theta + f)} \quad (22)$$

(其中 K_{b1} 與 K_{b2} 分別為前、後輪制動力所佔全部制动力的百分比)

2. 輔助煞車運作流程與設計

2.1 制動流程

我們透過將感測器與攝影機的資料交互比對以提升辨識精準度，並針對感測器與影像辨識的數值做危險程度析。當危險發生時，系統會參考周遭環境數值，經由程式計算，並啟動漸進式的輔助煞車，同時透過智能儀表板來警示駕駛。

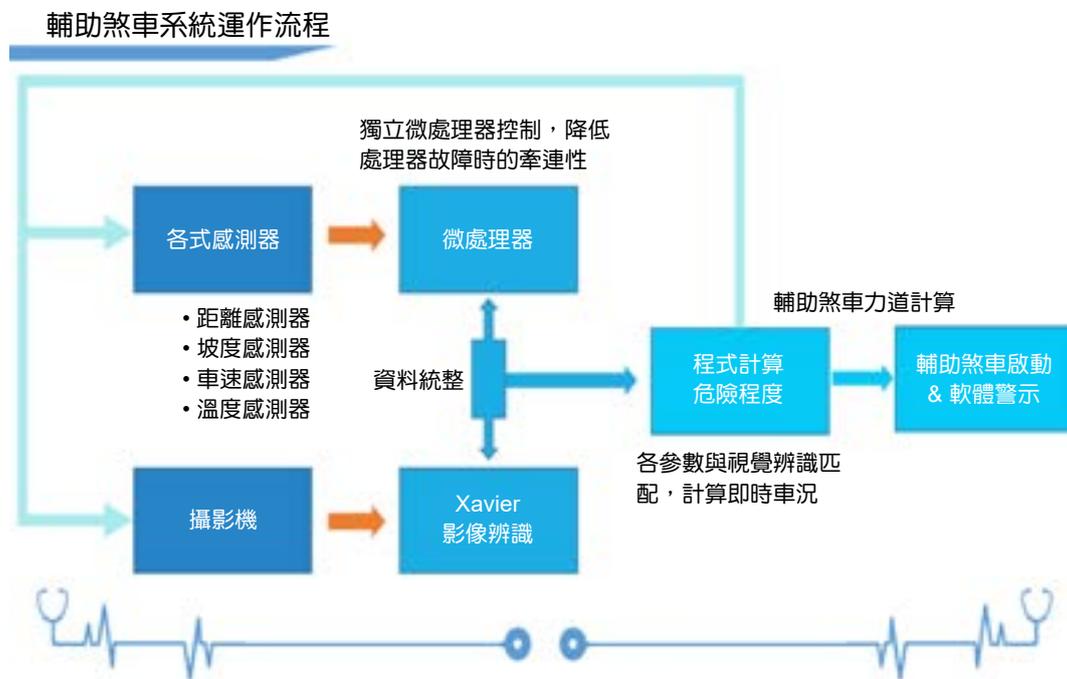


圖 6. 系統運作流程圖。

2.2 輔助煞車設計與配置

2.2.1. 主動式煞車和協助式煞車

我們將輔助煞車系統分成兩大功能:主動式煞車和協助式煞車。其中主動式煞車是當危險情況發生時，駕駛未及時制動，系統將啟動輔助煞車並緩速；而協助式煞車是當駕駛按下煞車後，系統若判斷車體無法在有效時間內緩速，將計算出最佳的煞車力道並輔助緩速。

2.2.2. 設計與配置

因前輪有避震器，導致前輔助煞車系統支點較少且集中於前叉。而紅色及藍色圈處為主要支點，綠色圈處則因避震前叉相對於地面傾角較大，僅能作為輔助支撐來穩定結構。因腳

踏車後半部支點較多，故結構較前輔煞穩定。紅色圈處的扣環可抵消前後的分力，綠色圈處的扣環固定在後上叉，可抵銷軸力及彎矩，藍色圈處的支點可抵銷上下的分力及穩定碟煞。

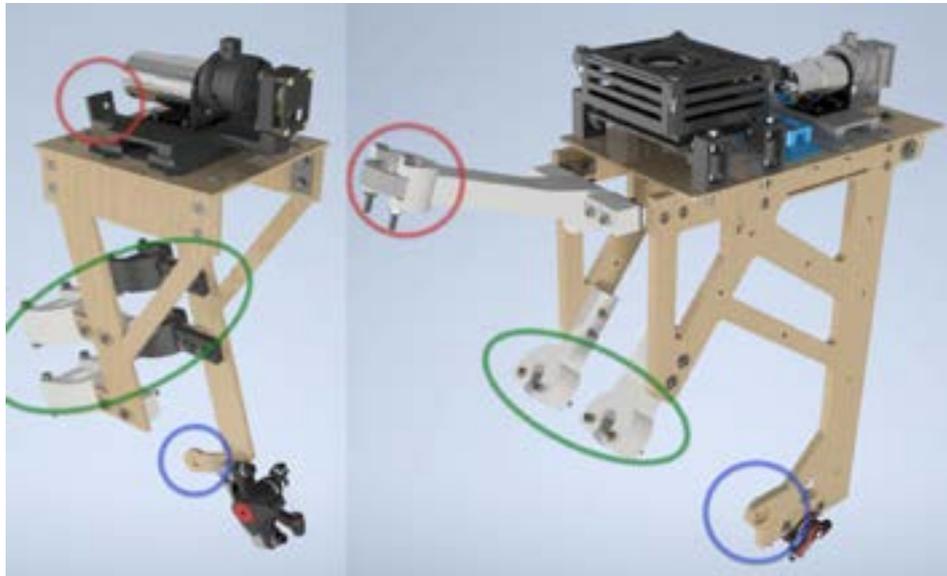


圖 7. 前後輔助煞車系統。

3. 感測器與車體檢測

3.1 系統穩定性

3.1.1. 感測器分區

透過獨立的 MCU 做資料處理與分析，我們將各式感測器回傳之數值透過中央資料處理開發板彙整，接著與影像處理器 Xavier 做資料比對，如圖 8。

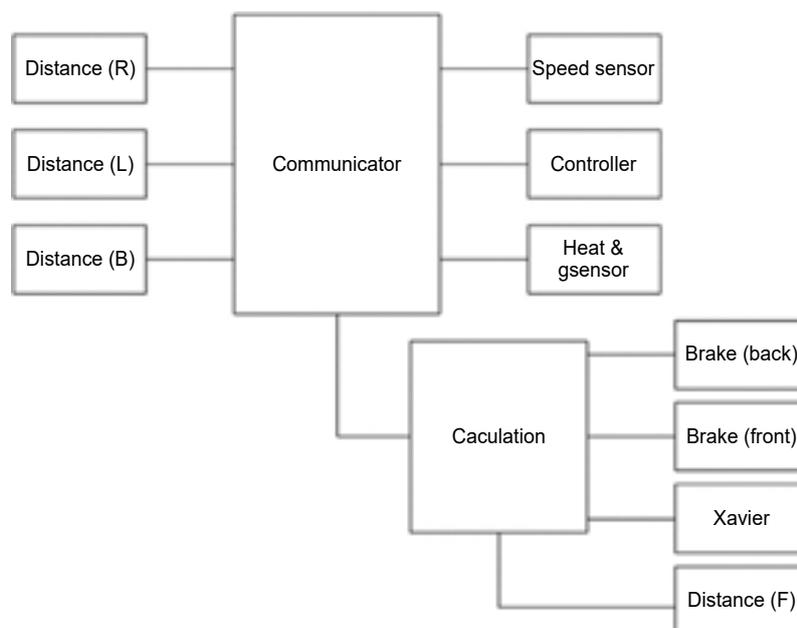


圖 8. 各式 MCU 架構圖。

如此一來，整個系統的運行速度與系統穩定性皆會提升，如圖 9



圖 9. 微處理器未分區與分區的速度比對。

3.2 車體檢測

長者的行車安全除了道路上的危險之外，還有可能因車體任一感測器故障而導致的事。為了避免這種情況發生，我們使代步車在開機時先做全車檢查，確保每個感測器模組無誤且正常運作。當有故障情況發生的時候，系統會馬上通知家屬，檢查流程如下。

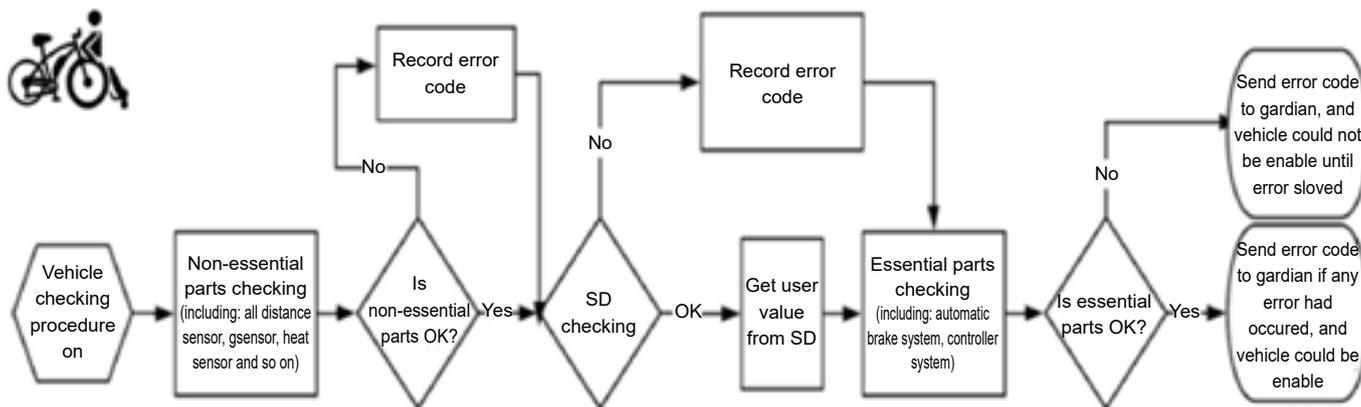


圖 10. 系統檢查流程圖。

4. 影像辨識

4.1 車體偏移偵測

我們先將圖片轉成灰階並先做初步的模糊處理，而我們使用高斯模糊，以減少圖片的雜

訊、降低細節層次，求出一個較為平滑的圖再做 Canny 邊緣檢測。接著使用 fillPoly 遮罩非路線位址的區域 (ROI)，減少不必要的資料，在這裡我們取可能為道路的梯型區域，如 (圖 24)。至於不在讀入圖片的第一步就 ROI 的原因是，避免切割的梯形邊緣被 Canny 檢測出來造成誤差。

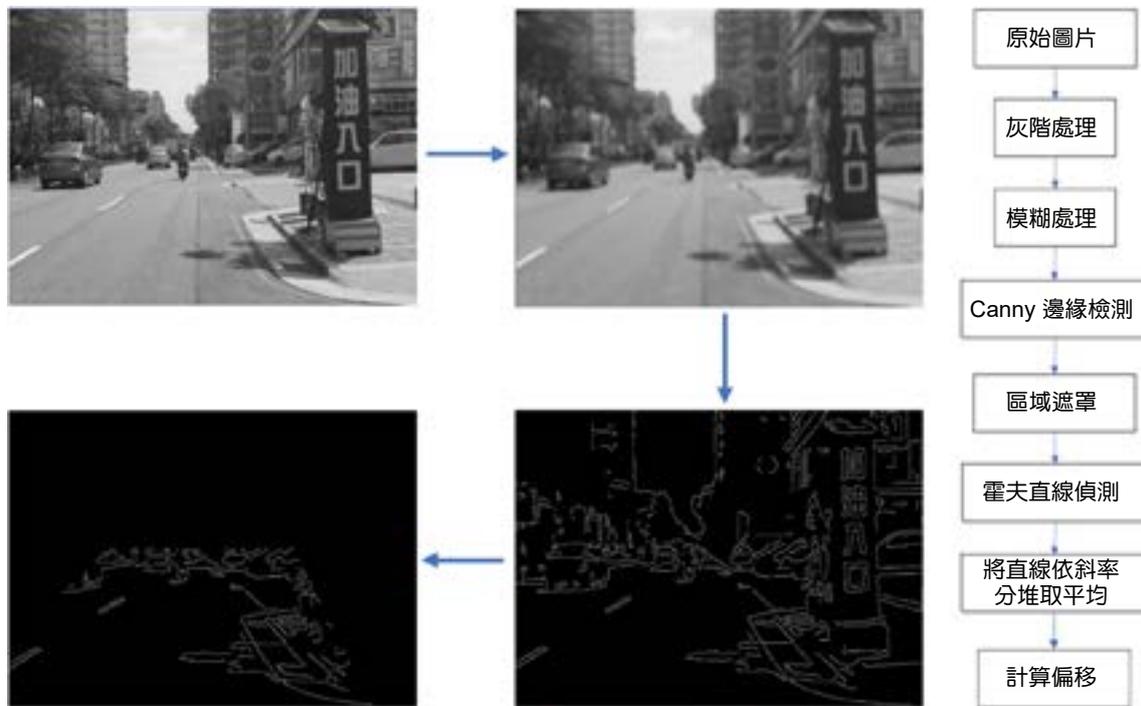


圖 11. 邊緣檢測前置流程圖。

原理 1. 高斯模糊 (Gaussian blur)

相較於簡單的平均模糊，高斯模糊使用常態分布的方式來分配卷積的權重，也就是越靠近的點關係越密切、權重越大；越遠離的點關係越疏遠、權重越小。而常態分布的密度是使用高斯函式，透過高斯函數 $G(x, y)$ 和圖片 $F(x, y)$ 做卷積，以分配權重的方式來保留較重要的數值和細節，避免被較遠的極值所影響。

14×0.0947416	15×0.118318	16×0.0947416
24×0.118318	25×0.147761	26×0.118318
34×0.0947416	35×0.118318	36×0.0947416

圖 12. 空間和權重的關係。

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2}$$

圖 13. 高斯函數。(圖片來源：Itread⁰¹)

原理 2. Canny 邊緣檢測 (Canny Edge Detection)

Canny 是一個複合式演算法，結合了梯度偵測、非最大值抑制 (non- maximum suppression) 與邊界判別。並具有低錯誤率、定位準確等優點。

Step1: 梯度偵測

一開始會使用 Sobel filter 來計算 x 、 y 方向分別的梯度值，同時計算出梯度的方向 (θ) 和強度 (G)。

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} \quad G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$$

$$G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +2 & +1 \end{bmatrix} \quad \theta = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right)$$

圖 14. Sobel filter 梯度計算。(圖片來源：hby coding academic)

Step2: 非最大值抑制 (non- maximum suppression)

為了簡化計算，將梯度分成 0° 、 45° 、 90° 、 135° 四個主要的方向，再做非最大值抑制，保留該方向中梯度變化 (強度 G) 最大的點作為邊緣。

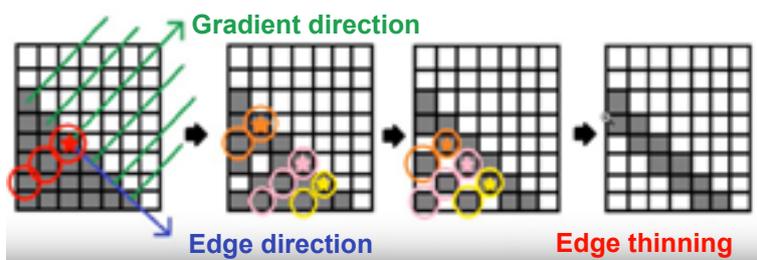


圖 15. 非最大值抑制。(圖片來源：hby coding academic)

Step3: 邊界判別

設定高邊界和低邊界來篩選出正確的邊線：

1. 高於高界線：一定是邊緣。
2. 低於低界線：一定不是邊緣。
3. 介於高、低界線之間：若附近有高界線的点，則此點也視為邊緣。

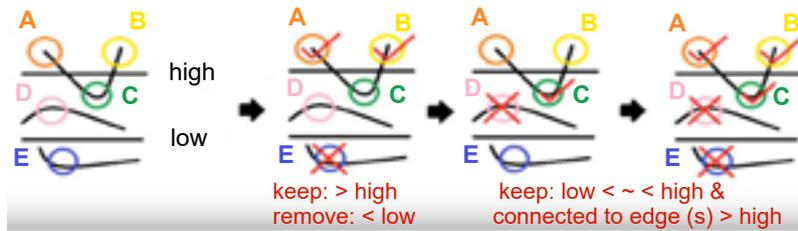


圖 16. Canny 邊界設定值篩檢示意圖。(圖片來源：hby coding academic)

因為臺灣的交通環境較複雜，故需較明顯的降噪效果，經過多次的修正和測試，最終我們使用高斯模糊範圍較大 kernel (模糊效果較顯著) 加上較低閾值的邊緣檢測參數。參數數值如下：

```
GaussianBlur (img_gray, (17, 17), 0)
Canny (img_gray_blur, 30, 60)
```

圖 17. 高斯模糊及 Canny 邊緣檢測參數。

接著我們利用 Canny 檢測出邊線的點做霍夫直線偵測 (Hough line detection)，得到許多條可能符合的線之後，再依照斜率、位置等資料設立篩選條件，以移除錯誤的結果減少誤差，如：

1. 斜率絕對值大於 0.3、小於 10。
→ 移除偵測到車體或樹葉陰影的橫線
2. 斜率為正 (左側邊線) 且最左邊的位置在畫面中心右側。
3. 斜率為負 (右側邊線) 且最右邊的位置在畫面中心左側。
→ 移除不可能為路線的直線

最後再依照斜率正負，分別取其平均區分為左線及右線。計算左右邊線中點和畫面中心的差以及左右線段距離的比值得出車體的偏移值。



圖 18. 路線偵測和計算車體偏移。

4.2 紅綠燈辨別

為了加快處理器的運算速度並減少路面的干擾，我們在一開始讀入圖片時就擷取上方紅綠燈可能出現的位子(紅框)，聚焦在少量且必要的資料上。

因為要做顏色的特徵擷取，故我們先將圖片轉成 HSV 表示法，並且設定紅、黃、綠燈的 HSV 顏色範圍，之後分別將三個顏色以 inRange 二元黑白的方式表示(如圖 19 左側三個黑底的視窗，由上至下分別為綠、黃、紅)。



圖 19. 紅綠燈辨別。

4.3 人車辨識

本次研究在物件辨識的主要應用是用於即時路況偵測，因此在一開始研究時，我們首要考量的需求便是「運算速度」。故我們使用了 YOLO 這個演算法，搭配 darkflow 的框架。

YOLO (You Only Look Once) 相較於：

1. R-CNN 使用 Selective Search 來篩選 2,000 個可能區域 (region proposals)，再依照這些區域去分類，跑過至少 2,000 次的 CNN。

2. Fast R-CNN 使用 RoIPooling 的方式，讓這 2,000 多個區域共用，全部只算一次 CNN。
3. Faster R-CNN 直接從 feature map 上選出可能區域的 RPN (region proposal network)。

R-CNN 家族使用先提出可能區域，再針對這些提出的區域使用 CNN 分類，最後以 regression 修正 bounding box 位置這樣的方式，速度快了許多。

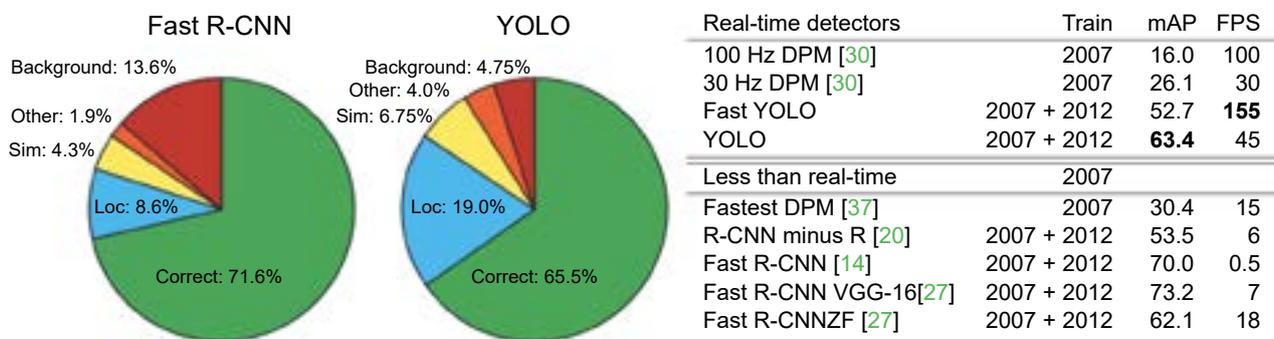


圖 20. 演算法效能比較。

透過圖表可看出，YOLO 相比於 R-CNN 速度明顯快了許多，同時和 Fast R-CNN 相比，準確度 (mAP) 也僅略低一點。根據官方實測在 Titan X GPU 上可以達到 45 FPS，而在我們專題所使用的 Jetson Xavier NX 上約為 3.8 FPS。

4.4 影像辨識小結——針對臺灣交通開發的系統

本次研究中的影像辨識，我們參照了國外自駕車的特點和許多輔助駕駛的功能，作為我們的參考對象。但與國外道路相比，臺灣的交通相對複雜，同時文化的差異也使辨識課題不盡相同，像是紅綠燈在顏色和外型上就與歐美的不同，辨識也常受到臺灣道路上繽紛的廣告刊版影響，外加路標多元且複雜，人車眾多等問題，因此常造成路線被遮蔽、影像辨識效果不佳等問題。

因此，本次研究在影像辨識的領域最精華且特別的部分在於，我們不僅只是將方法實現出來，而是特別針對臺灣的交通做了許多的研究和改變。我們嘗試使用不同的演算法、透過實測，比較不同的方式所造成的成效差異，利用數據分析，開發出專屬於臺灣道路的篩選方式，像是在路線偵測時，透過自行設定的直線方程式作為篩選條件、紅綠燈辨別則使用二次篩檢提升準確率，盡可能地實現我們期望的辨識效能與結果。

除了針對臺灣交通道路客製化之外，我們影像辨識的功能也緊扣在老人較常發生危險事故的原因，同時針對代步車的使用習慣進行調整。例如代步車通常行駛在道路的右側，因此將辨識紅綠燈的範圍略為左移、當系統偵測不到右線時，則去判別左線的斜率是否接近垂直線，作為車體偏移檢測的依據。

另外我們也致力於研究每個演算法背後的原理，讓我們能知道如何更有效的調整參數，以及成效不彰時要如何修正，使我們的系統能更精準的辨識臺灣的交通路況。然而，因臺灣的交通相較國外複雜許多，更是增加了本次研究的困難度，也同時展現了此研究的價值。

五、作品成果展現

1. 車體照片



圖 21. 車體照片。

2. 影像辨識照片

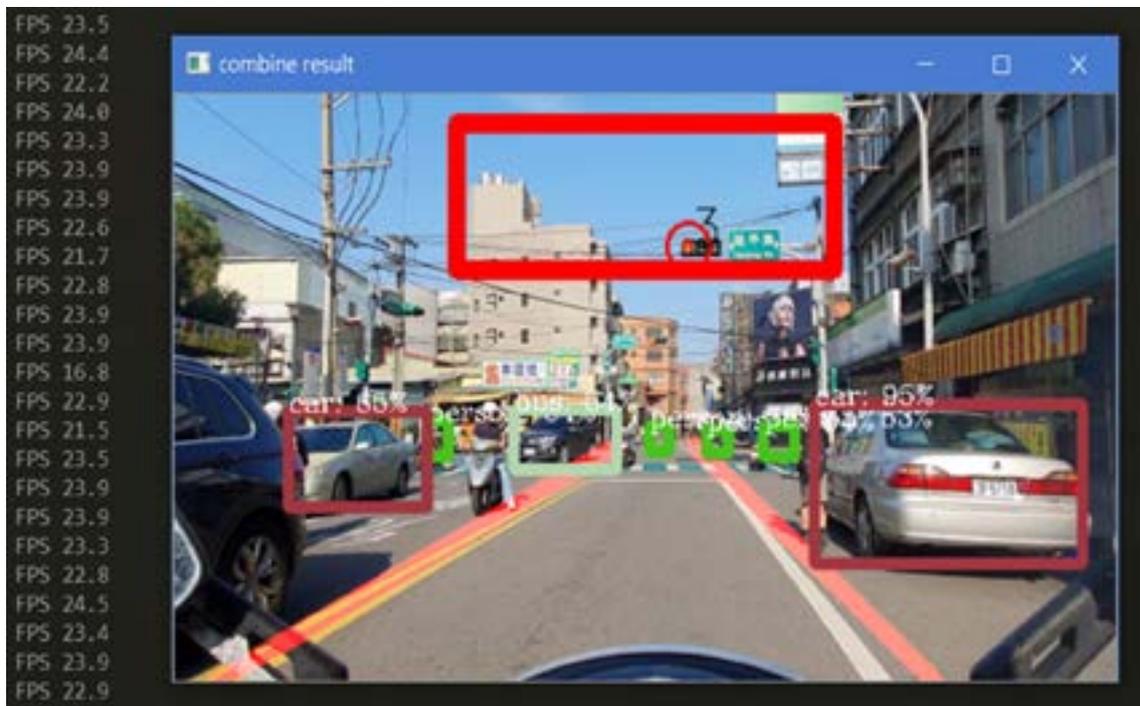


圖 22. 影像辨識。

3. 手機軟體成果

表 1. 雙軟體簡介

軟體名稱	AutoBrake Panel	AutoBrake Family
中文暱稱	智能儀表板	家屬專用軟體
使用對象	代步車駕駛	駕駛的家屬
設計目的	使駕駛得知行車資訊、危險警示	幫助家屬掌握長者行車安全
功能	顯示車速、電量、地圖掌握危險警示、震動、語音提醒、緊急聯絡人、家屬貼心 Note	長輩行車資訊、即時位置、行車資訊數據統計、發生事故通知、地點抵達通知、設定儀表板緊急聯絡人和家屬貼心 Note

3.1 AutoBrake Panel (智能儀表板)

我們透過手機 App 當作智能儀表板，手機本身是個非常高階的顯示器，相較於傳統儀表板，我們的儀表板能夠支援多點觸控、GPS、語音播報、遠端軟體更新。因此我們使用這個世代人人皆有的手機，來取代價格高昂的顯示器，讓駕駛能與系統互動、同時節省額外的開發成本，而我們也利用這樣的優勢，設計出能和家屬專用軟體及車體遠端互動的功能。



圖 23. AutoBrake Panel 顯示介面

- 當開啟 App 的時候，便會自動連線到煞車系統的藍芽模組，並顯示車體回傳的開機狀態，同時停用開始鍵 (暗燈)，直到車體完成開機。
- 車體安全鎖：我們的儀表板同時也是車體的馬達安全鎖，按下 Start 即進入一般行駛狀態、解鎖車體馬達，顯示車速、驅動比例、馬達即時溫度等運行資訊；反之在行駛狀態按下 Pause 則進入安全模式，避免誤觸油門。
- 家屬貼心 Note：家屬可以透過 AutoBrake Family 軟體，遠端更改想要顯示在儀表板上的

文字，叮嚀老人需要帶的東西或是代辦事項。

- 緊急聯絡人：在儀表板右下角，我們也製作了緊急連絡人的快捷按鈕，幫助老人可以在緊急的時候直接連絡家屬，而家屬可以透過 AutoBrake Family 軟體，隨時更改緊急聯絡人的電話號碼。
- 危險警示：當發生危險情況時軟體會顯示相對應的警示圖，並且發出震動、語音警示駕駛，同時提醒用路人。
- 掌握路況：此 App 也整合了 Google Map，方便使用者在路況不熟的時候可以透過簡單的左滑，快速的打開地圖掌握路況。



圖 24. 危險警告圖示

3.2 AutoBrake Family 家屬專用軟體

為了讓家屬能掌握家中長輩的即時動向與狀態，我們額外開發了一款軟體，並將車體車況、GPS 定位、事故提醒等資料回傳給家屬，以免意外發生時家屬無法掌握長輩實際位置及狀況，並加快救護時間，同時也可以讓家屬透過此軟體幫助老人設定智能儀表板資料，減少長者使用軟體的操作難度。



圖 25. AutoBrake Family 顯示介面

- 即時狀態頁面：顯示車體當前的行駛狀態，如剩餘電量、馬達溫度、目前車速，並在電量過低或是馬達溫度異常時通知家屬。

- 目前位置頁面：顯示老人的即時位置，以及最近一次更新位置的時間，按下標記點則會連接至 Google Map App。
- 圖表統計頁面：我們會將上述的行駛資料統計成圖表，透過這些圖表可以讓家屬了解長者的騎乘習慣，根據電量走勢也可以得知電池的使用狀態和推估長者的生活作息。
- 個人設定頁面：
 1. 設定儀表板的家屬貼心 Note 要顯示的文字。
 2. 設定儀表板的緊急聯絡人電話號碼。
 3. 設定長輩的常去地點。
- 出發抵達通知：家屬可以預先設定常去地點，在長者出發或是抵達常去地點時通知家屬。
- 事故提醒：們透過車體感測是否發生傾倒或碰撞等事故，在第一時間透過此 App 通知家屬長者可能發生事故，以避免錯過搶救時機，導致憾事發生。

六、結論

本次研究透過自製電動腳踏車模擬醫療代步車，成功實現了機電整合、影像辨識、輔助煞車機構設計、手機雙軟體開發等功能，透過實測與實驗探討「醫療代步車-AI 輔助煞車系統」的可實現性。

1. 機電整合

透過獨立微處理器，將各感測器模組化，並制定危險指標。

1. 獨立微處理器：已實測證實獨立微處理器的優點。
2. 感測器模組化：自製 PCB 板，增加感測器穩定度。
3. 危險指標制定：條件被觸發時，軟、硬體進行相對應作動。

2. 影像辨識

利用影像辨識實現：車體偏移偵測、紅綠燈辨別、人車辨識等功能。

1. 車體偏移偵測：易受到路上車體、路面標誌影響。
2. 紅綠燈辨別：有效範圍內偵測號誌，相當準確。
3. 人車辨識：可有效結合感測器偵測危險。

3. 輔助煞車機構設計

以結構力學為設計考量，自製前後輔助煞車系統、主控避震系統。

1. 輔助煞車：依照車體結構，以三點以上固定方式使結構更穩固。
2. 避震設計：將四個彈簧並聯，保護主控系統。
3. 車體機構：分析各部件支點位置之分力。

4. 手機雙軟體開發

考量家屬與長輩不同的需求開發相關功能。

1. AutoBrake Panel (智能儀表板)：以簡單的功能符合老人的需求。
2. AutoBrake Family (家屬專用軟體)：開發多項功能掌握長輩的行車狀況。

參考文獻

1. Association Adilca, BRAKING FORCE, (2020). Please refer to the web site:
<http://www.adilca.com/files.htm>
2. Twiflex, Industrial Disc Brakes, (2018). Please refer to the web site:
<https://www.twiflex.com/-/media/Files/Literature/Brand/twiflex-limited/Catalogs/P-1648-TF.ashx?la=en&hash=1A2A38BAF28709DFFE22D0D2B89FBB5570FFC75C>
3. Huco Dynatork , Formulae and Conversion Factors. Please refer to the web site: <https://www.twiflex.com/-/media/Files/Literature/Brand/twiflex-limited/Catalogs/P-1648-TF.ashx?la=en&hash=1A2A38BAF28709DFFE22D0D2B89FBB5570FFC75C>
4. 原口秀昭, 圖解結構力學練習入門, 台北: 臉譜, (2015).
5. 高木任之, 超簡單結構力學, 台北: 世茂, (2014).
6. Robert Keim, How to Choose the Right Microcontroller for Your Application, (2019). Please refer to the web site:
<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/how-to-choose-the-right-microcontroller-for-your-application/>
7. Maurizio Di Paolo Emilio, 140-year-old secret in the Hall effect discovered, (2019). Please refer to the web site:
<https://www.eetimes.com/140-year-old-secret-in-the-hall-effect-discovered/#>
8. Joseph Redmon , Santosh Divvala , Ross Girshick & Ali Farhadi, You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection, (2016). Please refer to the web site:
https://pjreddie.com/media/files/papers/yolo_1.pdf,
9. Jędrzej Świączewski, YOLO Algorithm and YOLO Object Detection: An Introduction, (2020). Please refer to the web site:
<https://appsilon.com/object-detection-yolo-algorithm/>
10. Steven Shen, 關於影像辨識, 所有你應該知道的深度學習模型, (2018). Please refer to the web site:
<https://medium.com/cuboi/%E7%89%A9%E9%AB%94%E5%81%B5%E6%B8%AC-object-detection-740096ec4540>
11. R. Fisher, S. Perkins, A. Walker and E. Wolfart., “Hough Transform”, (2003) Please refer to the web site:
<http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/hough.htm>
12. 天道酬勤, 邊緣偵測懶人包-Canny演算法, (2019). Please refer to the web site: <https://medium.com/@bob800530/open-cv%E5%AF%A6%E4%BD%9C%E9%82%8A%E7%B7%A3%E5%81%B5%E6%B8%ACcanny%E6%BC%94%E7%AE%97%E6%B3%95-d6e0b92c0aa3>

作者簡介

羅敦允先生畢業於桃園市立內壢高級中等學校，現為東海大學資訊管理學系學生。

Tun-Yun Lo received his diploma from Taoyuan Municipal Nei Li Senior High School. He is currently an undergraduate student in Information Management at Tung Hai University.

李文翔先生畢業於桃園市立內壢高級中等學校，現為國立中正大學資訊工程學系學生。

Wen-Shiang Li received his diploma from Taoyuan Municipal Nei Li Senior High School. He is currently an undergraduate student in Computer Science and Information Engineering at National Cheng Chung University.

陳彥儒先生畢業於桃園市立內壢高級中等學校，現為長庚大學電機工程學系學生。

Yan-Ru Chen received his diploma from Taoyuan Municipal Nei Li Senior High School. He is currently an undergraduate student in Electrical Engineering at Chang Cung University.

賴宥蓁先生畢業於桃園市立內壢高級中等學校，現為國立宜蘭大學資訊工程學系學生。

Yu-Chen Lai received his diploma from Taoyuan Municipal Nei Li Senior High School. He is currently an undergraduate student in Computer Science and Information Engineering at National Ilan University.

陳安儒先生畢業於桃園市立內壢高級中等學校，現為國立海洋大學機械與機電工程學系學生。

An-Ju Chen received his diploma from Neili Junior High School. He is currently an undergraduate student in Mechanical and Mechatronic Engineering at National Taiwan Ocean University.

呂盈臻小姐畢業於桃園市立內壢高級中等學校，現為國立台北科技大學機械工程學系學生。

Ying-Chen Lu received her diploma from Neili Junior High School. She is currently an undergraduate student in Department of Mechanical Engineering at National Taipei University of Technology.

廖經益先生為數學科教師，曾任教務主任，現為桃園市立內壢高中圖書館主任。

Ching-Yi Liao is a math teacher, he has served as director of the Academic Affairs, and is now the director of Taoyuan Municipal Nei-Li High School Library.

曾秀燉為臺灣師範大學化學碩士，現為桃園市立內壢高中化學科教師。

Hsiu-Tun Tsen received her M.S. in Department of Chemistry from National Taiwan Normal University. She is currently a Chemistry teacher at Taoyuan Municipal Nei Li Senior High School.