

Instruments Today 2023 Q2

科儀新知



自動光學檢測
Automated Optical Inspection

【人物專訪】

國立清華大學賀陳弘前校長

235
ISSN 1019-5440

Mitutoyo

以精密量測技術貢獻社會

NEW
Products



▲ 座標測定機

更多詳細資料



光學尺 ▶



NEW
Products



◀ 現場型
座標測定機

輪廓形狀 ▶
及表面
粗度測定機



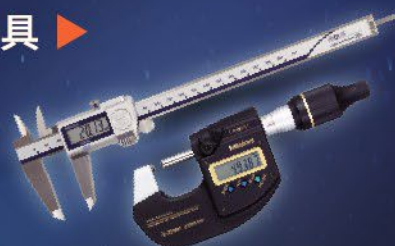
NEW
Products

NEW
Products



◀ 高精度CNC
影像測定機

測定工具 ▶



35th

傳承 創新 跨越

台灣三豐儀器
www.mitutoyo.com.tw

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 • 多面檢查晶粒挑撿機 6S Inspection Chip Sorter

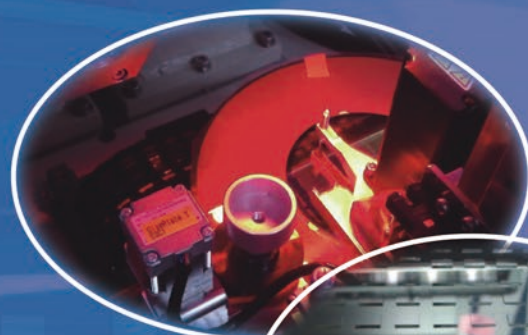
• 扇型封裝高精度黏晶機 Fan Out Die Bonder

• 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

東捷科技

研發、設計、生產一條龍
滿足各產業客戶需求

東捷科技以雷射技術為核心，致力於自動化、
檢測與雷射修補設備，跨足面板、半導體、PCB等領域。
近年來更切入 Mini / Micro LED 設備市場，為國內數一數二領導廠商！



完善服務網絡 服務據點在地化 維修保養 定期設備調校 客戶問題即時對應



全臺據點:新竹/臺中/臺南/高雄

總公司:臺南市臺南科學工業園區南科六路9號



+886-6-5051188



東捷科技股份有限公司
Control Control Technology Co., Ltd.

CNC控制器・自動化控制器・ 機械手臂・雲端 整合方案



ONE FOR ALL
ALL IN SYNTEC

最值得信任的電控夥伴

新代科技股份有限公司
SYNTEC Technology Co., Ltd.

☎ 886-3-6663553
☎ 886-3-6663505

台灣新竹市東區研發二路25號

✉ sales@syntecclub.com.tw



SYNTEC



LEANTEC



LINE

HIWIN®

實現您的智慧工廠

HIWIN 為工業 4.0 提供高附加價值的整體解決方案
全方位系列產品，實現您的智慧工廠。



關節式機器手臂
Articulated Robot



史卡拉機器手臂
SCARA Robot



晶圓機器人
Wafer Robot



晶圓移載系統
EFEM



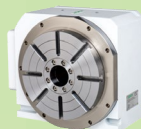
智慧型滾珠螺桿
Intelligent 4.0 Ballscrew
智慧型線性滑軌
Intelligent 4.0 Guideway



諧波減速機
DATORKER® Strain Wave Gear
旋轉致動器
DATORKER® Strain Wave Gear System



RCH系列



RCV系列



RAS系列

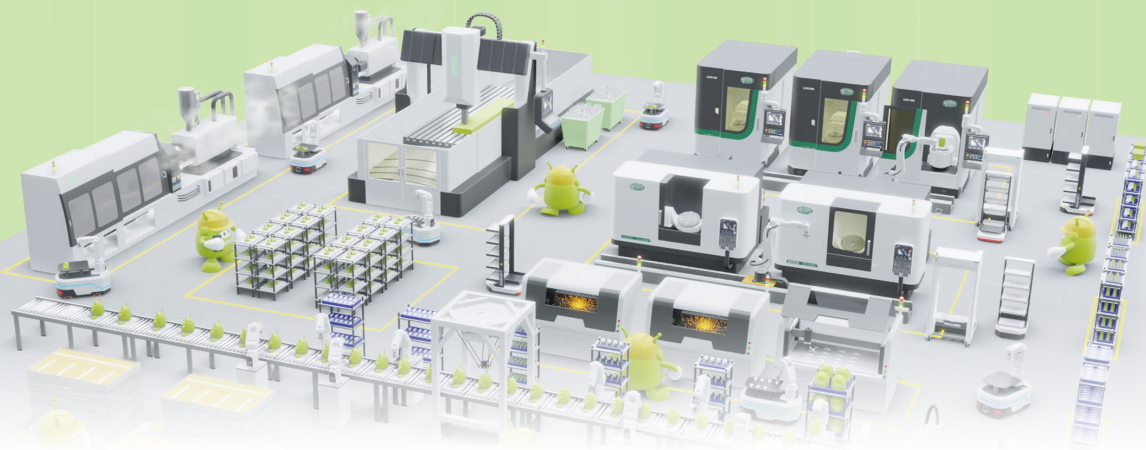


RAB系列

Torque Motor 迴轉工作台
Torque Motor Rotary Table



了解更多
HIWIN產品



全球營運總部

上銀科技股份有限公司
HIWIN TECHNOLOGIES CORP.
台中市40852精密機械園區精科路7號
Tel : (04) 2359-4510
www.hiwin.tw
business@hiwin.tw

關係企業

大銀微系統股份有限公司
HIWIN MIKROSYSTEM CORP.
台中市40852精密機械園區精科中路6號
Tel : (04) 2355-0110
www.hiwinmikro.tw
business@hiwinmikro.tw

全球銷售暨服務據點

德國 www.hiwin.de	日本 www.hiwin.co.jp	美國 www.hiwin.us	義大利 www.hiwin.it
瑞士 www.hiwin.ch	捷克 www.hiwin.cz	法國 www.hiwin.fr	新加坡 www.hiwin.sg
韓國 www.hiwin.kr	中國 www.hiwin.cn	以色列 www.mega-fabs.com	

全新七合一儀器合而為一

InfiniiVision 3000G X 系列示波器



3000G X 系列示波器一機抵多機，提供進行通用電子設計所需的一切功能。

它隨附各種軟體和探棒，並提供直方圖和區域觸控觸發等進階功能，以及 KeysightCare 技術支援，是研發階段進行除錯、低速串列設計和測試、電源完整性測試的理想選擇。



InfiniiVision 3000G X 系列示波器



選擇合適的探棒

免費客服專線：0800-047-866

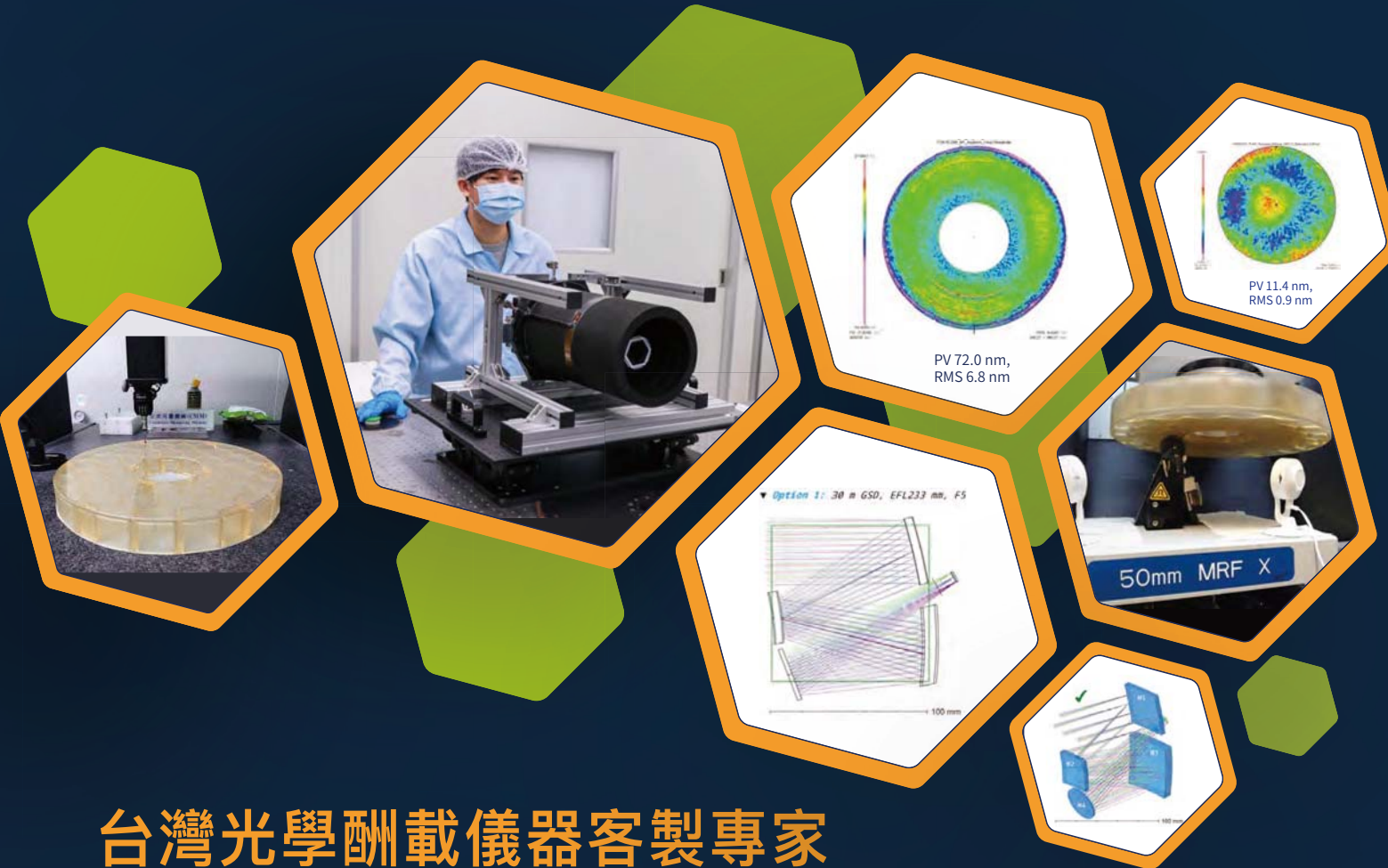
© Keysight Technologies, Inc. 2023

 **KEYSIGHT**

台灣是德科技股份有限公司

Instrumentation for Aerospace Discovery

Optics Development and Research Collaboration at TIRI



台灣光學酬載儀器客製專家



各類光學酬載開發:望遠鏡/多光譜/高光譜/海洋水色照相儀...

R&D of Various Optical Remote Sensing Payloads



航太級鏡片拋光與檢測服務

Fabrication and Inspection for Meter-scale Aspheric Mirrors



航太級光學鍍膜客製開發

Customized Optical Thin Film Coating for Aerospace Application



精密光學鏡頭(元件)客製設計與開發

Customized Design and Fabrication for Optical Lens & Components



<https://www.tiri.narl.org.tw/>



NARLabs 國家實驗研究院

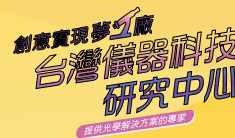
台灣儀器科技研究中心

Taiwan Instrument Research Institute



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

IEEE
INSTRUMENTATION
& MEASUREMENT
SOCIETY
Taipei Section Chapter



i-ONE 2023

國研盃儀器科技創新獎

NAR Labs Instrument Technology Innovation Competition

儀器競賽 - 提升儀器製作能力、促進儀器科技發展

儀器創意競賽

中學組 (含高職生)

首獎獎金新台幣 80,000 元
二獎獎金新台幣 40,000 元
三獎獎金新台幣 20,000 元
佳獎獎金新台幣 8,000 元
入圍獎金新台幣 2,000 元

獲獎團隊指導老師頒發感謝狀與獎金 5,000 元

專上組 (含研究生)

首獎獎金新台幣 100,000 元
二獎獎金新台幣 50,000 元
三獎獎金新台幣 25,000 元
佳獎獎金新台幣 10,000 元
入圍獎金新台幣 4,000 元

獲獎團隊指導老師頒發感謝狀



光陽電動車
ionex

i-One AIR

首獎團隊
光陽教師特別獎

入圍決選者將頒發入圍證書與獎金，
另視參賽作品的創造性與特別性得增設特別獎

活動網址

<https://i-one.org.tw>



報名截止日期：2023 年 8 月 7 日

Tel : 886-3-5779911 ext.304 林小姐

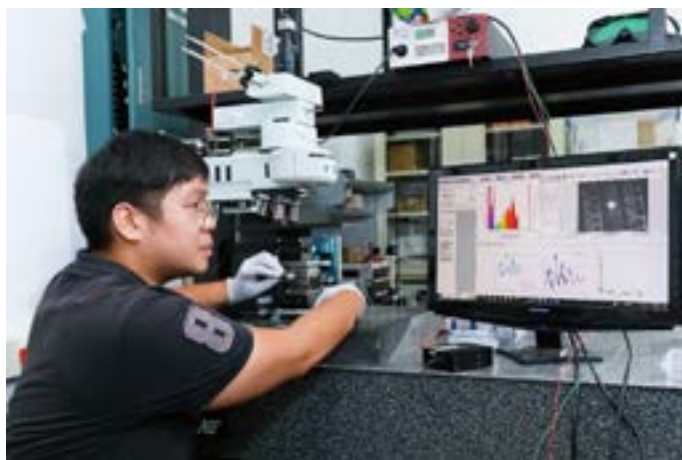
Email : i-one@narlabs.org.tw



科儀新知

INSTRUMENTS TODAY 季刊

中華民國 112 年 6 月 30 日出版



封面說明

隨著消費性電子產品不斷推陳出新，零組件的瑕疵都可能影響產品功能，因此製造業對於透過檢測提升良率的需求與日俱增。緣此，本期以「自動光學檢測」作為專題，介紹自動光學檢測新興技術與應用範圍。封面照片為陳亮嘉教授團隊開發出發展了一創新之光學關鍵尺寸量測 (OCD) 系統與技術，用以克服目前於先進封裝製程中，具高深寬比之微結構難以使用非破壞性檢測的困境。

(本圖片由國立臺灣大學機械工程學系陳亮嘉教授提供)

• 發行人：潘正堂

• 諮詢委員：吳文桂、陳力俊、關志達、蔡定平

• 客座主編：陳亮嘉

• 執行編輯：林麗娥、陳柏荔、魏崇倫

• E-mail：tiri-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

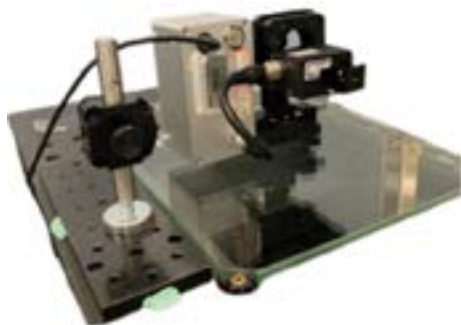
• 電話：(03) 5779911 轉 304, 313

• 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



46

人物專訪

- 4 國立清華大學－賀陳弘前校長
宏觀教育理念見樹又見林
林麗娥

自動光學檢測

- 9 「自動光學檢測」專題介紹
陳亮嘉

- 10 多層透明板厚度及折射率量測系統
施玟妤、劉建聖

- 30 偏振干涉術應用於折射率、滾轉角位移量測
蔡岳哲、張書菡、許敬澤、江家宇、宋瑋益、李朱育

- 42 五自由度測量系統的開發與應用
魏承弘、范光照、何昭慶

- 52 CIGS 薄膜太陽能板之光致發光自動光學檢測系統開發
林志豪、陳銘福、陳柏睿、蔡和霖、連俊傑

- 66 基於機器視覺與深度學習的面板切割缺陷檢測
林祐誠、黃俊翔、羅鈺淳、何昭慶

- 76 高深寬比微結構之創新光學散射關鍵尺寸量測技術
簡維信、楊福生、傅子英、陳亮嘉

科儀專欄

- 88 預測雷射拋光後雷射粉床熔融零件的表面樣態：數值和實驗研究
范得福、陳章紅



61

INSTRUMENTS TODAY

June 2023

People

- 4** **Dr. Hong Hocheng, Former President at National Tsing Hua University**
Seeing the Wood for the Trees: Chair Professor Hong Hocheng Dedicate Himself to Education and Governing NTHU

Claire Lin

Special Issue: Automated Optical Inspection

- 9** **Special Issue Introduction of "Automated Optical Inspection"**

Liang-Chia Chen

- 10** **Design of Thicknesses and Refractive Indices Measurement System for Multilayer Transparent Samples**

Wen-Yu Shih, Chien-Sheng Liu

- 30** **Polarization Interferometry for the Measurement of Refractive Index and Roll Angular Displacement**

Yue-Jhe Tsai, Shu-Han Chang, Ching-Tse Hsu, Chia-Yu Chiang, Wei-Yi Sung, Ju-Yi Lee

- 42** **Development and Application of Five-degree-of-freedom Measurement System**

Cheng-Hung Wei, Kuang-Chao Fan, Chao-Ching Ho

- 52** **An Automatic Inspection System Development Based on Photoluminescence for CIGS Thin Film Solar Panels**

Chih-Hao Lin, Ming-Fu Chen, Po-Jui Chen, Ho-Lin Tsay, Chun-Chieh Lien

- 66** **Machine Vision and Deep Learning Based Scribe Defect Detection for LCD**

You-Cheng Lin, Chun-Hsiang Huang, Yu-Chun Luo, Chao-Ching Ho

- 76** **Novel Scatterometry Technique for Critical Dimension Metrology of High-aspect-ratio Microstructures**

Wei-Hsin Chein, Fu-Sheng Yang, Zi-Ying Fu, Liang-Chia Chen

Column

- 88** **Predicting the Surface Morphology of Laser Powder Bed Fusion Parts After Laser Polishing: Numerical and Experimental Study**

Dac-Phuc Pham, Hong-Chuong Tran



69



83



國立清華大學

賀陳弘 前校長

宏觀教育理念見樹又見林

Seeing the Wood for the Trees: Chair Professor Hong Hocheng Dedicate Himself to Education and Governing NTHU

撰文：林麗娥

國立清華大學(清大)前校長—賀陳弘講座教授為清華大學首位遴選連任的校長，帶領清大八年，建立多項里程碑的發展，包括推動與新竹教育大學合併，獲教育部、衛福部核准設立公費學士後醫學系及附設醫院的籌建，成立四個新的學院及兩個轉型的學院，促成美術館、文學館、文物館和音樂廳的募款捐建，更成立清大永續基金…。教育是百年樹人的大計，賀陳校長擘劃清大發展藍圖則是見樹又見林，將原以理工起家的清華大學，打造成如今的綜合型大學，帶領清大邁向台灣高教頂峰。《科儀新知》採訪賀陳校長時，校長說話帶著文人的溫文，言談間不時引用《論語》、《孟子》，對於產業機械加工製造瞭如指掌，亦具宏觀視野，借鑒德國、美國留學經驗，兼容台灣社會發展現況，規劃清大校務、促進科研產業發展獨具匠心。

消失中的人口紅利

大學是為國家社會培養下一世代的人才，但我們都知道人才競爭力、產業結構都在轉變。校長表示，早期台灣教育有統一師資、統一教材，再施以「聯考」這樣全國一致的標準化測驗，因此學校「規格化教育」所培育出來的學生素質都很整齊，產業界可以依照學歷文憑用人。1980 年代，台灣憑著高 CP 值人力和規格化品質生產線、加上台灣人的勤奮，以加工出口的工業帶動經濟發展，創造台灣的「經濟奇蹟」。

隨著經濟發展，人均所得提升，亦帶動民主化發展，開始注重環境與生活，因此像是勞動成本、環境成本都跟著提高，為因應內部不斷攀升的成本以及人口紅利消失所帶來的衝擊，調整產業結構勢在必行。賀陳校長以宏碁創辦人施振榮先生的「微笑曲線」(smiling curve) 說明台灣產業應朝向研發與行銷兩端發展，以擴大產品附加價值。在產業上中下游，價值最豐厚的區域集中在曲線上揚的兩端——即左側的「技術、創新」和右端的「品牌、服務」等。而微笑曲線下沉的中間地帶，則代表了組裝製造等附加價值最低的領域。微笑曲線理論雖然很簡單，卻很務實地指出台灣產業未來努力的方向。

為了因應產業轉型，我們對產品的需求必須走向客製、少量、講求差異性，因此，從人才端的培育上也要開始多元化。包括師資、教材、評量都要多元化，這對大學來說，就是一項很大的挑戰。

清大合併竹教大轉型為綜合型大學

為了因應產業結構轉變、培育多元人才及少子化衝擊，自 2006 年起國立清華大學和國立新竹教育大學便開始推動兩校的整併案，過程遭遇許多困難，一度暫緩討論。終於在 2016 年在賀陳校長任內完成兩校的合併。校長表示，國內頂大以理工為主，清華是是其中唯一擁有教育學院藝術學院的。和竹教大合併後，增加了藝術學院及教育學院，創造更多元的學習環境。像是藝術給學生想像、跳出框架思考 (out-of-box-thinking)，科技與藝術的對話，對於培養學生品牌設計與行銷能力幫助很大。看到蘋果公司 (Apple Inc.) 主要的獲利端都是在開發與設計，台灣要脫離「毛 (利率) 三到四」、提高獲利能力，就要有自己的創新能力。至於教育學院講的是人的教育與發展，以及傳達和心理等知識，可以用於帶領成員邁向組織目標的達成，培養領導素養。領導的巧拙，影響產業的發展。好的領導者可以領導產品的成功發展，是未來人才必須具備的能力。因此，兩校合併後能發揮加乘互補性效果，整合兩校軟硬體資源，共同發展教學研究與跨領域合作，成為培養科技及人文兼備的大學。

另一方面，國民教育的成敗在於師資的良窳，教師的素質直接影響一個國家的競爭力，亦是一個國家教育發展的重要關鍵。校長提到普魯士為了一雪之前大敗於法國的恥辱，將希望寄托在國民教育上，強化師資並推動義務教育。1870 年普魯士最終在普法戰爭中獲得勝利，得自於高素質的士兵與社會力量。因此，戰爭的勝利不僅僅歸功於戰場上的軍人，更要歸功於默默無聞的普魯士義務教育工作者們，據說普魯士將軍毛奇 (Helmuth Johannes Ludwig von Moltke) 說，「普魯士的勝利早在小學教師的講台上就決定了」。顯見國力強盛，除了船堅砲利，更在於國民素質。而國民素質高低則端視教育品質，而提升教育品質重任就落在教師肩上。培養教師不亞於半導體工程師，清華教育學院對於國家社會是與半導體學院一樣重要。

台灣在日本殖民政府時期，對於中等以上教育，只開放培養醫師的醫學教育及培養初等教師的師範教育，因此，早期台灣的菁英不是醫師、就是老師。爾後台灣的師培制度，有公費制度保障就業，亦持續吸引了很多的優秀人才就讀師範學校。政府為了有效提高教師教學熱忱，故改以透過師資的多元開放，以達成師資的多元和品質的提升，但也產生師資過剩、流浪教師的問題。校長表示，清大與竹教大合併之後，立即增加了學生的就讀意願，反應在清大教育學院的招生上，進而大幅強化了未來教育台灣幼苗的師資，他並且期待未來台灣有愈來愈多的國小校長是畢業於清大。

多元為創新的基礎，是從小父親給他的價值觀

校長的父親賀陳詞為成功大學及東海大學建築系教授，曾參與重建台南市延平郡王祠、整修赤崁樓、設計成功大學校門等重要公共建築，桃李遍布台灣的建築界。從小父親就給他不一樣的價值觀。父親不願意他成為考試機器，在當時小學升初中都要補習的風氣下，反其道而行，小學三年級時，將他轉學到沒有考試也沒有體罰的南師附小。從小告訴他一個觀念：「第二名的學生常常比第一名的學生要值得栽培」，與第一名相較起來，第二名比較有餘裕可以閱讀、運動、思考，和追求長期的價值，可以發展的空間更大、更可以栽培。父親也提到：「小學要小，大學要大」這樣的觀念，則是告訴校長培育人才以小而親切開啟，以大而多元結局。小學生需要密切、細心的照顧，好比照顧幼苗，要細心拔草、除蟲、澆水、轉換盆子，讓幼苗照到太陽，因此規模不要大；大學生則有獨立能力可以照顧自己，需要的是更多的刺激、更廣泛學習的可能性，太少同儕或是領域集中的同儕，學習的機會就會變少。多元就是創新的來源，來自不同背景的學生，更容易激發出新的想法。這就是為什麼國外頂尖的大學會希望盡量吸引全球優秀的學生就讀，除了強調族群的多元性，目的就是增強大學創新的活力。

德國技職教育為技術人才的搖籃、美國學術風氣開放醞釀出創新科技

我們觀察到賀陳校長注重多元教育、全人教育的治校理念，來自於父親的影響。留學德國、美國，回到台灣教書，擔任國科會副主委、清大校長，對於台灣科研發展、產學合作，亦如父親的作品一樣，處處見到中西文化的調和。

校長回憶起到德國念書半年後，為了代步方便，到露天二手車市場去買車，當時是由三個小孩負責賣車，最大的不過 15—16 歲、中間的 11—12 歲，小的大約 9 歲。校長心想自己的德語能力跟小朋友應該是比較可以溝通，只是買賣過程中，校長問了其中 11—12 歲的小朋友：「現在幾年級？念什麼學校？」校長聽不懂小朋友的回覆內容，一度懷疑自己德語能力竟然連小學生的德語也聽不懂，回家查了字典才知道，他說的是在學校學「屠宰」。這對校長來說，是一個很大的文化衝擊，台灣很多的職業教育，是進了社會才學，這也是為什麼很多企業都批評台灣學用落差太大。但在德國，職業教育很早就分流，每個行業都有職業教育和證照制度，學校和職場密切交流，並把產業知識變成業界準則。像是當年進入德國的影印店，店內就有個證照。他們所裝訂的影印紙大小一定是整齊劃一。這些制度的優點是建立規格、產品品質都相當一致，就容易樹立品牌信譽，提高附加價值；缺點則是容易僵化、不夠彈性與創新。

在德國，工程師是經過專業的理論與實務經驗訓練出來的，這樣的職稱受到法律保障，在完成認證程序前，不得使用「Ingenieur」在自己的簡歷中。因此，當我們看到對方畢業頭銜寫著「Ingenieur」，我們都在心中肅然起敬。

校長在德國亞琛工業大學 (RWTH Aachen University) 經過專業的理論與實務經驗訓練，取得相當不容易的國家工程師 (Diplom-Ingenieur) 後，再到美國柏克萊加州大學機械工程學系攻讀博士學位。到了美國，感受到這裡的風氣與德國截然不同，美國的學術風氣開放活潑，較有機會醞釀出前瞻的技術與產品，但相對風險也較大。德國的博士教育，比較像是產業界的工程師或是工研院的研究員，修習課程不是博士研究生的重點，針對產業需求進行研發與實作才是主要的工作。因此，在各研究室書櫃上排列的多是研究報告而不是書籍。

人才培育的產學合作就如同 it takes two to tango

產學研是國家創新系統基本三個部門，產學關係有兩個層面，一是人才培育，另一是技術研發。台灣社會的產業結構與德國很相似，以中小企業為主要經濟體。但台灣的學校制度則主要仿照美國的學術制度，與企業所需人才有所落差。在德國，個別中小企業普遍很難獨力支持研究發展投資，於是形成許多產學聯盟，採用會員制度，共同委託像是德國工研院的 Fraunhofer -Gesellschaft (產業技術研究協會，FhG) 等研究單位，開發新技術、新產品、新工藝，協助他們解決自身創新發展中面臨的各種問題。產業與大學的關係非常密切，針對產業需求進行研發，中小企業的人才晉用訓練也經常連結在聯盟模式上。

美國是以資本龐大的企業為主，由於大公司能獨力完成上游研發到下游生產的所有項目，所以不太需要與大學合作。例如私人企業的貝爾實驗室 (Bell Labs) 是美國的重要研發單位，迄今共有十五位科學家獲得諾貝爾獎。大學對產業而言，是不定期的資訊與創意來源之一，因此美式的產學關係比較淡薄。

校長表示，要解決台灣的學用落差，產學間的合作就如同 it takes two to tango，必須是產業與學校間千絲萬縷的緊密聯繫和積極配對。學校可以設立學分開放學生去實習，但唯有產業端的持續支持，才可以合作培育符合業界所需的人才。一如孟子所說「徒善不足以為政，徒法不能以自行。」，一個人本身具備很好的才華，必須要透過一個妥善的介面，才能夠將才能發揮出來，達到有效益的目的。

技術研發的產學合作，可以是「大、小聯盟」的技術合作

台灣產業結構與德國相似，以中小企業為主，但沒有德國的產學關係密切、根深蒂固的職業教育。人才培育上，校長建議要多建立多元的學習環境、產學共同建立穩定而持續的實習機制。技術研發上，台灣產業不如美國大企業可以自主研發，校長提出的解方，是可以發展如同職業棒球運動系統的「大、小聯盟」的產學合作研發。企業是球隊，學校實驗室的教授是單項教練。當企業發展到某種程度要成為全球領導企業時，所需求的知識領域更多更廣，亦如一支明星球隊要在世界盃奪冠，必定是跑壘、打擊、守備、體能等各個方面都要很強。因此，「大聯盟」指的是一家大企業，例如台積電，延攬多所大學合作，配合企業的發展需要，組織推動研發。

「小聯盟」則是以各大學實驗室為中心，由不同專長的教練，例如打擊教練、跑壘教

授，各別同時協助多支球隊，而不同的球隊，也可依各自需要尋求不同的單項教練協助。這個模式符合台灣中小企業的產業型態和散戶式的大學教師。

以電腦模擬研究專長為例，包括塑膠射出成型的製程進行分析、板金的分析、電控的分析等，協助業界開發產品降低成本。又以材料測試專長為例，可定時提供最新材料趨勢、規格變化等資訊、提供檢測服務，業者就可以低廉的盟員費用即可獲取知識與服務，對企業經營將大有助益。因此，「小聯盟」以一個比較成熟的知識和技術去服務多個企業；若要進一步研發，就另案成立個別研究計畫，如此就可以避免產業間所產生的競爭心結。

過去校長在國科會擔任副主委時，曾設計推動「小聯盟」的策略，陸續有幾百組小聯盟在進行，幫助了幾千家企業，協助範圍玲瑯滿目，從資通訊、化妝品成分檢驗、到種花、養殖漁業的合作等都有。特別是現在知識經濟的發展階段，大學是最新知識匯集之地，對台灣中小企業更是全新的機會。

做我所能，愛我所做

訪談間，校長談笑風生從容道出擔任清大校長一路的甘苦、願景與期待。我們最後問到賀陳校長人生後續的規劃，校長表示，自今 (2023) 年 8 月 1 日即將退休，校長引用清華第一屆遴選校長－沈君山校長所言：「做我所能，愛我所做」來形容之後自身的退休生活。有形的責任沒有了，無形的空間更大。之後的生活就是珍惜時間來繼續做這些所能所愛的事。簡短一句，轉身高貴又典雅。

「自動光學檢測」專題介紹

Special Issue Introduction of “Automated Optical Inspection”

客座主編－陳亮嘉教授

國立臺灣大學機械工程學系特聘教授

自動光學檢測 (Automated Optical Inspection, AOI) 是以機器視覺做為核心，結合光學、電控、機構以及檢測軟體，利用影像技術比對待測物與標準影像，進行各式品管檢測。相對於人工檢測，AOI 系統對於瑕疵判定的標準較為一致，能檢測人眼難以辨識的細節，同時快速篩檢量能也改善了人工目視檢測效率不彰的缺點。隨著消費性電子產品不斷推陳出新，零組件的瑕疵都可能影響產品功能，因此製造業對於提升良率需求與日俱增。緣此，本期以「自動光學檢測」作為專題，介紹自動光學檢測新興技術與應用範圍。

比較代表性的光學檢測技術，包含橢圓偏振法、干涉法、共焦法等方式，各有各的優點及應用。「偏振干涉術應用於折射率、滾轉角位移量測」一文，即提出了一種基於偏振相機之新型偏振干涉儀，可以快速獲得待測物所引入的相位變化，進而推算出特定物理參數之變化。「多層透明板厚度及折射率量測系統」則是解決每層材料相互不平行的問題，透過簡易的光路架構搭配歪斜光線追蹤法，不僅能同時量測多層透明待測物的折射率與厚度，也能量測不平行層的傾斜角度，改善現有技術的不足。「五自由度測量系統的開發與應用」則是自行開發五自由度測量系統，實現同時測量運動軸的定位誤差、直線度誤差以及角度誤差等五自由度幾何誤差。

針對產業需求發展的技術則包含「高深寬比微結構之創新光學散射關鍵尺寸量測技術」，其研究發展出創新之光學關鍵尺寸量測 (OCD) 系統與技術，用以克服先進封裝製程中，具高深寬比之微結構難以使用非破壞性檢測的困境，大幅提升量測之光效率，並在量測範圍上可實現單一結構的量測，避免了現存之光學量測技術限於量測多個結構之平均資訊的缺點。「CIGS 薄膜太陽能板之光致發光自動光學檢測系統開發」設計開發出每片太陽能板可在 60 秒的節拍時間內完成進出料及螢光全波段光譜量測或高解析影像的擷取，在出料的時間內完成檢測分析，同時輸出資料至機器學習系統並預測終端產品發電效能。

鑒於 TFT-LCD 面板的製程檢測仍仰賴人工目測檢查，而且判別標準較為主觀，為此「基於機器視覺與深度學習的面板切割缺陷檢測」一文，則是研究開發 TFT-LCD 面板線上的即時自動光學檢測系統，並且加入深度學習來提升瑕疵檢測的效率，提供影像預測速度效率及準確率。

產品檢測的精準度基本上取決於 AOI 設備對影像之解析度、成像能力以及影像辨析技術。自動光學檢測的細節愈完整，比對的精準性就愈高。盼透過此專刊，在作者群的介紹下，激發讀者們創新的研究想法與方向，共同投入研發與積極合作，強化臺灣光學檢測技術與設備的發展。

多層透明板厚度及折射率量測系統

Design of Thicknesses and Refractive Indices Measurement System for Multilayer Transparent Samples

施玟好、劉建聖

Wen-Yu Shih, Chien-Sheng Liu

在現今代表性的量測方法中，部分技術能測量厚度與折射率，但僅適用於薄板量測或單層特性個別量測，少數能同時測量多層厚度與折射率的技術，皆未考慮每層材料相互不平行的問題。為了改善現有技術的不足，本論文以幾何光學基本定理為基礎，提出一套新穎的光學量測方法，透過簡易的光路架構搭配歪斜光線追蹤法，不僅能同時量測多層透明待測物的折射率與厚度，也能量測不平行層的傾斜角度。

The representative measurement methods, including ellipsometry, interferometry, and confocal methods, can measure the thickness and refractive index of a transparent sample. However, all methods are limited by thickness range and do not consider that one layer may be nonparallel to each other. In order to improve the deficiencies of these techniques, this study proposes a novel optical inspection method based on the fundamental theorem of geometrical optics. Through a simple optical structure, it can measure not only the thicknesses and refractive indices of multilayer transparent samples, but also the inclination angles of nonparallel layer simultaneously.

一、前言

在現今代表性的三項光學檢測技術中，橢圓偏振法⁽¹⁾是藉由分析感測器所接收到的反射光振幅比與相位差，用以計算出待測物的折射率與厚度，但僅適用於數奈米到數微米的薄膜量測，測量成本極高；干涉法⁽²⁾是兩束或以上的光波在空間中重疊時發生干涉，再藉由干涉條紋等訊號判斷待測物位置與尺寸，其可量測的待測物厚度亦受到限制；共焦法⁽³⁾因光在不同深度中具有不同的反射圖譜，透過在不同面上反射光的波長來檢測厚度，但多適用於厚度量測，較少量測材料折射率，且這三種檢測技術都無法量測不平行層的傾斜角度。

然而，同時量測多層樣本的厚度和折射率並不容易，在生物檢測的應用上，顯微鏡下的玻片間夾帶液體樣本，致使上下層玻片不平行，或在玻璃製造業中，複層玻璃與膠合玻璃的

品質檢測方面，都揭示考量材料不平行層的必要性。為了改善現有技術的不足，本論文目的是提出一項新穎的光學量測方法，以幾何光學為基礎，設計簡易的光路架構，搭配歪斜光線追蹤法追蹤光束，不僅能同時量測多層透明材料的折射率與厚度，也能量測不平行層的傾斜角度，且系統架構簡單，能有效降低成本。將本作品模組化後，亦能廣泛使用於光學顯微鏡上，為日後發展生物量測技術鋪路。

本論文與上述三項技術之比較結果如下表 1，在量測多層透明平板的厚度和折射率時，本論文技術與橢圓偏振法皆可量測，而干涉法與共焦法可測量厚度和單層折射率，多層折射率通常須結合其他方法才能量測，例如低同調干涉搭配共軛焦的量測系統，而材料層之間相互不平行形成的傾斜角度，只有本論文技術能作量測，且本量測系統能測量的樣本厚度不侷限於薄膜，因整體架構成本較低，在產品應用普及上，也具有較高的優勢。

表 1. 本論文與相關技術比較表。

	本系統	橢圓偏振法	干涉法	共焦法
多層樣本	可	可	可	可
厚度量測	可	可	可	可
折射量測	可	可	可 (單層)	可 (單層)
傾斜角度量測	可	不可	不可	不可
樣本厚度	厚薄皆可	薄膜	薄膜	厚薄皆可
量測成本	低	極高	高	高

二、本論文所提出之理論方法與架構

本章節介紹與本論文相關的基礎理論，包含齊次座標轉換與歪斜光線追蹤法，透過基礎理論的應用，建立本系統數學模型並推算出待測物的厚度、折射率與傾斜角度，接著介紹量測系統架構與量測的方式，最後透過 SOLIDWORKS 軟體建置實驗架構，再由 ZEMAX 光學模擬軟體來模擬，驗證本系統的可實行性。

1. 齊次座標轉換

齊次座標 (homogeneous coordinate) 是以 $n + 1$ 度空間向量，表示度空間物體座標的方法，其中所增加的元素為一比例因子 (scale factor)，此向量每一元素包含比例因子，乘上一常數時不改變其意義。齊次座標轉換矩陣 (homogeneous coordinate transformation matrix) 為一 4×4 之矩陣，可用於空間中的平移 (translation)、旋轉 (rotation)、放大 (stretching) 及透視 (perspective) 的轉換。本作品使用齊次座標轉換表示各光學元件之邊界，建立光線經過各鏡組邊界之數學模型^(4,5)。

假設三維空間中任一點 P_i 的位置向量為 $P_i = P_{ix}i + P_{iy}j + P_{iz}k$ ，齊次座標理論將此向量表示為 ${}^jP_i = [P_{ix} \ P_{iy} \ P_{iz} \ 1]^T$ ，上標 j 表示此向量相對於 $(xyz)_j$ 座標系。而原點的位置向量表示為 $[0 \ 0 \ 0 \ n]^T$ ，其中 n 為一非零的比例因子，方向向量則表示為 $[a \ b \ c \ 0]^T$ 。

若給定三維空間中一點 jP_k ，可透過矩陣乘積 ${}^iP_k = {}^iA_j {}^jP_k$ 求得位置向量 iP_k ，其中 iA_j 為座標系 $(xyz)_j$ 相對於座標系 $(xyz)_i$ 位置與方向的齊次座標轉換矩陣，三維空間中的齊次座標轉換矩陣可表示為 iA_j ：

$${}^i A_j = \begin{bmatrix} I_{ix} & J_{ix} & K_{ix} & t_{ix} \\ I_{iy} & J_{iy} & K_{iy} & t_{iy} \\ I_{iz} & J_{iz} & K_{iz} & t_{iz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

齊次座標轉換矩陣每一行代表一向量， $[I_{ix} \ I_{iy} \ I_{iz} \ 0]^T$ 、 $[J_{ix} \ J_{iy} \ J_{iz} \ 0]^T$ 、 $[K_{ix} \ K_{iy} \ K_{iz} \ 0]^T$ 分別表示座標系 $(xyz)_j$ 中三座標軸 (x_j, y_j, z_j) 的單位向量在座標系 $(xyz)_i$ 的相對向量，並以 $[t_{ix} \ t_{iy} \ t_{iz} \ 0]^T$ 表示座標系 $(xyz)_j$ 的原點相對於座標系 $(xyz)_i$ 的平移量。

(1) 平移座標轉換矩陣

以 a 、 b 、 c 分別表示座標系 $(xyz)_j$ 相對於座標系 $(xyz)_i$ 的平移量，則可將座標系 $(xyz)_j$ 相對於座標系 $(xyz)_i$ 的平移座標轉換矩陣表示為：

$${}^i A_j = Trans(a, b, c) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

(2) 旋轉座標轉換矩陣

繞軸 X_i 旋轉 Ω_S 角的旋轉座標轉換矩陣可表示為：

$${}^i A_j = Rot(x, \Omega_S) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Omega_S & -\sin \Omega_S & 0 \\ 0 & \sin \Omega_S & \cos \Omega_S & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

繞軸 y_i 旋轉 Ψ_S 角的旋轉座標轉換矩陣可表示為：

$${}^i A_j = Rot(y, \Psi_S) = \begin{bmatrix} \cos \Psi_S & 0 & \sin \Psi_S & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \Psi_S & 0 & \cos \Psi_S & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

繞軸 z_i 旋轉 Φ_S 角的旋轉座標轉換矩陣可表示為：

$${}^i A_j = Rot(z, \Phi_S) = \begin{bmatrix} \cos \Phi_S & -\sin \Phi_S & 0 & 0 \\ \sin \Phi_S & \cos \Phi_S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

由初始座標系 $(xyz)_0$ ，結合平移及旋轉齊次座標轉換矩陣的組合，即齊次座標轉換矩陣的連續乘積，可得最終座標系 $(xyz)_k$ 相對於座標系 $(xyz)_0$ 的轉換矩陣：

$${}^0A_k = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 \cdots {}^{k-1}A_k = \prod_{i=1}^k {}^{i-1}A_i \quad (6)$$

2. 歪斜光線追蹤法

幾何光學是以光線的概念為基礎，簡化複雜的光傳播現象，幾何光學理論多半假設光學系統理想，所有光線皆落在近軸區，可利用近軸光學理論等方法建立光追跡模型，例如：三角測距，但實際上大部分光學系統的光線並非皆在近軸區。當光學系統的視界已超出近軸區許多時，實際成像的大小和位置與理想成像會有所差異，此差異即為像差 (aberration)。在幾何光學中，歪斜光線是最接近真實情況的光線路徑，因此 Lin 等人藉由齊次座標轉換定義元件的座標系，發展出矩陣式歪斜光線追跡法，建立精確光學系統模式⁽⁴⁾。本章節提及之基礎理論的實際應用以及數學推導，將在後續章節做詳細介紹。

3. 量測系統架構

本論文所提多層透明材料之厚度與折射率量測系統主要由兩系統構成：量測系統 (measurement system) 和自動對焦系統 (auto-focusing system)，如圖 1 所示。設計的量測樣本為多層堆疊的透明平板 (multilayer sample)，量測目標為各層的厚度與折射率，又因空氣或水等流體會影響上層樣本是否平行於下層樣本⁽⁶⁾，所以也測量了不平行層的傾斜角度⁽⁷⁾。

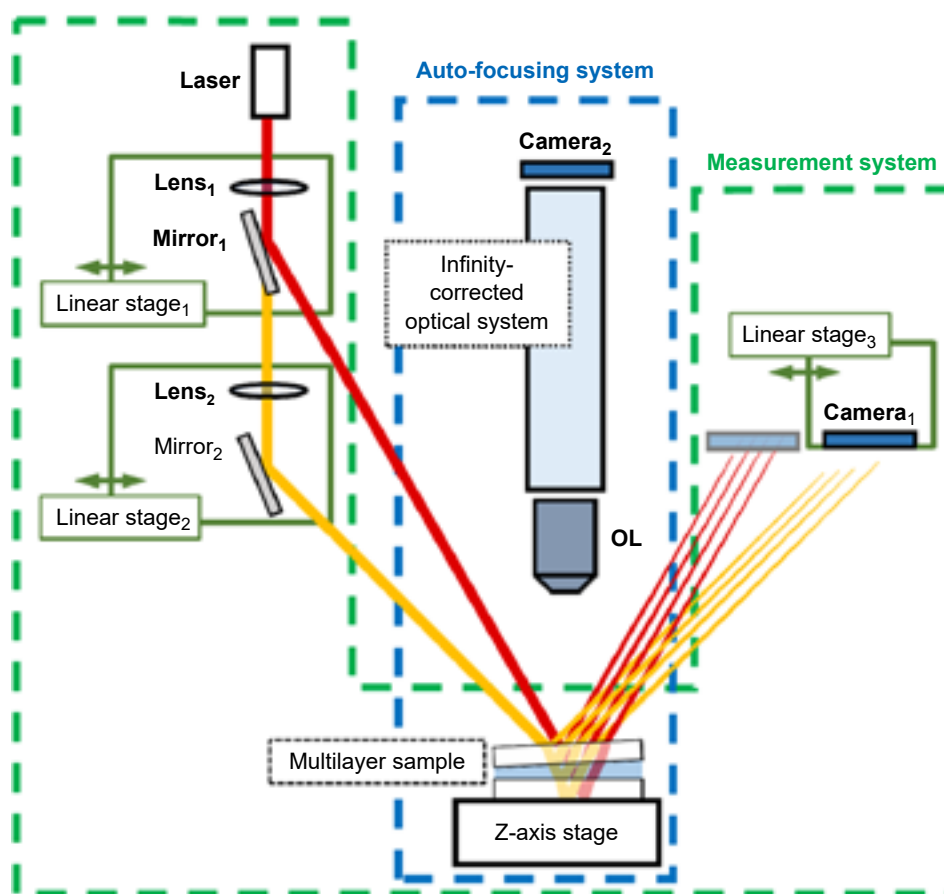


圖 1. 本論文所提量測系統架構圖。

說明多層透明材料之厚度與折射率的量測方法，檢測樣品以三層透明材料為例，在實際應用中，因空氣或水等流體層會影響每層介面是否相互平行，除了各層之折射率與厚度外，亦須量測介面的傾斜角度，此處以第二層材料傾斜為例，模擬生物玻片中的液態物質，推導數學模型。

量測光束以入射角 θ 進入多層待測物，示意圖如圖 2 所示，下層樣本的底部置於 XY 平面上，座標原點定義在實驗治具中心，以 (n_1, n_2, n_3) 分別表示上中下層待測物的折射率，以 (t_1, t_2, t_3) 分別表示上中下層待測物的厚度，傾斜角度導致中層各位置厚度不一，因此將各層厚度定義為 Z 軸與上下介面交點的最短距離，以 (Ω, Φ) 分別表示上介面對 X 軸旋轉角度與對 Z 軸旋轉角度。

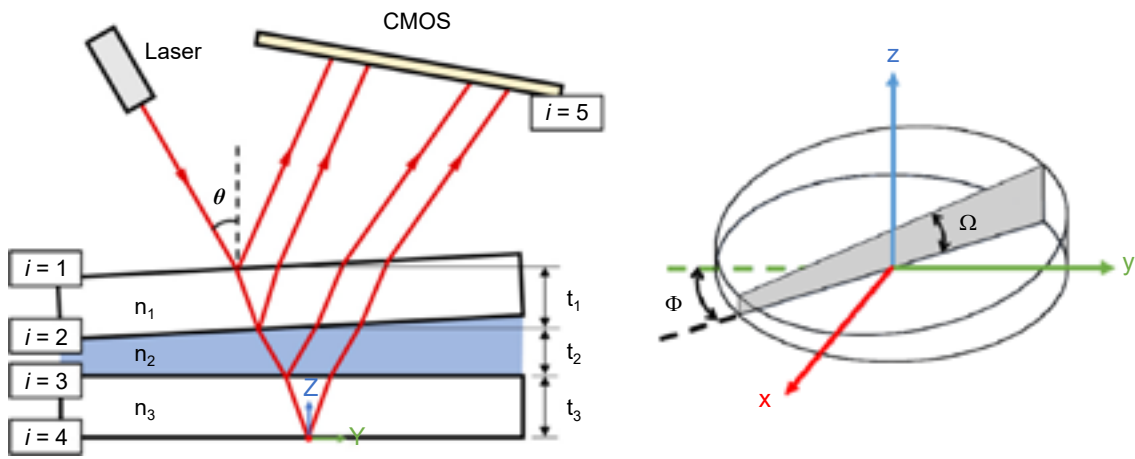


圖 2. 本論文所提量測參數圖。

數學模型以歪斜光線追跡法推導，在此過程中皆是以世界座標系 $(xyz)_R$ 作為整體系統的參考座標系，因此必須以齊次座標轉換矩陣 ${}^R A_i$ 將相對於第 i 座標系轉換至相對於世界座標 $(xyz)_R$ 系中。首先在系統空間中定義一個世界座標系 $(xyz)_R$ ，定義光線經過之各光學邊界面，由行經順序編號，而光學邊界面座標系 $(xyz)_i$ 相對於世界座標系 $(xyz)_R$ 的轉換矩陣 ${}^R A_i$ 可表示為：

$${}^R A_i = \begin{bmatrix} I_{ix} & J_{ix} & K_{ix} & t_{ix} \\ I_{iy} & J_{iy} & K_{iy} & t_{iy} \\ I_{iz} & J_{iz} & K_{iz} & t_{iz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

各邊界面座標系 $(xyz)_i$ 相對於世界坐標系 $(xyz)_R$ 的齊次座標轉換矩陣之參數如表 2 所示。設定雷射源座標系 $(xyz)_0$ 涵蓋雷射源安裝誤差，定義雷射點光源之位置向量 ${}^0 \bar{P}_0$ 及單位方向向量 ${}^0 \bar{\ell}_0$ 如下：

$${}^0 \bar{P}_0 = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]^T \quad (8)$$

$${}^0 \bar{\ell}_0 = [0 \quad 0 \quad -1 \quad 0]^T \quad (9)$$

表 2. 表面邊界之座標轉換矩陣對照表之一。

i	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$
Element	Sample	Sample	Sample	Sample	CMOS
N_i	$\frac{n_{air}}{n_1}$ or $\frac{n_1}{n_{air}}$	$\frac{n_1}{n_2}$ or $\frac{n_2}{n_1}$	$\frac{n_2}{n_3}$ or $\frac{n_3}{n_2}$	reflected	
I_{ix}	$\cos \Phi$	$\cos \Phi$	1	1	1
I_{iy}	$\sin \Phi$	$\sin \Phi$	0	0	0
I_{iz}	0	0	0	0	0
J_{ix}	$-\sin \Phi \cos \Omega$	$-\sin \Phi \cos \Omega$	0	0	0
J_{iy}	$\cos \Phi \cos \Omega$	$\cos \Phi \cos \Omega$	1	1	$\cos 150^\circ$
J_{iz}	$\sin \Omega$	$\sin \Omega$	0	0	$\sin 150^\circ$
K_{ix}	$\sin \Phi \sin \Omega$	$\sin \Phi \sin \Omega$	0	0	0
K_{iy}	$-\cos \Phi \sin \Omega$	$-\cos \Phi \sin \Omega$	0	0	$-\sin 150^\circ$
K_{iz}	$\cos \Omega$	$\cos \Omega$	1	1	$\cos 150^\circ$
t_{ix}	0	0	0	0	-0.36
t_{iy}	0	0	0	0	25.56/50.56
t_{iz}	$t_1 + t_2 + t_3$	$t_2 + t_3$	t_3	0	60.43

矩陣 ${}^R A_0$ 作為雷射源誤差矩陣，因此包含安裝誤差之雷射源相對於世界座標系 $(xyz)_R$ 的位置向量 ${}^R \bar{P}_0$ 及單位方向向量 ${}^R \bar{\ell}_0$ 可表示為：

$${}^R \bar{P}_0 = {}^R A_0 {}^0 \bar{P}_0 \quad (10)$$

$${}^R \bar{\ell}_0 = {}^R A_0 {}^0 \bar{\ell}_0 \quad (11)$$

因雷射光經過的介面皆為平坦邊界，根據理論，在定義完多層待測物的各表面後，開始追跡光線行經各邊界的入射點，依照以下算式依序追跡各表面至 CMOS 上：

$${}^R \bar{P}_i = {}^R \bar{P}_{i-1} + \lambda_i {}^R \bar{\ell}_{i-1} \quad (12)$$

$${}^i \bar{P}_i = {}^R A_i^{-1} ({}^R \bar{P}_{i-1} + \lambda_i {}^R \bar{\ell}_{i-1}) = {}^R A_i^{-1} {}^R \bar{P}_i \quad (13)$$

其中，式 (12) 與式 (13) 中的 λ_i 表示為光源 P_{i-1} 至入射點 P_i 向量大小。

邊界表面上入射點之光線單位方向向量依照以下算式得知：

$${}^i \bar{v}_i = s_i [0 \ 0 \ 1 \ 0]^T \quad (14)$$

$${}^R \bar{v}_i = {}^R A_i {}^i \bar{v}_i \quad (15)$$

$$C\theta_i = |\bar{\ell}_{i-1} \cdot {}^R \bar{v}_i| \quad (16)$$

$$\bar{\ell}_i = \begin{bmatrix} \ell_{ix} \\ \ell_{iy} \\ \ell_{iz} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ell_{i-1x} + 2v_{ix}C\theta_i \\ \ell_{i-1y} + 2v_{iy}C\theta_i \\ \ell_{i-1z} + 2v_{iz}C\theta_i \\ 0 \end{bmatrix} = \bar{\ell}_{i-1} + 2^R \bar{v}_i C\theta_i \quad (17)$$

$$\bar{\ell}_i = \begin{bmatrix} \ell_{ix} \\ \ell_{iy} \\ \ell_{iz} \\ 0 \end{bmatrix} = {}^R \bar{v}_i \left(N_i C\theta_i - \sqrt{1 - N_i^2 + (N_i C\theta_i)^2} \right) + N_i \bar{\ell}_{i-1} \quad (18)$$

單位法向量 ${}^i \bar{v}_i$ 可能位在兩側，而具備兩個相反方向的向量，所以可能為 -1 或 $+1$ ，則以式 (14) 是否大於零為依據來決定 s_i 的正負。而式 (16) 中的三角函數 $\cos$ 以 C 表示，後續數學式也以此簡化表示三角函數。

若所求為反射光線之單位方向向量，則依照式 (17)；若為折射光線，則依照式 (18)。依照歪斜光線追跡法建立數學模型時，由前一個邊界上的入射點位置和光線方向向量追跡至下一個邊界上的入射點位置，並計算經過該邊界後反射光或折射光的新方向向量，不斷重複上述步驟，直到追跡至感測器為止。

三層透明材料有四個平坦邊界面 ($i = 1 \sim 4$)，量測光線經過邊界面會分別產生反射光線與折射光線，最終在感測器上會接收到相對應平面反射回來的四個光斑，以 ($Spot_1, Spot_2, Spot_3, Spot_4$) 分別表示。每個光斑行經的路徑不同，當追跡介面 $i = 1$ 對應的光斑 $Spot_1$ 時，量測光線入射至介面 $i = 1$ ，經過該邊界後轉為反射光，再追跡至感測器；當追跡介面 $i = 2$ 對應的光斑 $Spot_2$ 時，量測光線先入射至介面 $i = 1$ 後轉為折射光，再入射至介面 $i = 2$ 後轉為反射光，接著入射至介面 $i = 1$ 後轉為折射光，最後到達感測器上，其餘光斑以此類推，經過邊界面後為反射光或折射光可對照表 3 來判斷追跡的光線路徑。

表 3. 各光斑行經介面的反射或折射現象對照表。

Sequence	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 3$	$i = 2$	$i = 1$
$Spot_1$	reflect						
$Spot_2$	refract	reflect					refract
$Spot_3$	refract	refract	reflect			refract	refract
$Spot_4$	refract	refract	refract	reflect	refract	refract	refract

光線最終到達感測器 CMOS 後，可分別得到四個光斑的位置資訊，表示為感測器讀值對量測目標之函數，如以下八條方程式：

$$X_1 = f_1(t_1, t_2, t_3, \Omega, \Phi) \quad (19)$$

$$Y_1 = f_2(t_1, t_2, t_3, \Omega, \Phi) \quad (20)$$

$$X_2 = f_3(n_1, t_1, t_2, t_3, \Omega, \Phi) \quad (21)$$

$$Y_2 = f_4(n_1, t_1, t_2, t_3, \Omega, \Phi) \quad (22)$$

$$X_3 = f_5(n_1, n_2, t_1, t_2, t_3, \Omega, \Phi) \quad (23)$$

$$Y_3 = f_6(n_1, n_2, t_1, t_2, t_3, \Omega, \Phi) \quad (24)$$

$$X_4 = f_7(n_1, n_2, n_3, t_1, t_2, t_3, \Omega, \Phi) \quad (25)$$

$$Y_4 = f_8(n_1, n_2, n_3, t_1, t_2, t_3, \Omega, \Phi) \quad (26)$$

由理論得知，光的折反射相依於點光源 $\bar{P}_{i-1}$ 、入射光線 $\bar{\ell}_{i-1}$ 、邊界法向量 $\bar{v}_i$ 和相對折射率 N_i ，若量測光線由同一點光源射出，同一入射角 θ_1 射入多層待測物，經過四個邊界面，生成的每個光斑行經路徑會部分重合，八條方程式中部分方程式相依，不足以解出所求的八個未知數。因此，增加另一道量測光線由另一點光源射出，並以不同入射角度 θ_2 射入多層待測物，感測器擷取的光斑數量增加為八個，方程式數量增加為十六條，方能解出所求的八個未知數 $(n_1, n_2, n_3, t_1, t_2, t_3, \Omega, \Phi)$ 。

本論文設計以不同入射角 (θ_1, θ_2) 的兩光線量測多層透明材料，如圖 3 所示，兩道光分別以兩色標示，光在影像感測器 CMOS 上的成像如圖 4 所示，八個光斑可推得十六條方程式 (X_{a_b}, Y_{a_b}) ， $a(a=1\sim4)$ 表示四個邊界面反射的四個光斑，由反射的介面 i 依序編號，對應式 (19) 至式 (26)， $b(b=1\sim2)$ 表示兩道量測光線。

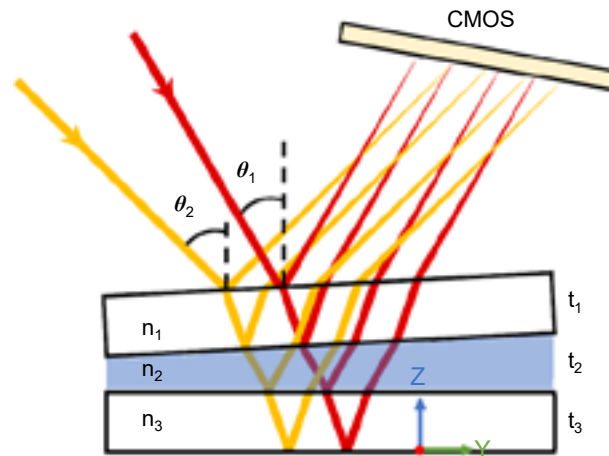


圖 3. 本論文所提量測示意圖。

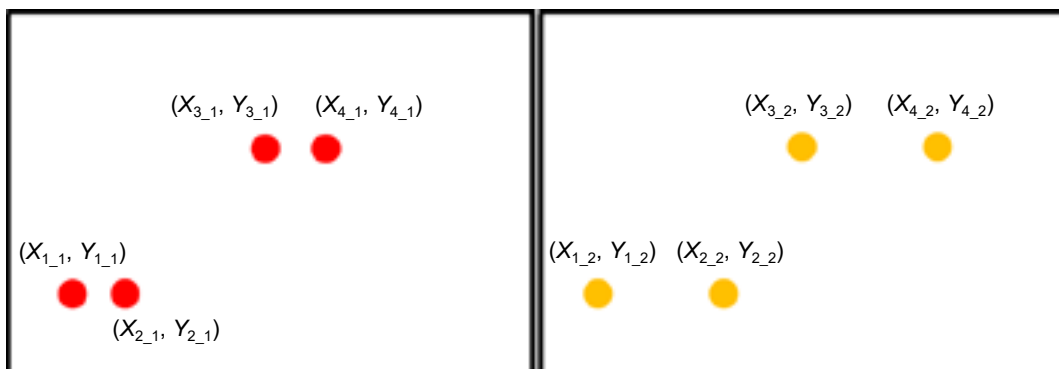


圖 4. CMOS 擷取影像示意圖。

舉另一樣檢測樣品為例，假設三層待測物上下層不是平行玻片，而是有角度的楔形，在實際應用中也可能遇到此情境，如圖 5 所示，介面 ($i = 1 \sim 3$) 相對於 XY 平面皆存在兩個傾斜角度，各邊界面座標系 $(xyz)_i$ 相對於世界坐標系 $(xyz)_R$ 的齊次座標轉換矩陣之參數如表 4 所示，而所求的未知數由八個增加為十二個 ($n_1, n_2, n_3, t_1, t_2, t_3, \Omega_1, \Phi_1, \Omega_2, \Phi_2, \Omega_3, \Phi_3$)，量測方法皆與前面的說明相同。

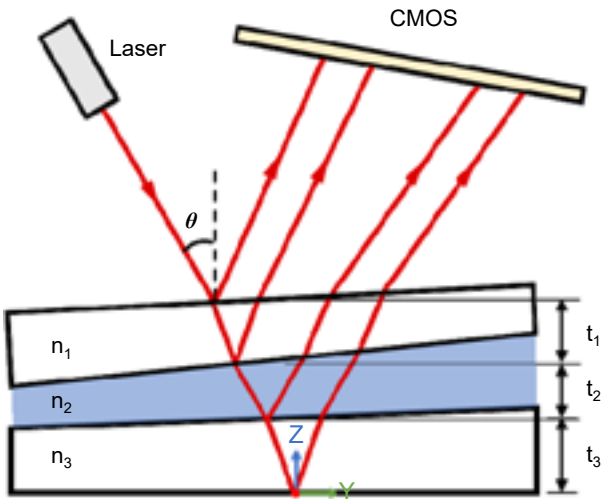


圖 5. 楔形玻片待測物。

表 4. 表面邊界之座標轉換矩陣對照表之二。

i	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$
Element	Sample	Sample	Sample	Sample	CMOS
N_i	$\frac{n_{air}}{n_1}$ or $\frac{n_1}{n_{air}}$	$\frac{n_1}{n_2}$ or $\frac{n_2}{n_1}$	$\frac{n_2}{n_3}$ or $\frac{n_3}{n_2}$	reflected	
I_{ix}	$\cos \Phi_1$	$\cos \Phi_2$	$\cos \Phi_3$	1	1
I_{iy}	$\sin \Phi_1$	$\sin \Phi_2$	$\sin \Phi_3$	0	0
I_{iz}	0	0	0	0	0
J_{ix}	$-\sin \Phi_1 \cos \Omega_1$	$-\sin \Phi_2 \cos \Omega_2$	$-\sin \Phi_3 \cos \Omega_3$	0	0
J_{iy}	$\cos \Phi_1 \cos \Omega_1$	$\cos \Phi_2 \cos \Omega_2$	$\cos \Phi_3 \cos \Omega_3$	1	$\cos 150^\circ$
J_{iz}	$\sin \Omega_1$	$\sin \Omega_2$	$\sin \Omega_3$	0	$\sin 150^\circ$
K_{ix}	$\sin \Phi_1 \sin \Omega_1$	$\sin \Phi_2 \sin \Omega_2$	$\sin \Phi_3 \sin \Omega_3$	0	0
K_{iy}	$-\cos \Phi_1 \sin \Omega_1$	$-\cos \Phi_2 \sin \Omega_2$	$-\cos \Phi_3 \sin \Omega_3$	0	$-\sin 150^\circ$
K_{iz}	$\cos \Omega_1$	$\cos \Omega_2$	$\cos \Omega_3$	1	$\cos 150^\circ$
t_{ix}	0	0	0	0	-0.36
t_{iy}	0	0	0	0	25.56/50.56
t_{iz}	$t_1 + t_2 + t_3$	$t_2 + t_3$	t_3	0	60.43

最後進行模擬，證明此量測方法可以應用在更多情況，求解的未知數也不受限於八個，其他可能發生的情況還有層數增加，每增加一層待測物，就會增加一個邊界面與一個光

斑，未知數至少增加該層的折射率與厚度，由邊界表面是否傾斜來決定是否需要定義更多參數。

本論文目的是量測材料與厚度都未知的多層待測物，在無法判斷邊界表面是否傾斜的情況下，建議先定義為傾斜，倘若實際是表面平行於 XY 平面，算出來的角度 Ω 會趨近於 0 ，角度 Φ 則在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之間皆有可能，因為角度 Ω 極小就表示表面幾近平行，並不影響量測結果。

4. 影像處理

本論文會對單色照相機擷取畫面進行影像處理，包含二值化、形態學、重心計算等，以利後續計算厚度、折射率和傾斜角度。重心計算是用來判斷光斑重心的運算法，在座標 (i, j) 像素點的強度值以 P_{ij} 表示，作為權重與其所在位置相乘，再除以影像像素強度值的總和，可以得到該光斑重心所在的位置 $(x_{centroid}, y_{centroid})$ ，運算式如下：

$$x_{centroid} = \frac{\sum \sum x P_{ij}}{\sum \sum P_{ij}} \quad (27)$$

$$y_{centroid} = \frac{\sum \sum y P_{ij}}{\sum \sum P_{ij}} \quad (28)$$

5. 量測方式

本論文所提量測系統架構如圖 6 所示，量測流程如圖 7 所示。

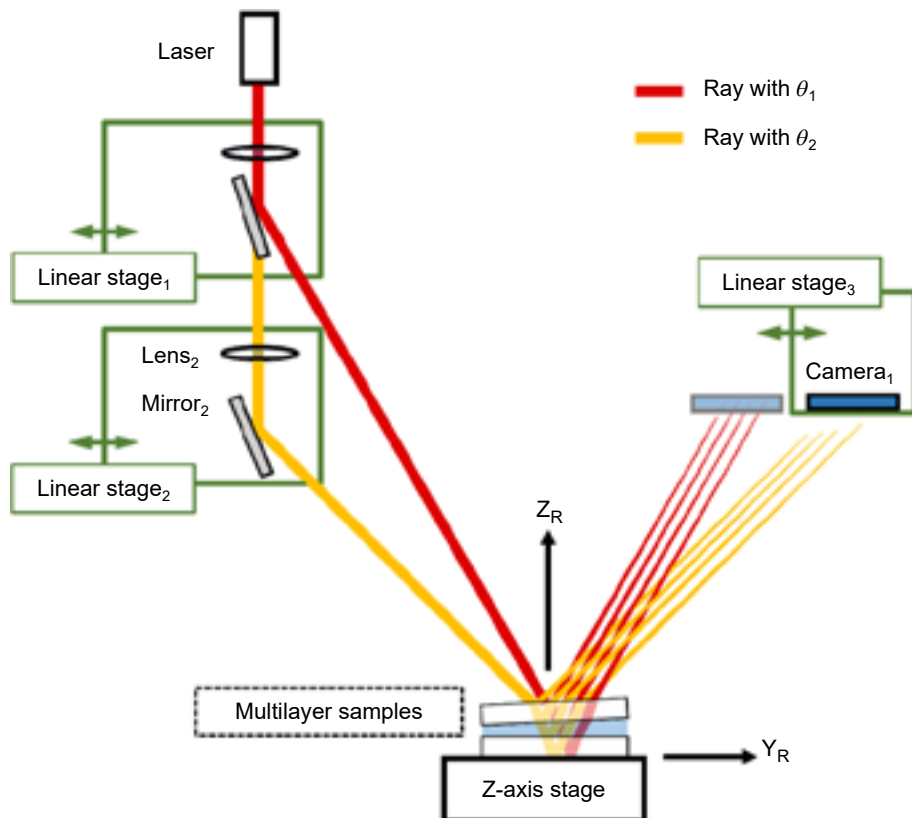


圖 6. 本論文所提量測系統架構圖。

在架設完量測系統並對系統做安裝誤差的補償後，將多層透明待測物置於 Z 軸位移平台上，即可進行量測。首先由雷射二極體 Laser 射出光線，經過準直透鏡後以平行光前進，透過移動兩線性位移平台 (Linear stage₁, Linear stage₂) 生成量測所需的兩束不同入射角度的光。入射角 θ_1 的光線是移動 Linear stage₁ 至路徑上，使雷射光通過聚焦透鏡 Lens₁ 和平面反射鏡 Mirror₁，透過傾斜的反射鏡改變光前進方向，光線以入射角 θ_1 進入待測物，再由 Linear stage₃ 移動影像感測器 Camera₁ 至適當位置，擷取影像並記錄光斑位置訊號。入射角 θ_2 的光線是將 Linear stage₁ 移開並將 Linear stage₂ 移至路徑上，使雷射光通過聚焦透鏡 Lens₂ 和平面反射鏡 Mirror₂，光線以入射角 θ_2 進入待測物，重複同樣步驟擷取影像訊號。

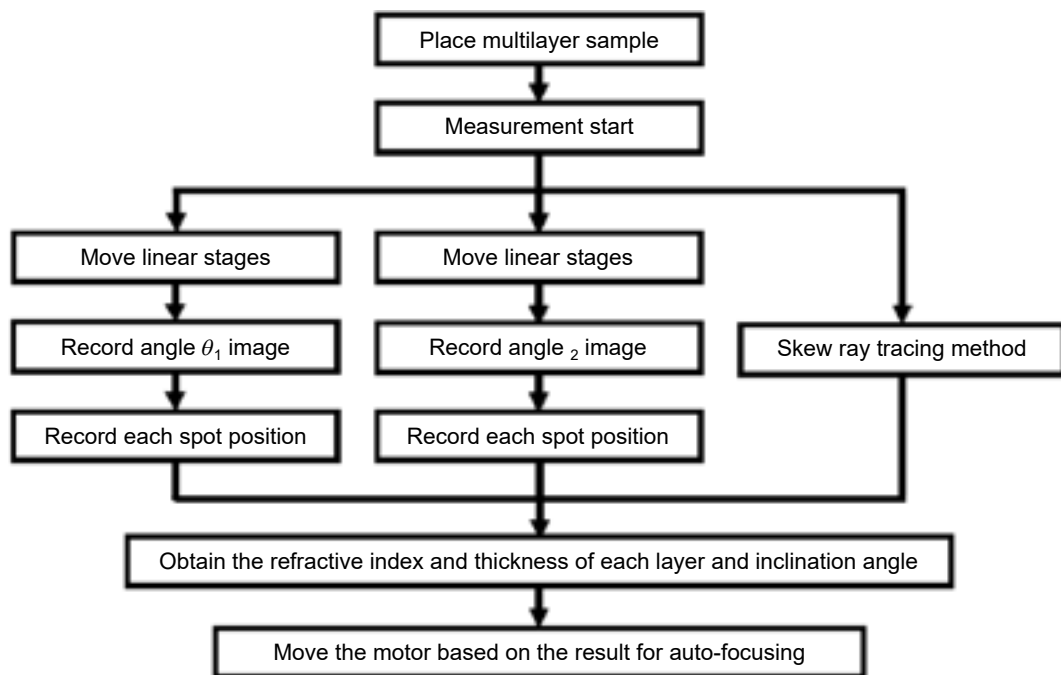


圖 7. 量測流程圖。

將系統座標與雷射源座標代入數學模型中，可以追跡到光線行經軌跡和感測器上八個光斑的理想值，將正向運算得到的理想讀值與 Camera₁ 讀取的實際讀值代入方程式中，令其差值為零，並使用 MATLAB 的函數 fsolve 逆向求解出多層厚度、折射率與傾斜角度。

再由已知訊息計算出待測物的離焦距離，並輸入至 Z 軸位移平台，透過精密位移平台升降，進行對目標平面的自動對焦，由同軸視覺設備與影像感測器可以即時觀察對焦效果，亦可即時擷取對焦畫面。

三、數值模擬與實驗結果

1. 實驗模擬

透過 SOLIDWORKS 繪圖軟體建置實驗架構，如圖 8 所示，由模擬建立參考座標系 $(xyz)_R$ ，並量測各元件的座標，代入後續的分析中。

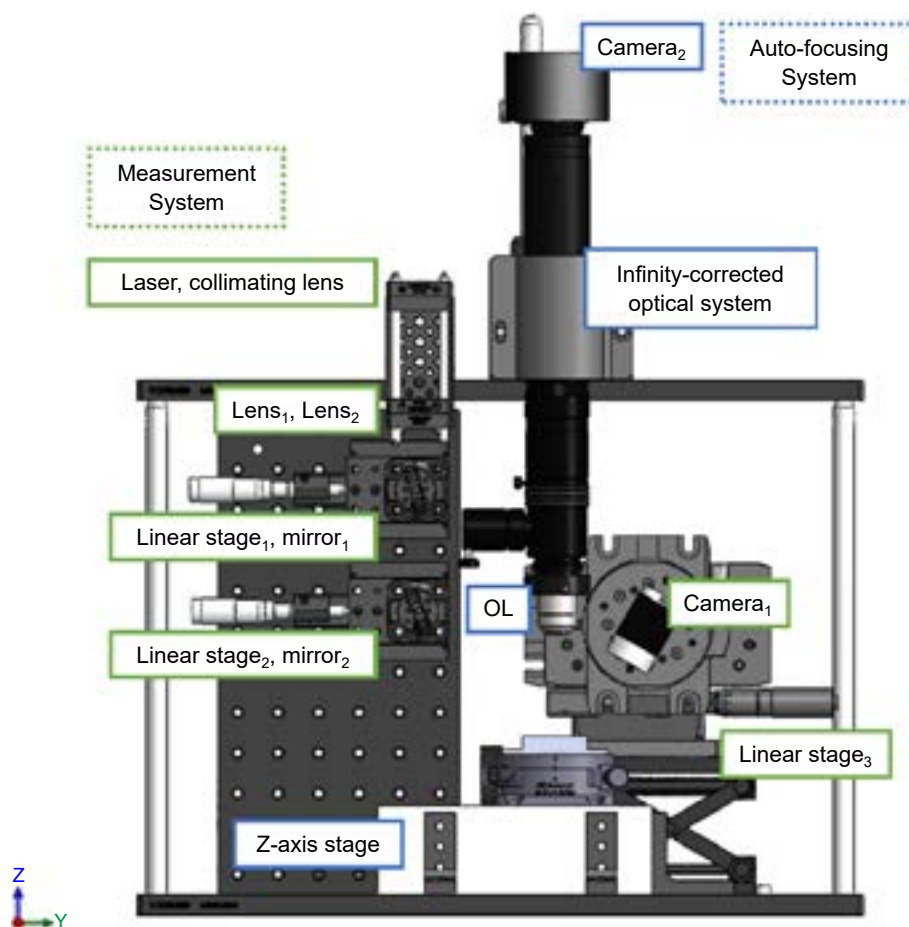


圖 8. SOLIDWORKS 架構平面圖。

透過 ZEMAX 光學模擬軟體來驗證此系統的可行性，以非序列模式建立量測系統架構。首先，設定雷射光源為高斯光源，波長設定為 658 nm，並依照實驗室環境來設定環境參數。再者，輸入各個光學元件的模型圖檔，設定參數包含位置、尺寸、材質與膜層等，如圖 9 所示。

由 ZEMAX 的感測器擷取兩張影像，即為不同入射角射入待測物後，經各介面反射回到感測器的光斑影像，由於每張影像的光斑數大於一，無法使用內建評價函數編輯器取得光點位置資訊，因此輸出影像矩陣表，其行列數為感測器 XY 方向的像素數，每格內的數據代表該像素的光強值。將影像矩陣輸入至 MATLAB 處理，流程如圖 10 所示，首先將影像矩陣檔案儲存為 Excel 格式，由 MATLAB 讀取入射角 θ_1 對應的像素表格，接著將所有像素點以座標 (i, j) 編號，並紀錄有接受到光的像素座標。

透過 DBSCAN 分群法，首先決定距離，以其中一偵測到光的像素點為圓心和這個距離為半徑畫圓，用其他像素有無被包含在圓內來判斷是否同群，再決定最少點數，代表群內樣本數大於最少點數稱為一群，將感測到光的像素分群。K-medoids 分群法先決定要分成 k 個聚類，並隨機選擇 k 個點作為群心，這些群心必須為實際樣本點，接著計算每個樣本點與群心之間的距離，以此為標準將 n 個點分類到最近的群，接著每個聚類計算其樣本點之間的距離，選擇距離和最小的樣本點為新群心，以新的群心為標準重新分群，當分群與群集中心不再改變時即完成。

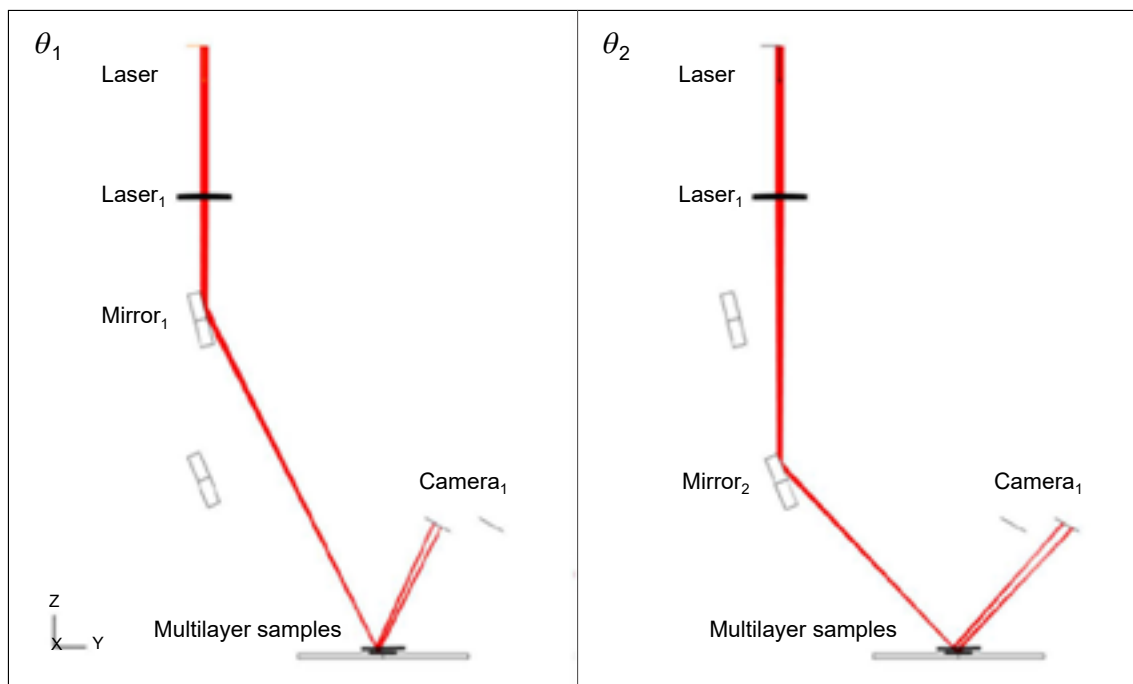


圖 9. ZEMAX 模擬架構圖。

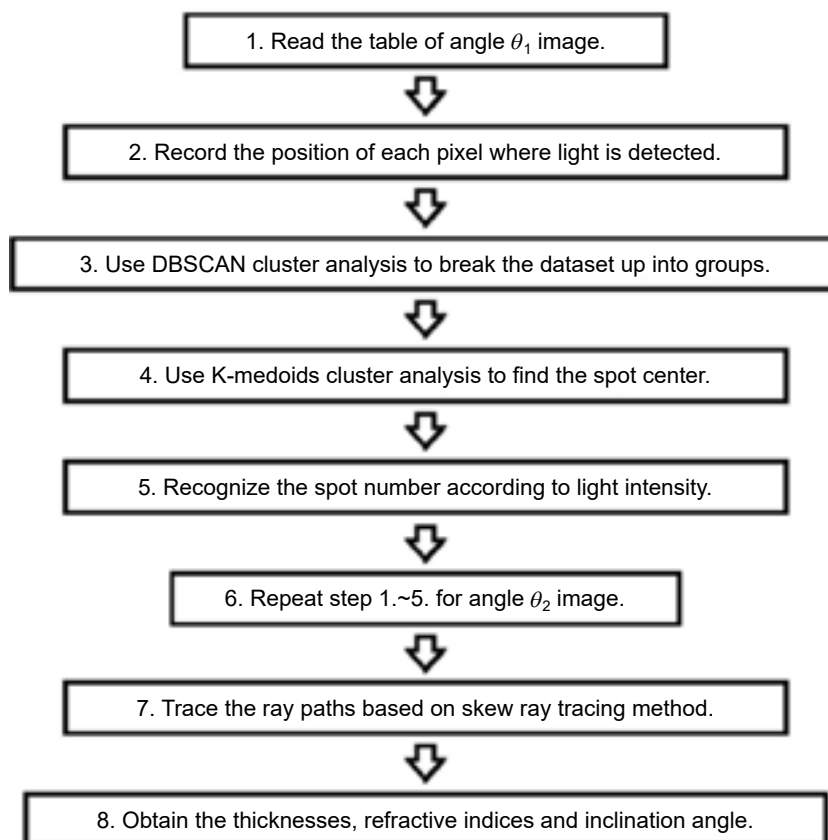


圖 10. MATLAB 分析流程圖。

DBSCAN 分群法將有接受到光的像素座標依序分成數群，其優點是每次分群皆依相同順序分群，分群結果與聚類編號固定，缺點則是無法直接找出群心。在已知群數後，使用 K-medoids 分群法來計算群心位置，其優點是可直接找出群心，缺點則是須事先知道群數，且隨機分群使聚類編號不固定，影響後續步驟。同時使用兩分群法，可相互彌補缺點，取其優點找出四個光斑的群心位置。

依照光斑的光強值，可使程式自動辨識出每層介面對應到的光斑，將介面編號與聚類編號匹配，接著對另一入射角的像素表格重複上述步驟，可得八個光斑位置。以歪斜光線追跡法追跡出光線軌跡，並利用 MATLAB 內建函數 fsolve 解出所求的各層厚度、折射率與傾斜角度。

在光學模擬前列出所有實驗可能的待測物組合並進行模擬，五組模擬結果如下：

表 5. 模擬誤差表。

		n_1	n_2	n_3	t_1 (mm)	t_2 (mm)	t_3 (mm)	Ω (°)	Φ (°)
#1	理論值	1.7648	1.0000	1.7648	1.0000	1.1746	1.0000	1.0000	60.0000
	模擬值	1.7661	1.0000	1.7519	1.0007	1.1879	0.9915	0.9970	60.3179
	誤差值	0.0013	0.0000	-0.0129	0.0007	0.0133	-0.0085	-0.0030	0.3179
	百分比	0.07%	0.0000	-0.73%	0.07%	1.13%	-0.85%	-0.30%	0.53%
#2	理論值	1.7648	1.0000	1.7648	2.0000	1.1746	1.0000	1.0000	60.0000
	模擬值	1.8011	1.0001	1.6796	2.0481	1.1787	0.9451	0.9992	60.1123
	誤差值	0.0363	0.0001	-0.0852	0.0481	0.0041	-0.0549	-0.0008	0.1123
	百分比	2.06%	0.01%	-4.83%	2.40%	0.35%	-5.49%	-0.08%	0.19%
#3	理論值	1.7648	1.3300	1.7648	1.0000	1.1746	1.0000	1.0000	60.0000
	模擬值	1.7136	1.3316	1.7773	0.9682	1.2049	1.0062	0.9969	60.2921
	誤差值	-0.0512	0.0016	0.0125	-0.0318	0.0303	0.0062	-0.0031	0.2921
	百分比	-2.90%	0.12%	0.71%	-3.18%	2.58%	0.62%	-0.31%	0.49%
#4	理論值	1.4563	1.0000	1.7648	1.0000	1.1746	1.0000	1.0000	60.0000
	模擬值	1.4817	1.0004	1.7177	1.0227	1.1823	0.9700	0.9982	60.193
	誤差值	0.0254	0.0004	-0.0471	0.0227	0.0077	-0.0300	-0.0018	0.1930
	百分比	1.74%	0.04%	-2.67%	2.27%	0.66%	-3.00%	-0.18%	0.32%
#5	理論值	1.4563	1.0000	1.7648	2.0000	1.1746	1.0000	1.0000	60.0000
	模擬值	1.4729	1.0004	1.7064	2.0287	1.1848	0.9626	0.9977	60.2261
	誤差值	0.0166	0.0004	-0.0584	0.0287	0.0102	-0.0374	-0.0023	0.2261
	百分比	1.14%	0.04%	-3.31%	1.44%	0.87%	-3.74%	-0.23%	0.38%

觀察上表可知，每層折射率的誤差平均在 0.0852 以下，前兩層的誤差平均在 0.0512 以下，在測量未知材料的待測物時，折射率已經足以辨識出該玻片為何種材料，每層厚度的誤差平均在 0.0549 mm 以下，前兩層的誤差平均在 0.0481 mm 以下，傾斜角度 Ω 的誤差平均小於 0.0031°，而傾斜角度 Φ 的誤差平均較大至 0.3179°。上述模擬結果可以驗證本系統的可行性，誤差皆在可接受範圍內，值得注意的是在厚度與折射率的部分，第三層的誤差較前兩層的誤差大，對 Z 軸傾斜角度 Φ 的誤差也大於對 X 軸傾斜角度 Ω 。

2. 實驗系統校正

所有轉換矩陣參數是依據表 4 之系統設計值，但實際實驗上仍存在許多安裝誤差，此安裝誤差對實驗結果影響極大，因此在實驗前需對系統架構做安裝誤差的校正，以校正表 4 之參數。每個元件皆有三個平移和三個旋轉誤差，此處考慮雷射光源、兩個角度的反射鏡和感測器四項元件，共二十四項安裝誤差，流程如圖 11 所示。

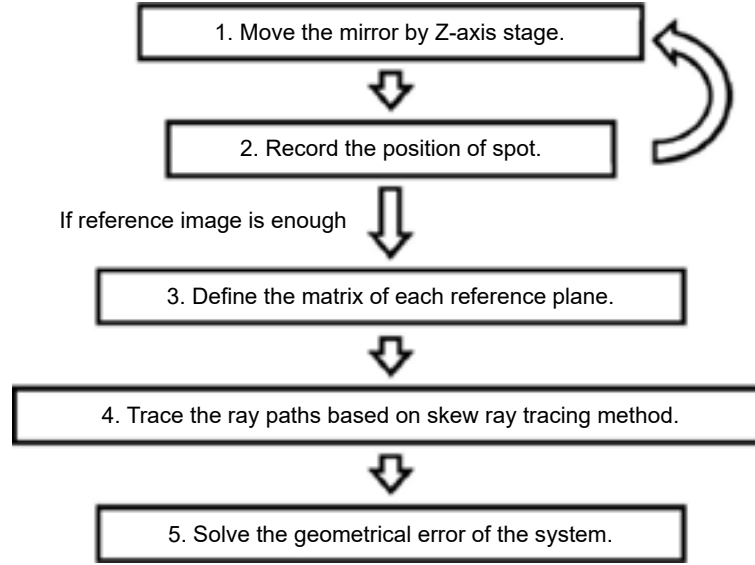


圖 11. 校正流程圖。

首先，定義參考項為參考平面，在未放置待測物時，光束會經治具底部的反射鏡反射回感測器，反射面為在 $Z = 0$ 與 XY 平面平行之平面，藉由 Z 軸位移平台的升降，改變反射面的位置，光斑位置隨之變化，示意圖如圖 12 所示，平面轉換矩陣 ${}^R A_i$ 可表示為：

$${}^R A_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

根據理論，追跡光線軌跡至 CMOS 上，依照以下算式：

$${}^i \bar{P}_i = {}^R A_i^{-1} \left({}^R \bar{P}_{i-1} + \lambda_i {}^R \bar{\ell}_{i-1} \right) = {}^R A_i^{-1} {}^R \bar{P}_i \quad (30)$$

$${}^R \bar{v}_i = {}^R A_i {}^i \bar{v}_i \quad (31)$$

$$\bar{\ell}_i = \begin{bmatrix} \ell_{ix} \\ \ell_{iy} \\ \ell_{iz} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ell_{i-1x} + 2v_{ix}C\theta_i \\ \ell_{i-1y} + 2v_{iy}C\theta_i \\ \ell_{i-1z} + 2v_{iz}C\theta_i \\ 0 \end{bmatrix} = \bar{\ell}_{i-1} + 2 {}^R \bar{v}_i C\theta_i \quad (32)$$

紀錄每個參考平面 Z 軸座標與對應光斑的座標，重複步驟 1.2. 直到參考項足夠，兩道光射入參考平面反射可得四條方程式，二十四項未知數需六個參考平面，接著與前章方法相同，建立數學模型並追跡光線，逆向解出各項安裝誤差值，最後將安裝誤差補回量測系統的數學模型中，完成實驗系統校正。

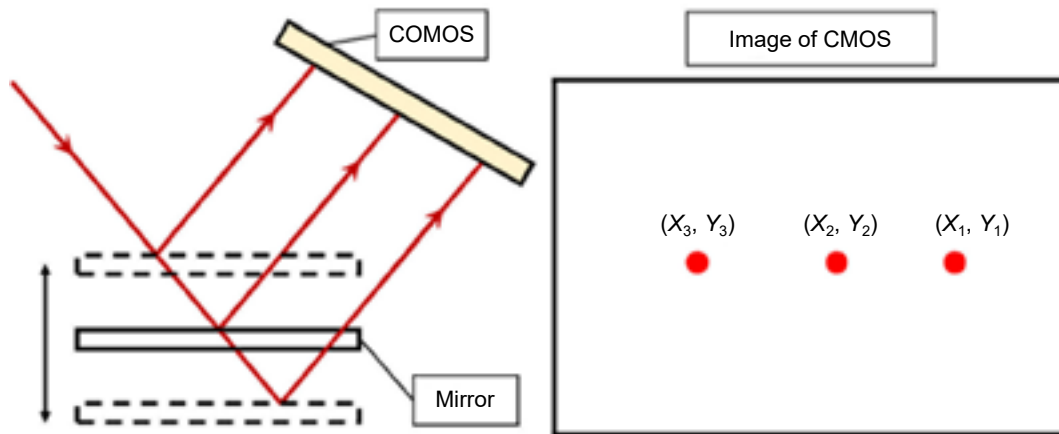


圖 12. 系統校正示意圖。

觀察圖 13(a) 兩個座標，左邊紅點座標是原數學建模追跡出來的光斑位置，右邊點則是光斑實際擷取到之座標，計算得校正前 X 方向偏移 7.2135 mm，Y 方向偏移 0.6534 mm，而圖 13(b) 則是校正後之影像，可見理想位置與實際位置重合，參考平面的每張影像光斑皆重合，表示系統的校正完成。

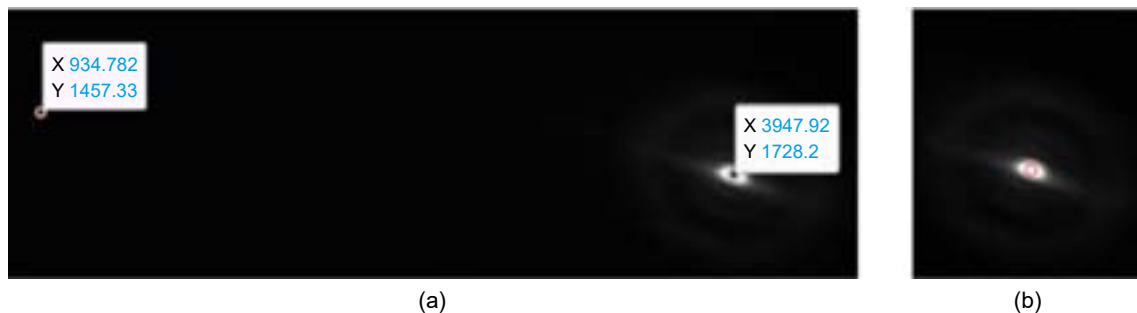


圖 13. 校正用影像局部光斑 (a) 校正前 (b) 校正後。

3. 實驗系統架構

本論文所提的量測系統雛型品如圖 14 所示。本論文主要以 LabVIEW 控制影像感測器擷取畫面，並對其做影像處理，使用者介面如圖 15 所示。

4. 實驗量測結果

實驗前先使用三次元量床 CMM 測量，CMM 的量測方式為掃描整個玻片，取整個面積的平均高度，較不易受極值影響，選擇其中較接近廠商規格的透明玻片來做實驗，CMM 測厚與產品標示厚度誤差在 0.0367 mm 以下，本論文的厚度理論值為 CMM 測量之結果。

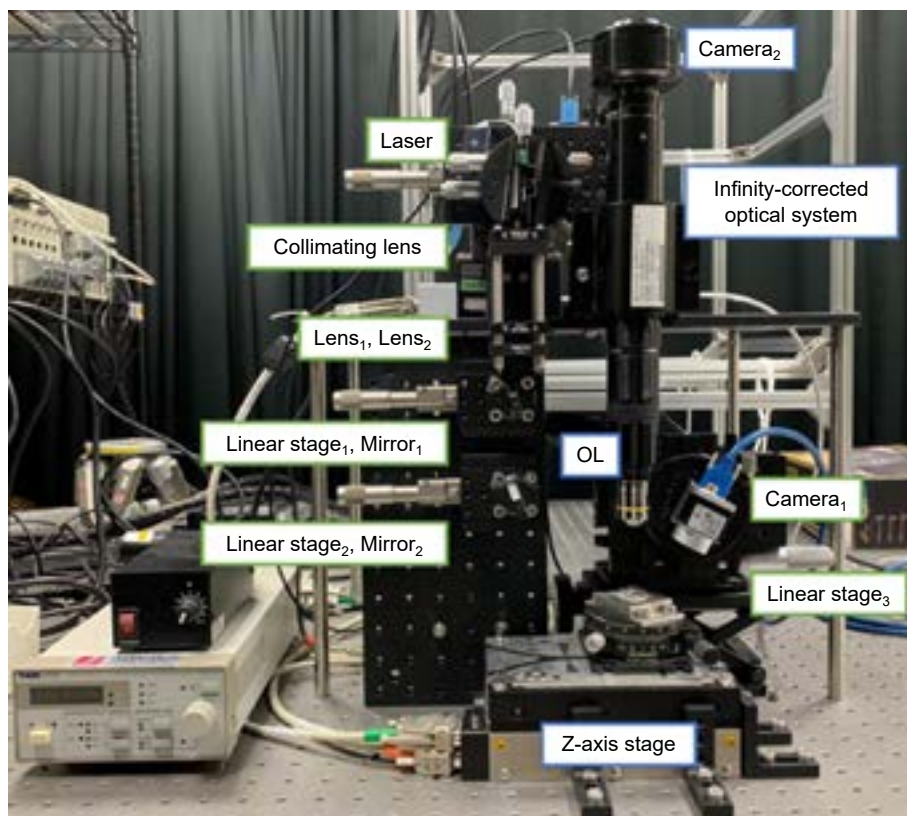


圖 14. 量測系統雛型品。

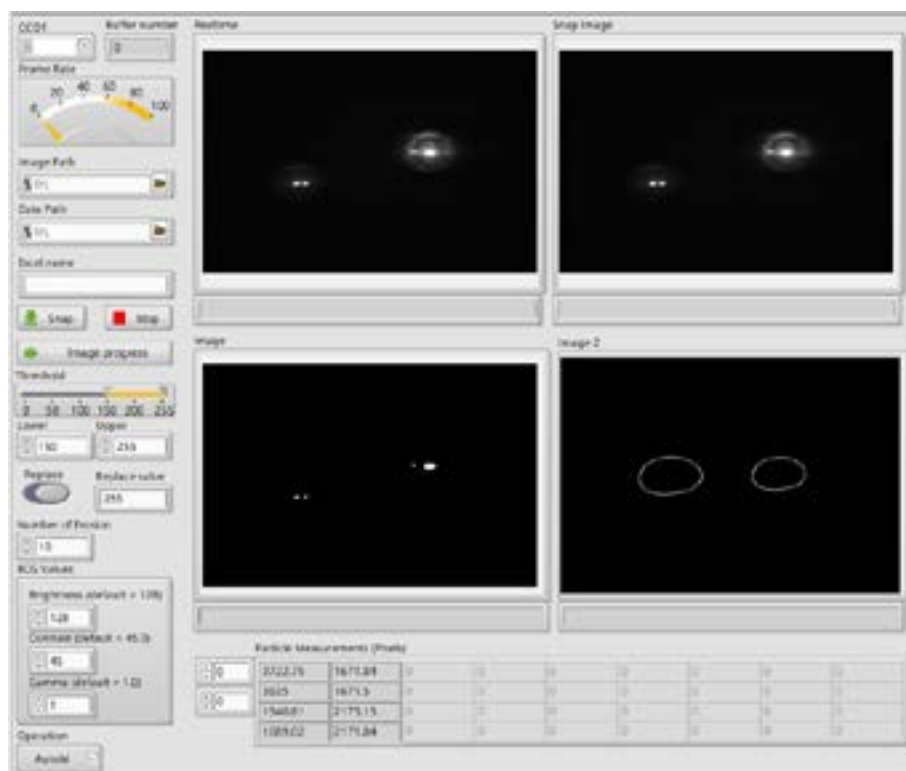


圖 15. LabVIEW介面。

測量雙層與三層兩種待測物，中層待測物固定為 Air ($n = 1$)，上下層使用總共 3 種材質與 3 種厚度，分別是 Sapphire ($n = 1.7648$, $t = 0.5, 1$)；Fused Silica ($n = 1.4580$, $t = 2$)；ZnSe ($n = 2.6310$, $t = 1$)，同材質尺寸的上下層待測物為不同的玻片，雙層量測僅有三層的上中兩層，雙層的邊界面為三個，對應到的光斑也為三個，需測量之未知數為六項 ($n_1, n_2, t_1, t_2, \Omega, \Phi$)。

每組待測物重複量測五次，以驗證本系統的重複性，表 6 中的實驗值為重複測驗五次之平均值，觀察可知每層折射率的誤差平均在 0.0821 以下，每層厚度的誤差平均在 0.1452 mm 以下，傾斜角度 Ω 的誤差平均小於 0.1491°，傾斜角度 Φ 的誤差平均較大將近 5.6610°。

表 6. 雙層實驗誤差表。

		n_1	n_2	t_1 (mm)	t_2 (mm)	Ω (°)	Φ (°)
#1	理論值	1.7648	1.0000	1.0364	2.1746	1.0000	0.0000
	實驗值	1.6827	0.9912	1.0195	2.2949	0.9443	3.9399
	誤差值	-0.0821	-0.0088	-0.0169	0.1203	-0.0557	3.9399
	誤差百分比	-4.65%	-0.88%	-1.63%	5.53%	-5.57%	
#2	理論值	1.7648	1.0000	1.0364	2.1746	1.0000	65.0000
	實驗值	1.7599	0.9628	1.0802	2.3198	1.0042	70.6610
	誤差值	-0.0049	-0.0372	0.0438	0.1452	0.0042	5.6610
	誤差百分比	-0.28%	-3.72%	4.22%	6.68%	0.42%	8.71%
#3	理論值	1.4580	1.0000	1.9884	2.1746	1.0000	0.0000
	實驗值	1.3775	0.9909	1.8561	2.3108	1.0559	3.1152
	誤差值	-0.0805	-0.0091	-0.1323	0.1362	0.0559	3.1152
	誤差百分比	-5.52%	-0.91%	-6.65%	6.26%	5.59%	
#4	理論值	1.4580	1.0000	1.9884	2.1746	1.0000	60.0000
	實驗值	1.4415	0.9704	1.9641	2.1110	1.1491	62.0377
	誤差值	-0.0165	-0.0296	-0.0243	-0.0636	0.1491	2.0377
	誤差百分比	-1.13%	-2.96%	-1.22%	-2.93%	14.91%	3.40%

三層邊界面為四個，對應到的光斑也為四個，此處假設玻片為平行玻片，需測量之未知數為八項 ($n_1, n_2, n_3, t_1, t_2, t_3, \Omega, \Phi$) 每組待測物重複量測五次，以驗證本系統的重複性，表 7 中的實驗值為重複測驗五次之平均值，觀察表 7 可知，每層折射率的誤差平均在 0.5758 以下，前兩層的誤差平均在 0.1128 以下，每層厚度的誤差平均在 0.2636 mm 以下，前兩層的誤差平均甚至 0.1909 mm 以下，傾斜角度 Ω 的誤差平均小於 0.0852°，而傾斜角度 Φ 的誤差平均將近 4.2825°。

四、結論

本論文提出一套創新的光學量測系統，此量測系統能同時量測多層透明待測物的折射率與厚度，也能量測不平行層的傾斜角度，改善現有技術的不足。由光學軟體模擬結果來看，每層折射率的誤差平均在 0.0852 以下，前兩層的誤差平均在 0.0512 以下，在測量未知材料

表 7. 三層實驗誤差表。

		n_1	n_2	n_3	t_1 (mm)	t_2 (mm)	t_3 (mm)	Ω (°)	Φ (°)
#5	理論值	1.7648	1.0000	1.7648	1.0364	1.1379	1.0367	1.0000	0.0000
	模擬值	1.7565	1.0509	1.5022	1.0632	1.2930	0.8793	0.9856	0.9257
	誤差值	-0.0083	0.0509	-0.2626	0.0268	0.1551	-0.1574	-0.0144	0.9257
	百分比	-0.47%	5.09%	-14.88%	2.59%	13.64%	-15.18%	-1.44%	
#6	理論值	1.7648	1.0000	1.7648	1.0364	1.1379	1.0367	1.0000	60.0000
	模擬值	1.6988	0.9746	1.4984	1.0270	1.2345	0.9323	1.0852	64.2825
	誤差值	-0.0660	-0.0254	-0.2664	-0.0094	0.0966	-0.1044	0.0852	4.2825
	百分比	-3.74%	-2.54%	-15.10%	-0.91%	8.49%	-10.07%	8.52%	7.14%
#7	理論值	1.7648	1.0000	1.7648	0.5317	1.1379	1.0367	1.0000	0.0000
	模擬值	1.7655	0.9414	1.4447	0.5546	1.1441	1.0888	0.9184	3.7282
	誤差值	0.0007	-0.0586	-0.3201	0.0229	0.0062	0.0521	-0.0816	3.7282
	百分比	0.04%	-5.86%	-18.14%	4.31%	0.55%	5.02%	-8.16%	
#8	理論值	1.4580	1.0000	1.7648	1.9884	1.1379	1.0367	1.0000	0.0000
	模擬值	1.5025	0.9389	1.3292	2.0719	1.2823	0.7731	1.0113	2.6569
	誤差值	0.0445	-0.0611	-0.4356	0.0835	0.1444	-0.2636	0.0113	2.6569
	百分比	3.05%	-6.11%	-24.68%	4.20%	12.69%	-25.43%	1.13%	
#9	理論值	1.4580	1.0000	1.7648	1.9884	1.1379	1.0367	1.0000	30.0000
	模擬值	1.4262	0.9793	1.7946	1.9320	1.1523	1.0574	1.0642	32.4466
	誤差值	-0.0318	-0.0207	0.0298	-0.0564	0.0145	0.0207	0.0642	2.4466
	百分比	-2.18%	-2.07%	1.69%	-2.84%	1.27%	2.00%	6.42%	8.16%
#10	理論值	1.4580	1.0000	2.6310	1.9884	1.1450	1.0296	1.0000	30.0000
	模擬值	1.3452	1.0146	2.0552	1.7975	1.2189	1.2684	0.9543	32.6203
	誤差值	-0.1128	0.0146	-0.5758	-0.1909	0.0739	0.2388	-0.0457	2.6203
	百分比	-7.74%	1.46%	-21.89%	-9.60%	6.46%	23.19%	-4.57%	8.73%

的待測物時，折射率已經足以辨識出該玻片為何種材料，每層厚度的誤差平均在 0.0549 mm 以下，前兩層的誤差平均在 0.0481 mm 以下，對 X 軸的傾斜角度的誤差平均小於 0.0031°，而對 Z 軸的傾斜角度 Φ 的誤差平均較大至 0.3179°。由實際實驗結果來看，每層折射率誤差在 0.5758 以內，前兩層折射率誤差在 0.1128 以內，每層厚度誤差在 0.2636 mm 以內，前兩層厚度誤差在 0.1909 mm 以內，對 X 軸的傾斜角度 Ω 誤差小於 0.1491°，對 Z 軸的傾斜角度 Φ 誤差小於 5.6610°。

參考文獻

1. Wikipedia, "Ellipsometry", please refer to the website: <https://en.wikipedia.org/wiki/Ellipsometry>.
2. Jungjae Park, Jaeseok Bae, Jong-Ahn Kim and Jonghan Jin, *Optics Communications*, **431**, 181 (2019).
3. Xiang Xu, Xingkun Wu, Feng Lin, *Cellular Image Classification*, Springer (2017).
4. Psang Dain Lin, *New Computation Methods for Geometrical Optics*, Singapore: Springer (2013).
5. 蔡忠佑, "稜鏡成像位姿變化之分析與設計", 國立成功大學機械工程學系博士論文, (2007).
6. C. S. Liu and T. Y. Weng, *IEEE Access*, **9**, 21474 (2021).
7. 施玟好, "多層透明板厚度及折射率量測系統結合自動對焦系統之設計", 國立成功大學機械工程學系碩士論文, (2022).

作者簡介

施玟妤女士為國立成功大學機械工程學系碩士，現為新代科技股份有限公司工程師。

Wen-Yu Shih received her M.S. in Mechanical Engineering from National Cheng Kung University. She is currently an Engineer in Syntec Technology Co., Ltd.

劉建聖先生為國立成功大學機械研究所博士，現為國立成功大學機械工程學系教授。

Chien-Sheng Liu received his Ph.D. in Mechanical Engineering from National Cheng Kung University. He is currently a Professor in the Department of Mechanical Engineering at National Cheng Kung University.

偏振干涉術應用於折射率、滾轉角位移量測

Polarization Interferometry for the Measurement of Refractive Index and Roll Angular Displacement

蔡岳哲、張書菡、許敬澤、江家宇、宋瑋益、李朱育

Yue-Jhe Tsai, Shu-Han Chang, Ching-Tse Hsu, Chia-Yu Chiang, Wei-Yi Sung, Ju-Yi Lee

干涉術廣泛應用於精密加工和光學元件測量，對科研和工程應用至關重要。本文提出了一種基於偏振相機之新型偏振干涉儀，可以快速獲得待測物所引入的相位變化，進而推算出特定物理參數之變化。本文除了介紹偏振干涉術的工作原理，亦藉由理論推導與實驗，驗證此技術在透明物體的折射率量測與滾動角位移量測的可行性。

Interferometry is widely used in precision machining and measurement of optical components, and is crucial to scientific research and engineering field. This paper proposes a new type of polarization interferometer, which uses phase detection of polarization interferometry with a quarter wave plate and polarization camera to quickly obtain the change of phases and calculate changes in specific physical parameters. In addition to introducing the working principle of polarization interferometry, several experiments and theoretical inference were performed to evaluate the feasibility and performance of the proposed technique. This technology can be widely applied to the measurement of the refractive index of transparent objects and the measurement of the roll angular. The proposed technique offers relevant measurement results and system resolution demonstrated in this article.

一、前言

隨著科技飛速成長，產品品質的要求日趨嚴謹，對於量測技術的精度規格逐漸提升。在精密量測技術中，光學干涉儀是最常見的技術之一。例如光學產業中，為確保鏡頭的品質，工程師多使用光學干涉儀來檢測光學元件的曲率、厚度、折射率等參數的量測。此外，光學干涉儀也常應用於其他物理參數的量測環；例如 J. Wang 等人於 2019 年以熔接單模光纖和空心石英管的方式，設計製造出了一種光纖型 Michelson 干涉儀⁽¹⁾。此光纖型 Michelson 干涉儀可精準測量折射率和溫度。W. Zhu 等人於 2019 年提出一種先進的同步移相 Fizeau 干涉儀⁽²⁾，可精密地量測出拋光物體的表面形貌。他們將擴束器引入同步相移 Fizeau 干涉儀中，

用於增大透鏡陣列的孔徑，減小光束入射到測試面上的傾斜度，提高干涉儀的成像分辨率和測量精度。X. Miao 等人於 2021 年也提出一種 Fizeau 干涉式的表面形貌量測技術，他們將移相過程移至低同調雷射光源模組⁽³⁾，使得移相過程不受光學口徑的干擾。實驗顯示此種設計具有優異的重複性和穩定性。

上述類型光學干涉儀雖然具有精密量測的優點，但是相位解調方式較為複雜，使得量測過程繁瑣且易受到環境擾動干擾。相反的，近期所發展的偏振干涉儀⁽⁴⁾，不僅架構簡易，且相位解調速度快，因此能夠有效降低環境擾動對量測的影響，應用領域相當廣泛。例如 H. Liu 等人於 2022 年提出一種基於高穩定同軸 Fizeau 偏振干涉測量法之移相數位全像系統⁽⁵⁾。實驗證明該方法對反射型靜態和動態物體的成像效能，具有高相位穩定性和動態成像能力。因此，本研究將採用類似 H. Liu 等人的架構，設計一種基於偏振相機的新型偏振干涉術，應用於透明物體折射率量測以及物體滾轉角位移的量測。

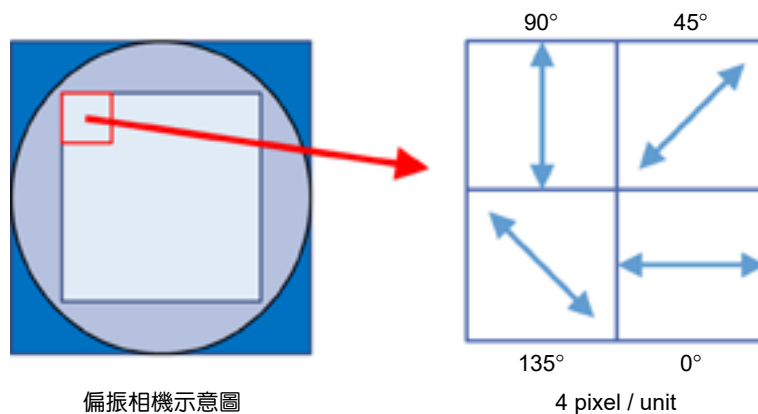
二、偏振干涉術

本研究採用偏振干涉術操作流程如圖 1 所示。將偏振光投射待測系統，待測系統中的特定物理參數，將相應的相位差 δ 引入偏振光中，例如全反射、干涉儀或者是雙折射晶體等。具有相位差的偏振光線分別為 s 偏光與 p 偏光，形成共光程偏振干涉，再經由解相系統，進行解相運算，以求出待測物所引入的相位差。進一步利用相位差與系統參數之間的關係，即可推算出待測物的物理變化。



圖 1. 振干涉解相法之操作流程。

本研究使用新穎的偏振相機^(6, 7) 做為系統之光訊號擷取裝置。偏振相機除了傳統的感光元件陣列組成之外，在感光元件陣列上還裝有不同偏振方向之偏振片陣列。其特性為每四個像素 (pixel) 為單位，且每一單位上分別由四個方向的線性偏振片 ($\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$) 組成，如圖 2 所示。



偏振相機示意圖

圖 2. 偏振相機的像素偏振態示意圖。

根據偏振干涉理論與 Jones 演算法^(7, 8)，偏振光線經由待測系統作用之後，由偏振相機所擷取干涉光強度訊號 I 可表示為：

$$I(\alpha, \delta) = DC + AC \cdot \sin(2\alpha + \delta) \quad (1)$$

式 (1) 中 α 為線偏振片的穿透角度， δ 為待測系統所引入的相位差，DC 與 AC 分別為干涉訊號中的主光強度及振幅。由於感光元件上的偏振片陣列具有四個不同的偏振穿透角，亦即 $\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 與 135° ，因此偏振相機可以產生四個互相正交的偏振光訊號 (I_0, I_{45}, I_{90} 與 I_{135})，可分別表示為：

$$I_0 = I(0^\circ, \delta) = DC + AC \cdot \sin \delta \quad (2)$$

$$I_{45} = I(45^\circ, \delta) = DC + AC \cdot \cos \delta \quad (3)$$

$$I_{90} = I(90^\circ, \delta) = DC - AC \cdot \sin \delta \quad (4)$$

$$I_{135} = I(135^\circ, \delta) = DC - AC \cdot \cos \delta \quad (5)$$

將四個光強度訊號進行相減、相除與反正切運算，如式 (6) 所示，即可消除 DC 與 AC 項，並得出相位差 δ ：

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{I_0 - I_{90}}{I_{45} - I_{135}} \right) \quad (6)$$

式 (6) 為本文所提出的偏振干涉解相法。相較於傳統移相干涉儀⁽⁹⁾，需多種光學元件及架構搭配才得以解析出相位差，偏振相機可有效減少系統空間需求，也減少過多元件影響系統穩定度。以下將說明如何以此偏振干涉解相技術為基礎，配合全反射系統與雙折射系統，應用於折射率與滾轉角位移的量測。

三、基於全反射共光程偏振干涉術之折射率量測技術

本節將說明全反射共光程偏振干涉術應用於折射率量測的原理和實驗結果。如圖 3(a) 所示，當光線由密介質射向疏介質，且其入射角大於臨界角時，光線將發生全反射現象。此時，反射光的垂直與水平偏振分量的相位差會隨著入射角度與相對折射率產生變化。根據 Fresnel 方程式^(10, 11, 12)，此相位差 δ 可寫為：

$$\delta = 2 \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{\sin^2 \theta_i - (n_2/n_1)^2}}{\tan \theta_i \sin \theta_i} \right) \quad (7)$$

其中， n_1 為待測物折射率， $n_2 = 1$ 為空氣折射率， θ_i 為入射角度。圖 3(b) 顯示光線入射角與其相位差的關係。不同折射率對應各自的相位差曲線，且可明顯地觀察到每條相位差曲線都存在著唯一的「臨界角 θ_c 」及「相位差極大值 $\delta_{\max}$ 」之特徵點。

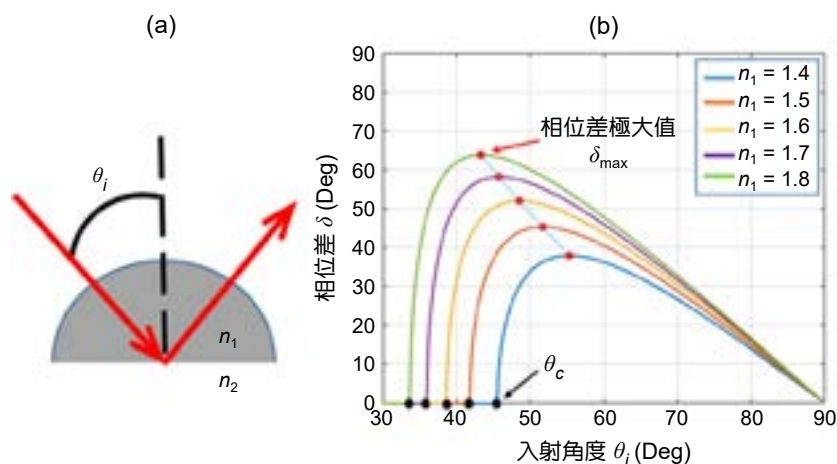


圖 3. (a) 全反射示意圖 (b) 不同入射角之相位差變化圖。

阿貝折射儀⁽¹³⁾ 為一種常見的折射率量測儀器，透過臨界角的量測，即可推算出待測物的折射率。然而臨界角量測精度會受到單一入射角度影響，不適合用在具有曲面的待測物。因此本研究採用另一特徵「相位差極大值」來量測待測物之折射率。利用微分求極值的演算法，相位差極大值 $\delta_{\max}$ 與折射率的關係可寫為：

$$\delta_{\max} = 2 \tan^{-1} \left(\frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1 n_2} \right) \quad (8)$$

當待測物 (n_1) 置於空氣 ($n_2 = 1$) 中，待測物之折射率⁽¹⁴⁾ 可寫為：

$$n_1 = \frac{\cos(\delta_{\max}/2)}{1 - \sin(\delta_{\max}/2)} \quad (9)$$

式 (9) 為折射率量測方程式。在得到全反射現象中的相位差極大值後，可透過式 (9) 計算待測物的折射率。綜上所述，折射率量測方程式僅與單一參數「相位差極大值」相關，相比於其它折射率量測方式，不會被多項參數 (厚度、焦距或曲率半徑) 干擾。

本研究設計的光學系統如圖 4 所示。二極體雷射 LD 經針孔 PH 形成點光源，通過線偏振片 PL2、透鏡 L1、L2 及空間濾波器 F 組成的擴束系統 BE，產生直徑約 18 mm 的偏振準直光束。線偏振片 PL1 可用來調節雷射光強度。接著使用透鏡 L3 將光束聚焦在待測物 S 與空氣的界面上，再旋轉待測物使偏振聚焦光束發生全反射。全反射的光束通過四分之一波片 QWP 後，經透鏡 L5 聚焦投射到偏振相機。

此光學設計所產生的全反射是由聚焦光束在界面上所形成，因此入射光束與全反射光束皆會以錐狀呈現，形成二維的分布並投射在偏振相機。錐狀光束中的每一條光線角度均不同。換句話說，偏振相機中不同位置的感光元件，將收到不同角度的光線。因此，透過聚焦光束，我們可以從偏振相機的相位差分布中找到相位差極大值。只要找到相位差極大值，即可由本文的量測方程式 (9) 計算出待測物的折射率。

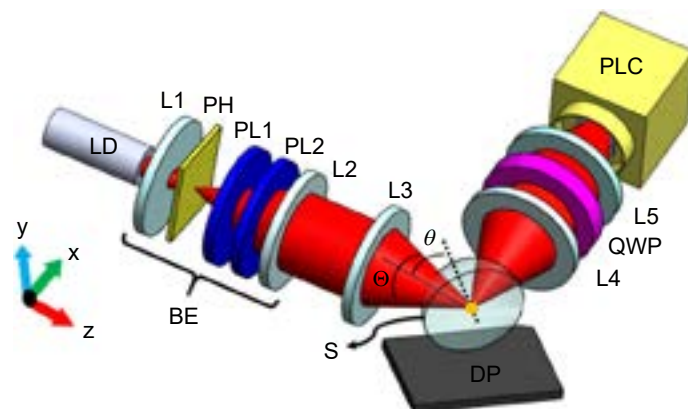


圖 4. 折射率量測系統架構設計示意圖。

1. 全場相位差分布量測

首先以標準稜鏡為待測物，來驗證此量測方法的可行性。依照上述方法測得全場相位差分布如圖 5 所示。圖中橫軸與縱軸位置代表相應的入射角。此相位差分布有一極大值 $\delta_{\max}$ 42.16° 。而根據標準稜鏡折射率所推算的相位差極大值應為 42.15° ，兩者僅相差 0.01° 。再根據量測方程由實驗所得標準稜鏡的折射率為 1.4573 RIU，與理論折射率相差 3×10^{-4} RIU。

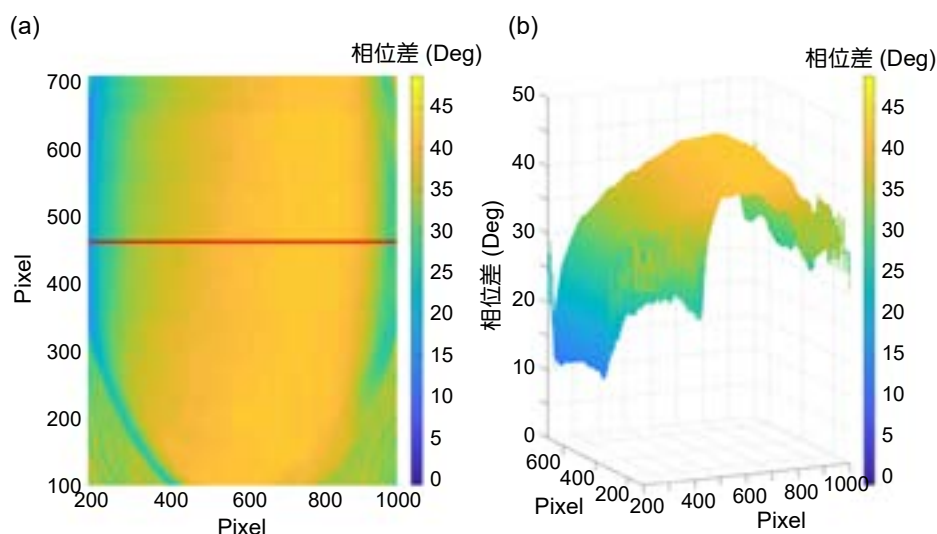


圖 5. 標準稜鏡的相位差分布 (a) 俯視圖 (b) 3D 圖。

2. 透明待測物的量測

由於此技術是以量測全反射所引入「相位差極大值」，進而計算出待測物的折射率，因此無需考慮待測物厚度、焦距或曲率半徑等參數，適用於具有曲率變化的待測物折射率量測。我們進行各式透明物體的折射率量測實驗，量測結果如表 1 所示。在重複性 30 次量測中，無論是稜鏡或是非球面透鏡，本技術皆有良好的結果。

3. 系統解析度

本研究結合偏振相機與偏振干涉解相技術來量測全反射相位差極大值 $\delta_{\max}$ ，進而推算出

表 1. 不同材質之折射率量測結果與誤差。

材質	透鏡 類型	相位差極大值(Deg) (平均±標準差)	折射率(RIU) (平均±標準差)	折射率差異(RIU) (平均—理論)
Fused Silica	稜鏡	42.17 ± 0.12	1.4573 ± 0.0017	0.0003
	非球面	42.18 ± 0.14	1.4574 ± 0.0018	0.0004
BK7	稜鏡	46.31 ± 0.14	1.5153 ± 0.0020	0.0002
	柱狀	46.33 ± 0.12	1.5155 ± 0.0017	0.0004
SF11	稜鏡	62.63 ± 0.17	1.7789 ± 0.0031	0.0003
B270	非球面	46.75 ± 0.20	1.5216 ± 0.0028	0.0005

透明待測物之折射率 n_1 。因此系統的相位差解析能力將決定折射率的量測解析度。本系統的相位差解析能力包含時間域空間域^(15, 16)兩種；空間域解析能力 $\Delta\delta_{\max_s}$ 是指感光元件某段範圍中，顯示的相位噪訊平均值；時間域解析能力 $\Delta\delta_{\max_t}$ 是指某段靜止時間中，系統顯示的相位噪訊平均值。根據量測不確定度原理⁽¹⁷⁾ 與量測方程所示，系統解析度 Δn_1 可表示如下：

$$\Delta n_1 = \sqrt{\left(\frac{\partial n_1}{\partial \delta_{\max}} \Delta\delta_{\max_t}\right)^2 + \left(\frac{\partial n_1}{\partial \delta_{\max}} \Delta\delta_{\max_s}\right)^2} = \frac{n_2 \sqrt{(\Delta\delta_{\max_t})^2 + (\Delta\delta_{\max_s})^2}}{2[1 - \sin(\delta_{\max}/2)]} \quad (10)$$

本研究所得 $\Delta\delta_{\max_t}$ 與 $\Delta\delta_{\max_s}$ 分別為 0.1° 與 0.06° 。將 $\Delta\delta_{\max_t}$ 與 $\Delta\delta_{\max_s}$ 代入式 (10)，可得系統量測折射率之解析度 Δn_1 最小可達 1.6×10^{-3} RIU。

四、雙光束偏振干涉術應用於滾轉角位移量測

本節將說明雙光束偏振干涉術應用於滾轉角位移量測的原理和實驗結果。光線與雙折射晶體的幾何關係如圖 6 所示，一道平行光線以 θ 角度射向一厚度為 d 的雙折射晶體 (birefringence crystal, BC)，入射光投影在晶體表面之向量與晶體光軸 OA 夾 α 角。根據晶體光學理論⁽⁷⁾，出射晶體的 o 光與 e 光的相位延遲度 Γ ^(8, 18) 可寫為：

$$\Gamma(\theta, \alpha, d) = \frac{2\pi}{\lambda} d \left(n_e \sqrt{1 - \frac{n_p^2 \sin^2 \theta \sin^2 \alpha}{n_e^2}} - \frac{n_p^2 \sin^2 \theta \cos^2 \alpha}{n_o^2} - n_o \sqrt{1 - \frac{n_p^2 \sin^2 \theta}{n_o^2}} \right) \quad (11)$$

其中 λ 為光線真空中波長， n_o 為尋常折射率， n_e 為非尋常折射率， n_p 為周圍介質折射率。尋常和非尋常光線會彼此干涉，而後端的偏振解相系統將會接收並解析此干涉光訊號。根據 Jones 理論^(19, 20)，偏振相機所接收到垂直與水平偏振光的相位差可表示為：

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{\sin 2\alpha \cdot \sin \Gamma}{\cos \Gamma} \right) \quad (12)$$

假設在空氣中 ($n_p = 1$)，以厚度為 10 mm 的方解石晶體 ($n_o = 1.5427$ 與 $n_e = 1.5518$) 為例，一波長 533 nm 的光線，以 $\theta = 45^\circ$ 的入射角射向晶體，將上述參數代入式 (11) 與 (12)，可模擬出滾轉角度 α 變化與相位差變化 $\Delta\delta$ 之關係，其變化趨勢如圖 7 所示。

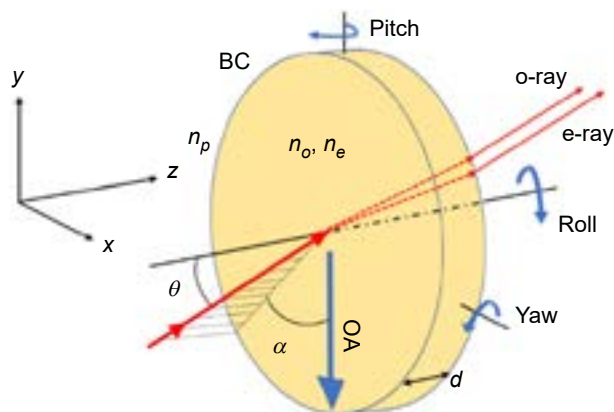


圖 6. 光線與雙折射晶體之幾何關係。

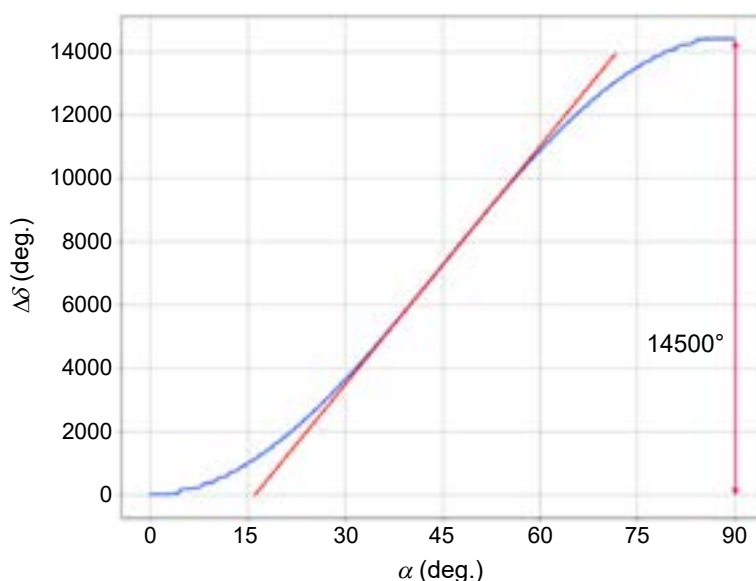


圖 7. 滾轉角角度變化與相位差變化關係圖。

圖 7 顯示，相位差在滾轉角 $\alpha = 40^\circ - 50^\circ$ 範圍變化趨勢呈線性，且在 $\alpha = 45^\circ$ 時存在最大斜率。基於上述現象，我們僅需一擬合線，即可透過相位差變化的量測值 $\Delta\delta$ 來推算滾轉角位移量 $\Delta\alpha$ ，實現滾轉角位移量測。擬合方程式可寫為：

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta\delta}{s} \quad (13)$$

其中 s 為擬合線斜率。但當晶體發生俯仰角 θ 位移時，同樣會引入相位差變化，使式 (13) 計算之滾轉角位移量結果出現誤差。因此本研究設計一種對稱雙光束的架構，以解決入射角所引入的相位差干擾。

如圖 8(a) 所示，兩道對稱於雙折射晶體法線之交叉光束，以入射角 θ_0 射向 BC，此時兩透射光因雙折射引入的相位差相等。如圖 8(b) 所示，當晶體發生俯仰角偏移 $\Delta\theta$ 時，兩入射光會

產生正負 $\Delta\theta$ 的偏移變化，即 $\theta_1 = \theta_0 + \Delta\theta$, $\theta_2 = \theta_0 - \Delta\theta$ 。此時兩相應的入射光也分別會引入一增一減的相位差變化。利用泰勒展開式可將兩相位差 δ_1 與 δ_2 分別表示為：

$$\delta_1 = \delta(\theta_0 + \Delta\theta, \alpha) = \delta(\theta_0, \alpha) + \frac{\partial \delta}{\partial \theta} \cdot \Delta\theta \quad (14)$$

$$\delta_2 = \delta(\theta_0 - \Delta\theta, \alpha) = \delta(\theta_0, \alpha) - \frac{\partial \delta}{\partial \theta} \cdot \Delta\theta \quad (15)$$

將兩透射光之相位差平均運算，相位差平均值 δ_{avg} 可表示為：

$$\delta_{avg} = \frac{(\delta_1 + \delta_2)}{2} = \delta(\theta_0, \alpha) \quad (16)$$

式 (16) 中沒有入射角偏移 $\Delta\theta$ ，因此相位差平均運算，可以消除入射角偏移 $\Delta\theta$ 時對滾轉角的干擾，達高準確性滾轉角位移精密量測之目的。

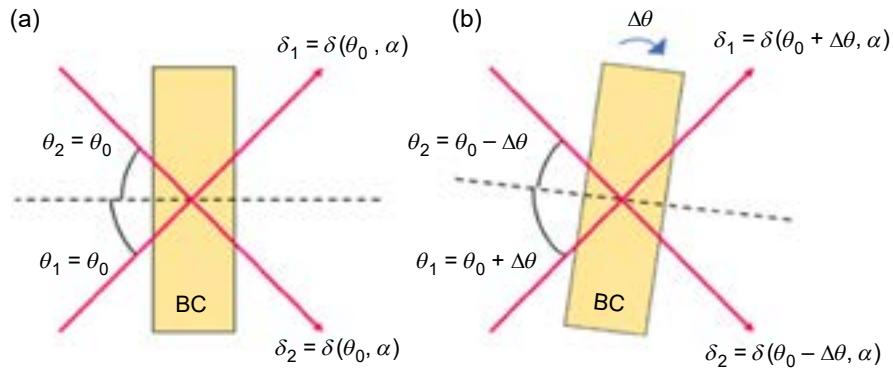


圖 8. 入射變化示意圖。

本研究系統光路設計如圖 9 所示。雷射光源經由線偏振片 LP 與四分之一波片 QWP 後成為圓偏振光。經分光鏡 NPBS 分為兩道平行圓偏振光，兩平行光束經透鏡 Lens 聚焦後交叉穿透雙折射晶體 BC。BC 被同時安裝於一滾轉及一俯仰精密電控旋轉平台上，以模擬晶體的滾轉角位移與俯仰角位移。透過兩組偏振相機 PLC 與四分之一波片 QWP 組成的解相系統，擷取兩光束的即時光強度訊號，並解析其相位差。利用式 (16) 得出相位差平均值變化 $\Delta\delta_{avg}$ 後，再以式 (13) 計算出滾轉角位移變化 $\Delta\alpha$ 。

1. 時變俯仰角干擾下的系統準確性

我們進行一項入射角隨時間變化的實驗，以評估此系統時變俯仰角干擾的抑制能力。本實驗將晶體放置在兩旋轉平台上，以模擬滾轉角與俯仰角位移，並使用雙光束與單光束架構⁽²¹⁾量測滾轉角位移，用以比較系統性能。圖 10(a) 中綠色虛線及實線分別為俯仰角及滾轉角旋轉平台之角度變化量。當滾轉角進行 2° 步階角位移運動，同時俯仰角在 2° 內隨機變化 ($\Delta\theta = \pm 1^\circ$)。紅色虛線及藍色實線分別為雙光束架構及單光束架構量測結果。圖 10(b) 紅色

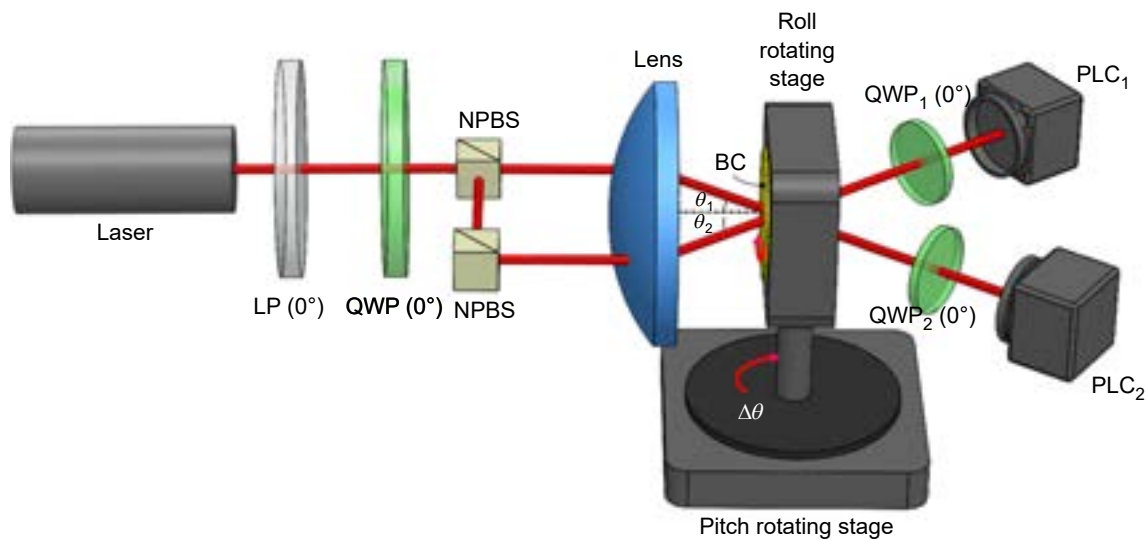


圖 9. 滾轉角位移量測系統光路設計示意圖。

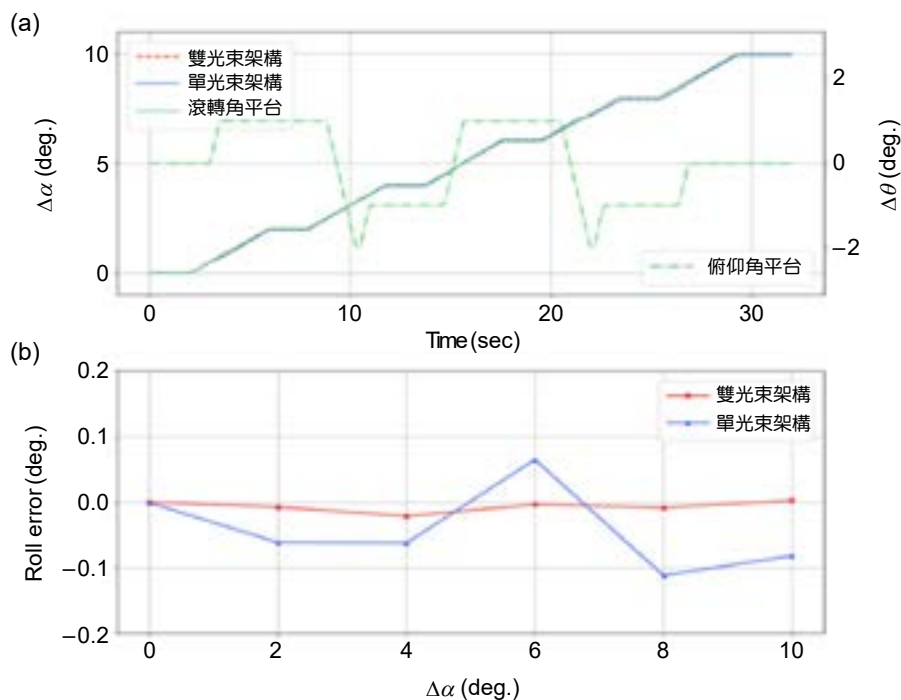


圖 10. 俯仰角位移干擾下滾轉角位移 2° 步階量測實驗結果。

實線及藍色實線分別為雙光束架構及單光束架構量測方式與旋轉平台參考值相減之差異量，在俯仰角變化時單光束較雙光束量測方式出現明顯誤差。在 10° 量測距離中，單光束及雙光束兩種量測方式誤差最大值分別約為 0.11° 及 0.02°，而量測誤差平均值分別為 0.065° 與 0.007°，兩量測方式相差約 10 倍。該結果顯示雙光束架構具有更好的量測精度和穩定性，並且能夠有效地抑制俯仰角干擾對量測結果的影響。因此我們以雙光束架構進行了重複性量測實驗，實驗結果如圖 11 所示。

圖 11 之紅色三角型連線為雙光束架構平均量測值，藍色線段長度為量測值之標準差。在滾轉角位移連續變化干擾時，雙光束架構之量測線性度依然良好，最大值介於 $\pm 0.006^\circ$ 。

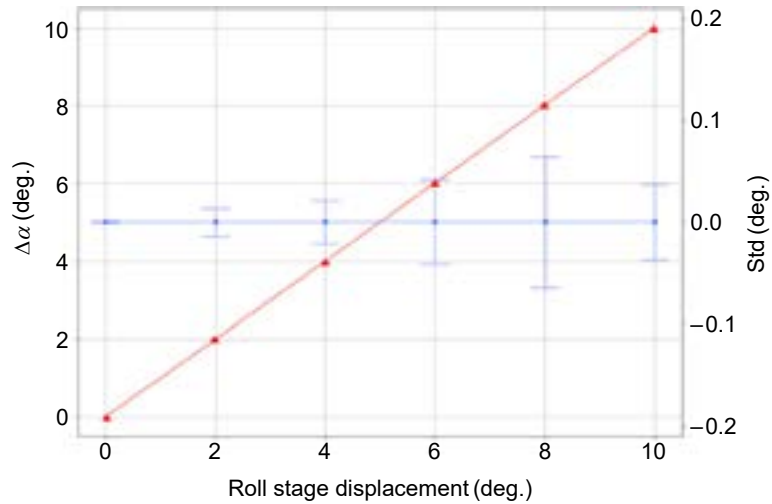


圖 11. 俯仰角位移干擾下滾轉角位移 2° 步階重複性量測實驗結果。

2. 系統解析度

本研究量測系統解析度的關鍵指標為系統對於光強度訊號的解析能力，我們對量測系統最小可解析之相位差變化進行分析，根據量測不確定度理論⁽¹⁷⁾ 及式 (6)，系統最小可解析出之相位差可表示為：

$$d\delta_{sp} = \sum_{m=0,90,45,135} \frac{d\delta}{\delta I_m} dI_m = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{(I_0 - I_{90})^2 + (I_{45} - I_{135})^2}} dI = \frac{\sqrt{2}}{r} dI = \frac{dr}{r} \quad (17)$$

其中 $r^2 = (I_0 - I_{90})^2 + (I_{45} - I_{135})^2$ 。 dI_0 、 dI_{45} 、 dI_{90} 與 dI_{135} 為偏振相機四個通道可偵測到之最小光強度變化，可視為等量 dI 。 r 的雜訊大小 $dr = \sqrt{2}dI$ 。為了測試系統的最小可解相位，我們將 BC 保持在一個靜止的位置數秒，如圖 12 所示。

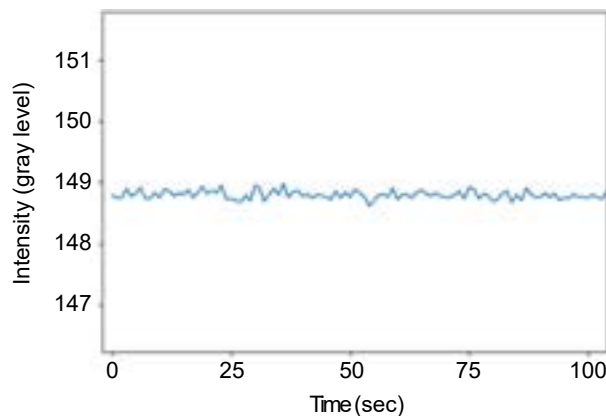


圖 12. r 在實驗中平台靜止時的變化值。

圖中雜訊大小的標準差 dr 與 r 的平均值分別約為 0.07 與 148.8，將兩者代入式 (17) 中，計算出系統最小能夠量測的相位差 $d\delta_{sp}$ 約為 0.027° 。並通過校正實驗所取得之斜率，將相位差轉換為滾轉角位移，得出本量測系統解析度約為 $0.0001^\circ (= 0.027^\circ/255 \sim 0.38 \text{ arcsec})$ 。

以上實驗表明雙光束系統可有效消除俯仰角位移之干擾，系統於量測範圍 10° 內，系統解析度可達 0.38 arcsec ，實現滾轉角位移之精密量測。

五、結論

本文說明偏振干涉術的原理，並應用於物體折射率量測、滾轉角位移量測。透過計算相位差，推算物體的折射率、滾轉角位移等。本文也提供詳細的實驗流程和技術細節，包括使用偏振干涉術進行量測的具體步驟、計算相位差的方法以及如何進行系統解析度的分析。

綜上所述，本文提出了一種高效、可靠且精確的量測方法，應用於物體折射率和滾轉角位移。未來將繼續探索和精進偏振干涉術的應用，以期更廣泛地推動和促進相關技術的發展。

參考資料

1. Jin Wang, Bo Liu, Yongfeng Wu, Yaya Mao, Lilong Zhao, Tingting Sun, Tong Nan, *Opt. Laser*, **194**, 163094 (2019).
2. Wenhua Zhu, Lei Chen, Ying Yang, Rui Zhang, Donghui Zheng, Zhigang Han, Jinpeng Li, *Optics & Laser Technology*, **111**, 134 (2019).
3. Xinyu Miao, Yifan Yu, Aobo Li, Jun Ma, Lei Chen, Jianxin Li, Qing Wang, Cong Wei, Rihong Zhu, Caojin Yuan “Optical phase-shifting methods based on low coherence laser for large aperture Fizeau interferometer,” *Optics and Lasers in Engineering*, **140**, 106513 (2021).
4. Ming-Horng Chiu, Ju-Yi Lee, and Der-Chin Su, *Applied Optics*, **36** (13), 2936 (1997).
5. Liu Hanzi, R.V. Vinu, Hongliang Ren, Xingpeng Du, *Photonics*, **9** (3), 126 (2022).
6. 偏振相機BFS-U3-51S5P-C, please refer to the website:
<https://www.edmundoptics.com.tw/p/bfs-u3-51s5p-c-usb3-blackflyreg-s-polarization-camera/41357/> (Edmund Optics).
7. 宋瑋益, “基於雙折射偏振干涉術之滾轉角量測技術”, 國立中央大學, 碩士論文 (2021).
8. 許敬澤, “雙光束偏振干涉術應用於滾轉角位移量測”, 國立中央大學, 碩士論文 (2022).
9. Peter de Groot, “Phase Shifting Interferometry”, 8, 167-186 (2011). Richard Leach, *Optical measurement of surface topography*, Springer, (2011).
10. 江家宇, “基於全反射共光程偏振干涉術之折射率量測技術”, 國立中央大學, 碩士論文 (2021).
11. E. Hecht, *OPTICS*, 4th Edition, San Francisco: Addison-Wesley (2002).
12. 同註 4。
13. J. Rheims, J. Koser and T. Wriedt, *Meas. Sci. Technol.*, **8** (1), 601 (1997).
14. S. Patskovsky, M. Meunier, and A. V. Kabashin, *Opt. Express*, **15** (19), 12523 (2007).
15. Bor-Shing Lin, Mei-Ju Su, Po-Hsun Cheng, Po-Jui Tseng and Sao-Jie Chen, *Sensors*, **15** (8), 18506 (2015).
16. Massimo Camplani, Tomas Mantecon and Luis Salgado, *IEEE Trans. Cybern.*, **43** (6), 1560 (2013).
17. R. J. Moffat, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **1** (1), 3 (1988).
18. Hung-Lin Hsieh, Ju-Yi Lee, Lin-Yu Chen, and Yang Yang, *Optics Express*, **24** (7), 6802 (2016).
19. Cheng-Hung Hsieh, Chien-Chung Tsai, Hsiang-Chun Wei, Li-Ping Yu, Jheng-Syong Wu, Chien Chou, *Appl. Opt.*, **46** (23), 5944 (2007).
20. A. Yariv and P. Yeh, *Optical Waves in Crystals*, 1st Edition, New York: John Wiley (2003).
21. Ju-Yi Lee, Wei-Yi Sung, and Ching-Tse Hsu, *Appl. Opt.*, **60**, 9110 (2021).

作者簡介

蔡岳哲現為國立中央大學機械工程學系碩士生。

Yue-Jhe Tsai is currently a M.S. student in the Department of Mechanical Engineering at National Central University.

張書菡現為國立中央大學機械工程學系碩士生。

Shu-Han Chang is currently a M.S. student in the Department of Mechanical Engineering at National Central University.

許敬澤為國立中央大學機械工程學系碩士。

Ching-Tse Hsu received his M.S. in Mechanical Engineering from National Central University.

江家宇為國立中央大學機械工程學系碩士。

Chia-Yu Chiang received his M.S. in Mechanical Engineering from National Central University.

宋瑋益為國立中央大學機械工程學系碩士。

Wei-Yi Sung received his M.S. in Mechanical Engineering from National Central University.

李朱育先生為國立陽明交通大學光電工程研究所博士，現為國立中央大學機械教授。

Ju-Yi Lee received his Ph.D. in Electro-Optical Engineering from National Yang Ming Chiao Tung University. He is currently a Professor in the Department of Mechanical Engineering at National Central University.

五自由度測量系統的開發與應用

Development and Application of Five-degree-of-freedom Measurement System

魏承弘、范光照、何昭慶

Cheng-Hung Wei, Kuang-Chao Fan, Chao-Ching Ho

任一運動軸由於元件製造與組裝誤差，都存在六種自由度的幾何誤差。傳統對精密機器的幾何誤差測量方法都是逐項一一量測，不僅費時費力，價格也昂貴。本文介紹了自行開發的五自由度測量系統。藉由精心設計過的光學組件相互搭配，可以實現移動目標的五個幾何誤差同時量測，且只需用到位移檢測的單光束雷射，包含了定位誤差、水平與垂直兩個方向的直線度誤差以及偏轉和俯仰兩個角度誤差。本多自由度誤差量測系統因使用 60 MHz 的調頻光，具有高速度、高精度等特性，且可以進行長距離的實時測量，其直線度誤差測量精度為 $\pm 1 \mu\text{m}$ 、角度誤差測量精度為 $\pm 1 \text{ arc-sec}$ ，定位誤差測量分辨率為 $0.01 \mu\text{m}$ 、測量精度優於 2 ppm。而在光軸與移動軸的校準上，透過可調式的折射鏡可快速地進行雷射光軸的對齊校準。該系統還具有結構簡單容易安裝與成本低等優點，本研究在一台光學檢測機台上驗證了其可行性。

Due to the manufacturing and assembly errors of any motion axis, there are six degrees of freedom geometric errors. The traditional method of measuring geometric errors of precision machines is to measure each item one by one, which is not only time-consuming but also expensive. In this paper, we introduce a self-developed five-degree-of-freedom measurement system. By combining well-designed optical components, five geometric errors of moving targets can be measured simultaneously, and only a single-beam laser for displacement detection is required, including positioning errors, straightness errors in both horizontal and vertical directions, and angular errors in both deflection and pitch. This multi-degree-of-freedom error measurement system uses a 60 MHz frequency modulated light with high speed and high accuracy, and can perform real-time measurements over long distances. The geometric error of each axis of motion has six degrees of freedom due to component manufacturing and assembly errors. The traditional method of measuring geometric errors of precision machines is to measure each item one by one, which is not only time consuming but also expensive. In this paper, we introduce a self-developed five-degree-of-freedom measurement system. By combining well-designed optical components, five geometric errors of moving targets can be measured simultaneously, and only a single-beam laser for displacement detection is required, including positioning errors, straightness errors in

both horizontal and vertical directions, and angular errors in both deflection and pitch. This multi-degree-of-freedom error measurement system uses 60 MHz frequency modulated light with high speed and high accuracy, and can perform long-distance real-time measurements with an accuracy of $\pm 1 \mu\text{m}$ for straightness error, $\pm 1 \text{ arc-sec}$ for angular error, and $0.01 \mu\text{m}$ for positioning error with a resolution of better than 2 ppm. The system also has a simple and easy-to-use structure. The system has the advantages of simple structure, easy installation, and low cost, and its feasibility was verified on an optical inspection machine. The system also has the advantages of simple structure, easy installation and low cost, and its feasibility was verified on an optical inspection machine.

一、前言

近年來，隨著機械製造的不斷發展，對於高精度測量的需求與日俱增。其中，幾何誤差作為機床的基本性能指標，對其進行的測量結果是判斷精度 (precision) 和可靠性 (reliability) 的重要因素之一。幾何誤差 (geometric error) 是由於機械結構的製造精度、變形、磨損、機械振動或是裝配誤差等多種因素影響所產生的⁽¹⁾。這些因素可能會使機械系統的實際運動軌跡與理想軌跡之間存在偏差，進而導致幾何誤差的產生，幾何誤差包括平行度誤差、直線度誤差、垂直度誤差、角度誤差等，而任何軸向都具有六個自由度誤差，即三個線性誤差和三個角度誤差。傳統的幾何誤差測量方法主要是使用量錶、卡尺等進行逐個測量，會耗費大量時間，而自從微機電系統技術以及精密製造技術的發展，幾何誤差的測量和控制也變得更加精確，各種多自由度測量系統也被學者們提出⁽²⁻⁴⁾。不過眾多系統還是存在著一些不足，例如：昂貴的雷射源使得測量成本高昂，難以負荷；複雜的光路設計，使得結構過於複雜且龐大，也讓光路校準的工作變得困難；部分具有高精度滾動角誤差 (roll error) 測量功能的系統，需產生兩個參考平行光束進行檢測，但兩光束的平行度較不易調整。

本文提出一種新型的五自由度測量系統，結合了雷射都卜勒位移干涉儀 (laser doppler displacement meter)、雷射準直儀 (laser straightness measuring system) 以及自動視準儀 (autocollimator)。該系統分為固定雷射模組與移動測量模組兩部分，以雷射都卜勒位移干涉儀作為雷射光源，移動測量模組包含了雷射準直儀、自動視準儀以及測量定位誤差 (positioning error) 所設計的分光鏡結構與角耦反射鏡 (corner cube reflector)。雷射準直儀和自動視準儀的訊號透過藍芽模組傳輸，位移訊號則透過角耦反射鏡沿著原光路反射回都卜勒位移干涉儀進行接收。該系統可以藉由單一雷射光源達到五自由度測量的目的，有別於多光束的測量系統，可以大幅降低在光軸校準 (alignment) 上的困難度，進而提升測量的效率。

二、線性移動台幾何誤差

線性移動台可以實現物體在直線方向的精確移動和定位控制，但因機械、控制與環境等問題，其運動時會無法避免六個自由度幾何誤差，分別是三個線性誤差：一個定位誤差及兩個直線度誤差包括水平與垂直方向，以及三個角度誤差：俯仰角 (pitch error)、偏轉角 (yaw error)、滾動角 (roll error)，如圖 1 所示。測量幾何誤差就能評估線性移動台的性能，並確定移動台在不同位置的誤差分布，這有助於制定校正和補償的策略，以減少幾何誤差對系統的影響，提高移動台的可靠性。

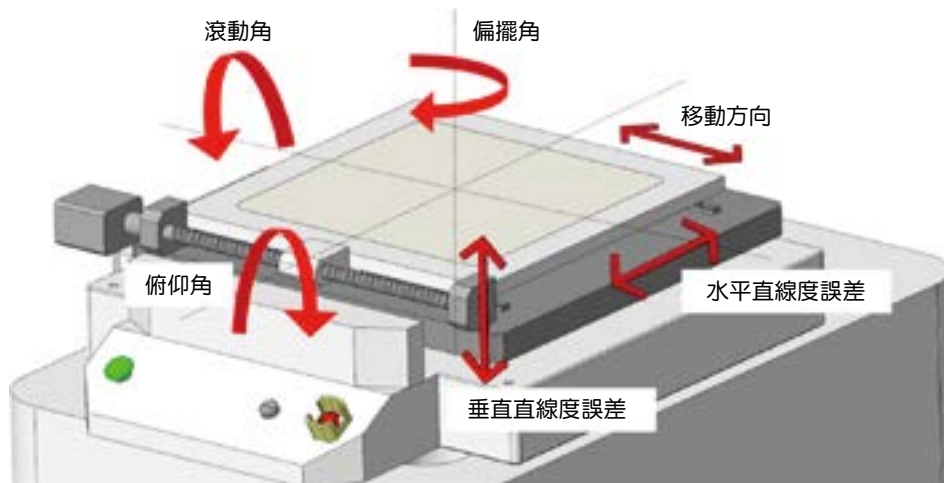


圖 1. 移動台六自由度誤差方向。

為了可以有效率的進行測量，將五自由度測量系統置於移動台上，如圖 2，並進行測量光軸與移動台運動軸的同軸校準，系統校準歸零後即可進行測量，當線性移動台沿著測量路徑移動時，測量讀值即為移動台的直線度與角度誤差值，而雷射干涉儀讀值與移動台本身的光學尺 (linear optical scale) 讀值相減則為定位誤差值。

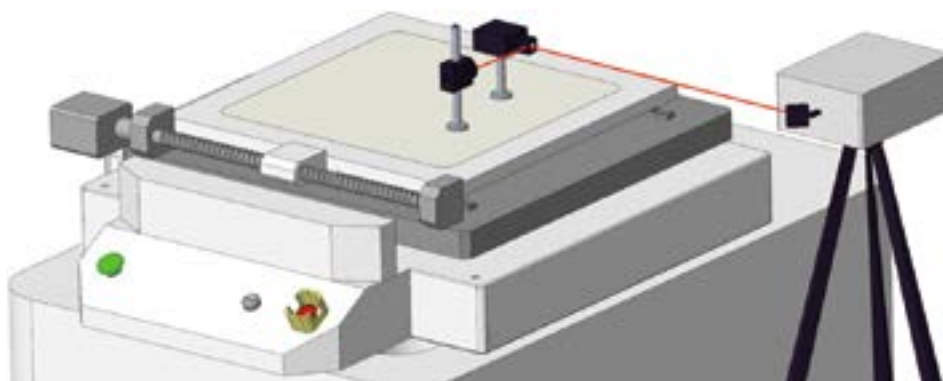


圖 2. 五自由度測量實驗架構。

三、測量工作原理

雷射準直儀⁽¹⁾由雷射光源與四象限感測器 (quadrant photodetector) 所組成如圖 3。四象限感測器是一種常見的位置感測器，由四個面積相同且光電性質相同的象限感光二極體 (photodiode) 組成，中間再由微小間隙隔出四個有效地感測區域，而雷射光具有高度的方向性且經過光擴束器 (beam expander)，當雷射光入射至感測器中心時，四個光電感測器所產生的電流應該會相同，而因投射在感光二極體上的雷射光束強度會影響電流的大小，當入射的雷射光束偏移四象限的中心點，會造成輸出的電流不相同，就可以透過處理感測器的輸出訊號，式 (1)、(2) 表示，得到光點的偏移情況。

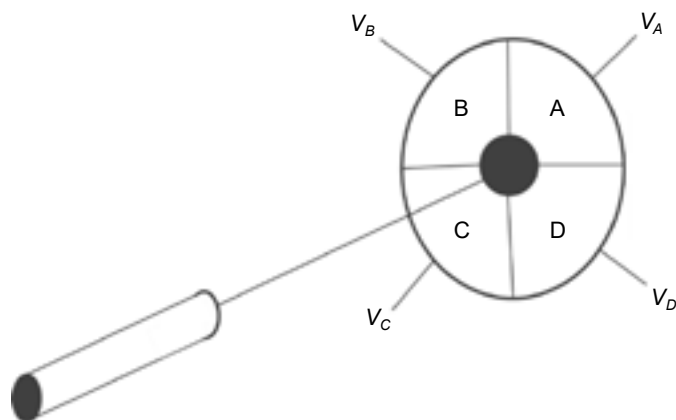


圖 3. 四象限感測器示意圖。

$$X = \frac{(V_A + V_D) - (V_C + V_B)}{V_A + V_B + V_C + V_D} \quad (1)$$

$$Y = \frac{(V_A + V_B) - (V_C + V_D)}{V_A + V_B + V_C + V_D} \quad (2)$$

自動視準儀^(1, 5) 可以測量微小的角度，圖 4 是其工作原理，入射光被反射後會沿著原光路回到入射處，如反射鏡與光線成 θ 角度傾斜時，反射光會以 2θ 之角度反射，再通過同視準透鏡使光束再集中到聚焦平面上。所以測量出光點的上下偏移量，就能換算出反射鏡的俯仰角。同理，光點的左右偏移量可得到反射鏡的偏轉角。

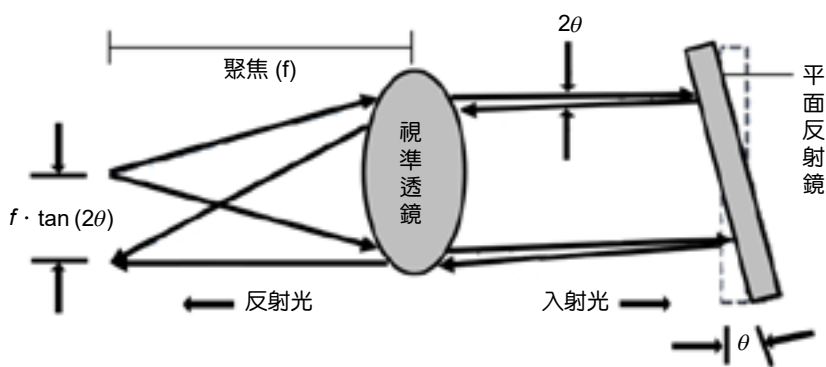


圖 4. 自動視準儀原理。

雷射都卜勒位移干涉儀^(1, 6) 主要用於位移的測量，穩頻氦氖雷射 (stabilized He-Ne laser) 射出後透過聲光調製器賦予雷射光束一個載波，擁有載波的雷射光束可以抵抗環境的干擾，再經過校準透鏡組可以將光束擴大且準直。光束射出後會經由可移動的角耦反射鏡反射回到感測器接收訊號，進一步比較訊號後可以解出位移值。圖 5 為雷射都卜勒位移干涉儀原理圖。

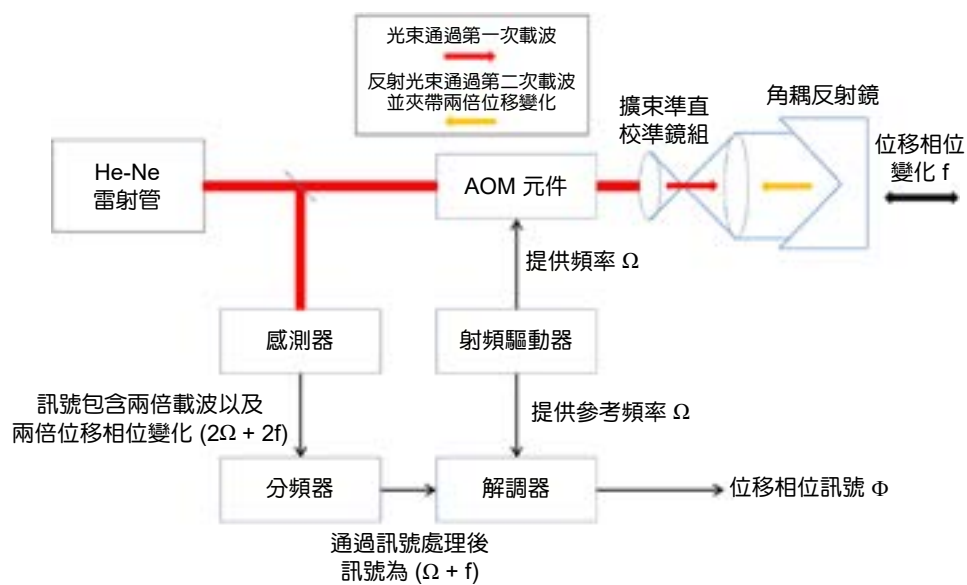


圖 5. 雷射都卜勒位移干涉儀原理圖。

四、系統架構

該五自由度測量系統架構如圖 6 所示，分別為圖 6(a) 移動測量模組與圖 6(b) 固定雷射模組兩部分，用於測量定位誤差、水平和垂直直線度等三個線性誤差，以及偏轉角和傾角兩個角度誤差。定位誤差測量基於都卜勒效應 (Doppler effect) 所測量得知移動目標的位移量；直線度誤差是使用四象限感測器檢測移動目標相對於準直的雷射光束的水平與垂直運動；角度誤差是由自動視準儀的原理，藉由解析探測器上的水平與垂直訊號，來測量偏轉和傾角誤差。測量訊號則透過 USB 1208HS 以及藍芽模組進行傳輸。

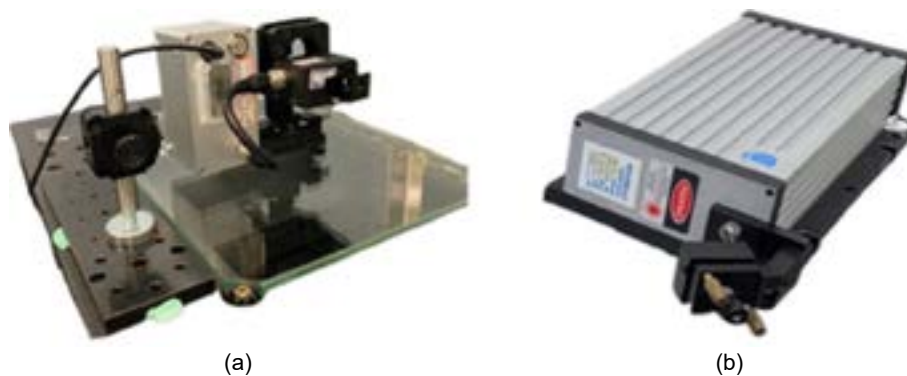


圖 6. 五自由度測量系統架構圖：(a) 移動測量模組，(b) 固定雷射模組。

該系統的光學配置如圖 7 所示，包含了一個固定雷射模組和一個安裝於移動目標上的測量模組。固定雷射模組的光源由雷射都卜勒位移干涉儀提供，替代原先四自由度測量系統的光纖雷射光源，使定位誤差得以測量，而在使用雷射進行測量前，必須進行雷射光軸的校

準，使其與移動台運動軸同軸，故有一 45 度微調反射鏡架安裝在干涉儀上，可以調整反射鏡架的微調螺絲，當雷射光點可以落於測量行程中近端與遠端的四象限感測器中心，即完成雷射光軸與目標物運動軸的校準。

在測量模組中，入射的參考光束會被分光鏡 1 分成兩路徑，反射光會被角耦反射鏡接收並再次反射回干涉儀，由干涉儀內部的感測器所接收並進行位移訊號處理及傳輸，穿透光則會被分光鏡 2 再次分成兩路徑。第二次分光的反射光被自動視準儀用於測量偏轉和傾角誤差，該反射光會聚焦在聚焦透鏡的焦點上，即角度誤差感測器。第二次分光的穿透光則被直線度感測器接收，用於測量移動目標的水平和垂直直線度。直線度與角度誤差的訊號會由藍芽模組傳送至電腦進行訊號處理。

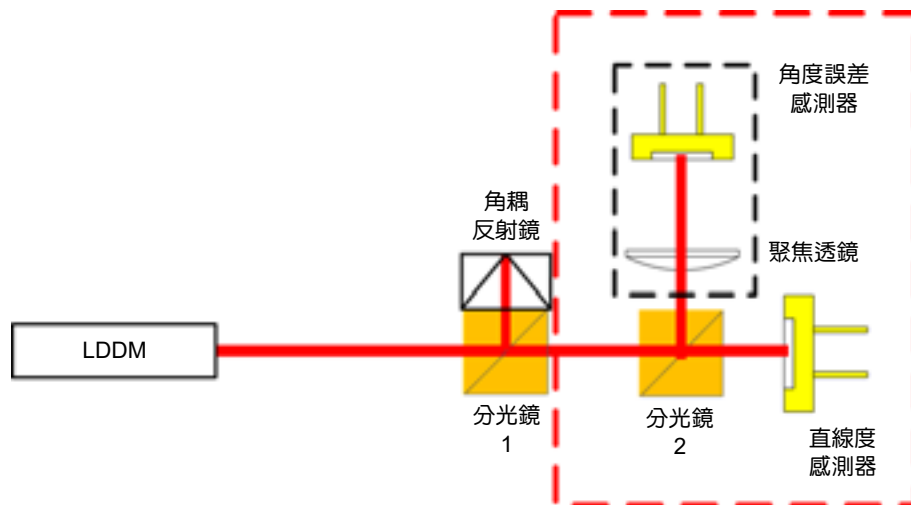


圖 7. 五自由度測量系統光學配置。

五、系統校正

該系統的直線度測量與角度測量為自行開發，故分別對兩個直線度誤差和兩個角度誤差進行精度校正，而進行定位誤差測量的雷射都卜勒位移干涉儀是使用 Optodyne Inc. USA 的 LICS-100，商用儀器其性能在出廠時已經過檢驗。

直線度誤差的校準參考使用了 Optodyne Inc. USA 所生產的雷射都卜勒測量儀 (laser Doppler displacement meter, LDDM)，使用型號為 LICS-100。水平直線度的校正實驗設置如圖 8(a) 所示，在校正過程中，靜止部分和運動部分之間的距離為 450 mm。為了校正垂直直線度誤差，LDDM 的雷射光束通過五稜鏡從頂部向下彎曲 90 度，如圖 8(a) 右下方的子圖所示，然後垂直平台逐步移動。對於角度誤差的校正，使用由 AutoMAT Co. 生產的自準直儀 (型號為 5000U) 做為參考。圖 8(b) 為校正俯仰和偏轉誤差的實驗設置。兩個角度平台包括俯仰以及偏轉平台，提供四自由度測量系統與自準直儀進行相對測量。

圖 9 表示了校正結果，在 $\pm 100 \mu\text{m}$ 範圍內的兩個直線度誤差的殘差 (residual) 都在 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 內，而在 $\pm 100 \text{ arc-sec}$ 範圍內的兩個角度誤差的殘差都在 $\pm 0.6 \text{ arc-sec}$ ，這個結果表明該四自由度測量系統的性能是可以接受的。

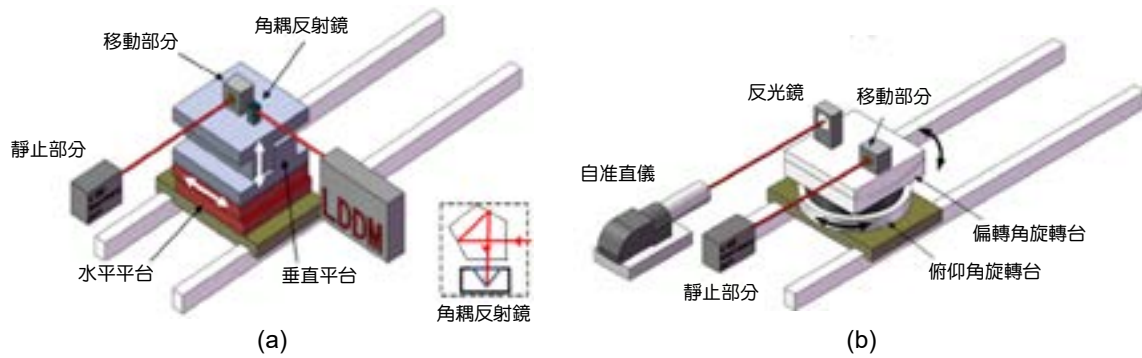


圖 8. 校正實驗設置：(a) 直線度，(b) 偏轉角、俯仰角。

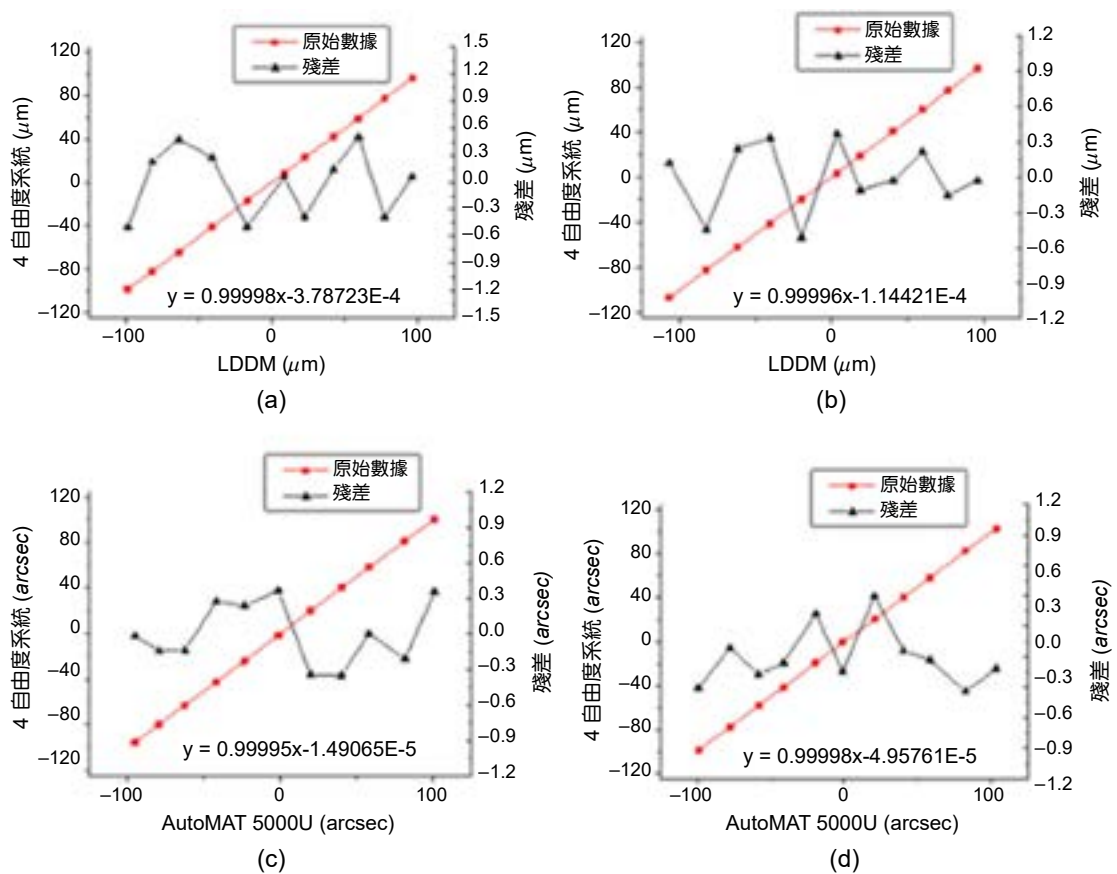


圖 9. 校正結果：(a) 水平直線度，(b) 垂直直線度，(c) 偏轉角，(d) 俯仰角。

六、測量實驗與結果

定位誤差因運動軸通常與位置感測軸不同軸而產生阿貝誤差 (Abbe error)，該誤差會造成實際位置與理想位置的誤差，可以透過比較線性移動平台的位移與干涉儀的測量值來得知該平台的定位誤差。

直線度誤差與角度誤差，指加工的軸線或是任何機械結構的軸線與理論上應遵循的直線軌跡或角度之間的偏差，機械加工產生的公差、設備安裝不當或是外部環境因素都會造成該誤差的產生。

實驗在一般商用 AOI 平台進行單軸的測量，會測量定位誤差、兩個直線度誤差以及偏轉和傾角兩個角度誤差。在測量時須先讓機器進行暖機 (warm-up) 的動作，每個測量行程至少需要包含 8 個測量點，且進行來回 5 次的測量。一般移動平台都由滾珠導螺桿作為帶動的零件，而滾珠導螺桿在進行反向運動時會產生反向誤差，故在每次運動的起點與終點都須在往前與往後一段距離再回到測量位置。

實驗照片如圖 10 所示，將五自由度測量系統固定至 AOI 設備的測量平台上，而該次實驗取 10 個點進行測量，每個測量點相互等距且同高的分佈在測量軸上，圖 11 至圖 13 顯示了測量結果，分別獲得直線度誤差、角度誤差以及定位誤差的測量結果。依測量結果可以得知一般自動化設備的精度較差，移動平台的總平均定位誤差逐漸變大，最大的誤差約來到 $85\ \mu\text{m}$ 。



圖 10. 實驗照片。

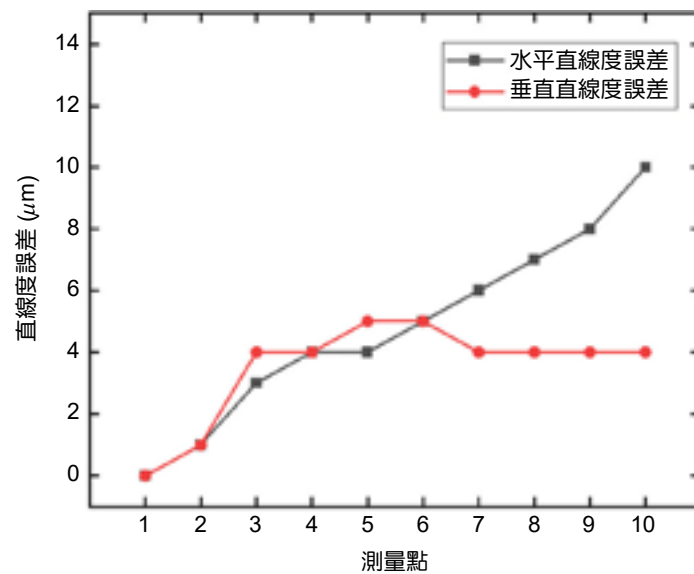


圖 11. 直線度誤差測量結果。

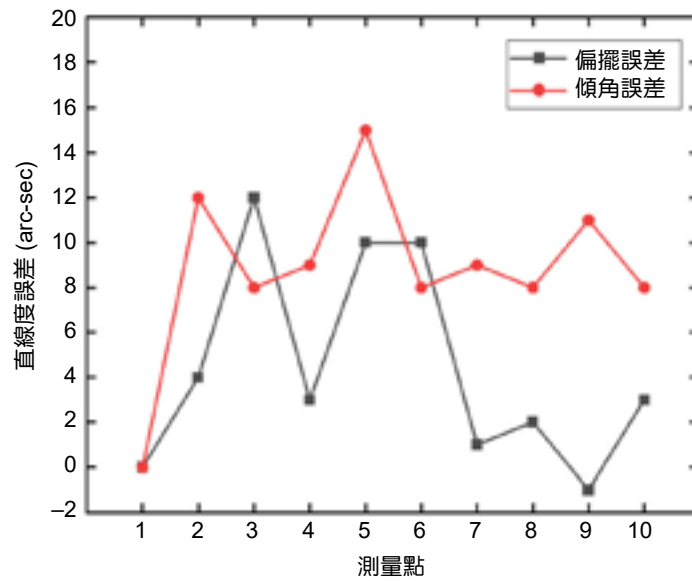


圖 12. 角度誤差測量結果。

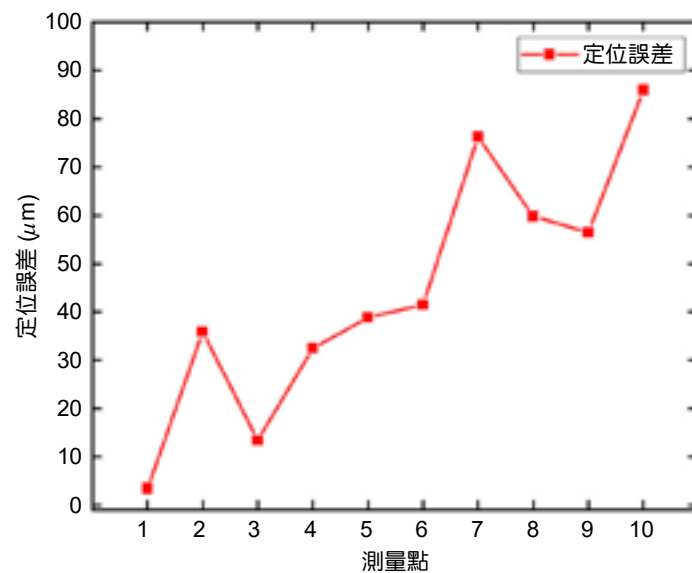


圖 13. 定位誤差測量結果。

七、結論

本研究開發了一種新型的五自由度測量系統，可以進行高速、高精度 (precision) 的測量，並在商用 AOI 平台進行測試。該系統可以同時測量運動軸的定位誤差、直線度誤差以及角度誤差等五自由度幾何誤差，所設計的系統結構簡單，可以方便的安裝在測量平台上，單雷射光束的設計也使得在光軸校準上變得容易，且直線度誤差測量精度達 $\pm 1 \mu\text{m}$ 、角度誤差測量精度達 $\pm 1 \text{ arc-sec}$ ，定位誤差測量分辨率為 $0.01 \mu\text{m}$ 、測量精度優於 2 ppm。未來可以拓展至六自由度測量系統，但測量滾動誤差會用到平行光束，光束的平行度如何方便調整是一個需要注意的問題。

參考文獻

1. 范光照, 曾百由, 精密機械精度基礎, 初版, 新北: 高立, (2018).
2. C. H. Liu, W. Y. Jywe, I. C. Chen, L. L. Duan, H. H. Jwo, et al., *Tech. Mess.*, **76**, 245 (2009).
3. C. Kuang, E. Hong and J. Ni, *Rev. Sci. Instrum.*, **78**, 0950105 (2007).
4. W. Jywe, Y. R. Jeng, C. H. Liu, Y. F. Teng,, *Part B: Journal of Engineering Manufacture*, **223** (4), 443 (2009).
5. 何傑, 科儀新知, **128**, 68 (2002).
6. Charles C. P. Wang, Rancho Palos Verdes; Joe S. B. Zhou, Monterey Park, both of Calif. Interferometer requiring no critical component alignment, United States Patent, 5116126, (1992).

作者簡介

魏承弘先生現為國立臺北科技大學製造科技研究所碩士生。

Cheng-Hung Wei is currently a M.S. student in the Graduate Institute of Manufacturing Technology at National Taipei University of Technology.

范光照先生為英國曼徹斯特科技大學機械工程博士，現為國立臺灣大學機械系名譽教授。

Kuang-Chao Fan received his Ph.D. in Mechanical Engineering from Manchester University, UK. He is currently an Emeritus Professor in the Department of Mechanical Engineering at National Taiwan University.

何昭慶先生為臺灣科技大學電機工程博士，現為國立臺北科技大學機械工程系暨製造科技研究所教授。

Chao-Ching Ho received his Ph.D. in Electrical Engineering from National Taiwan University of Science and Technology. He is currently a Professor in the Department of Mechanical Engineering and Graduate Institute of Manufacturing Technology at National Taipei University of Technology.

CIGS 薄膜太陽能板之光致發光 自動光學檢測系統開發

An Automatic Inspection System Development Based on Photoluminescence for CIGS Thin Film Solar Panels

林志豪、陳銘福、陳柏睿、蔡和霖、連俊傑

Chih-Hao Lin, Ming-Fu Chen, Po-Jui Chen, Ho-Lin Tsay, Chun-Chieh Lien

太陽能電池是作為光電能源轉換的重要基本元件，而光電轉換效率與製造成本是最重要的兩大關鍵因素。CIGS 薄膜太陽能電池可以節省大量原料又具可撓特性，寬廣的吸收光譜範圍與 18% 以上的光電轉換效率，被認為具有很好的發展潛力。設計開發之 CIGS 薄膜太陽能板之光致發光 (photoluminescence, PL) 自動光學量檢測系統設備包含 PL 光譜量測與 PL 光學檢測兩套系統，並可與太陽能板產線整合來進行 CIGS 薄膜太陽能板的線上全檢。系統設備可對最大尺寸為長 1220 mm × 寬 620 mm 的薄膜太陽能板進行快速螢光光譜掃描、螢光影像拍攝及量檢測資料處理分析，每片太陽能板可在 60 秒的節拍時間 (takt time) 內完成進出料及螢光全波段光譜量測或高解析影像的擷取，然後在出料的時間內完成檢測分析，同時輸出資料至機器學習系統並預測終端產品發電效能，符合生產線速度需求，兩套 PL 量檢測系統的穩健性與檢測精確性也通過產線驗證，提供上銀光電公司的太陽能電池產線之線上全檢測服務，除可提前檢出不良品外，並可依檢測分析與研判結果即時調整製程與設備。

Solar cells are the important fundamental components for photovoltaic energy conversion. Photovoltaic conversion efficiency and manufacturing cost for solar cells are the most critical factors. Copper Indium Gallium Selenide (CIGS) thin-film solar cells can save lots of raw materials and have flexible properties, a wide absorption spectrum range and more than 18% photovoltaic conversion efficiency. Thus CIGS thin-film solar cells are considered to have good development potential. Developed automatic optical inspection system based on photoluminescence (PL) for CIGS thin film solar panels includes a PL spectra measuring subsystem and a PL optical inspection subsystem. And the system is integrated with the production line system to provide full inspection for CIGS solar panels. The system measures CIGS thin film solar panels with a length of 1220 mm and a width of 620 mm for PL spectra, PL images, and data processing. The system can load solar panels in and out and measure PL spectra or acquire PL images within a takt time of 60 seconds. At the same time as loading out the solar panel, the measured data are processed and transferred to the machine learning system to predict the photovoltaic conversion efficiency. Stability and accuracy of the system were validated in the mass production phase. The in-line full inspection service for solar

panel production line was built as well. The system helps not only for filtering out the NG products but also for real-time adjusting the manufacturing process and equipment by the comprehensive analysis results.

一、前言

太陽能電池產業依技術不同，可分為矽晶與薄膜等兩大類。矽晶類是採半導體製程的製造方式，因為技術比較成熟以及大量製造，使得相對生產成本仍然比較低，目前佔市場的大部分。薄膜類則是採鍍膜方式，它的特點是反應層很薄，只有幾微米，目前 CIGS 型態是其中最具效率和成本優勢的薄膜太陽能電池。在全球 CIGS 太陽能板市場需求與現況方面，因為具有光譜吸收範圍較寬、可應用於可撓式基板及製造與應用彈性比較大等優勢，極具太陽能市場需求潛力。主要商機是在維護綠色環境、建物整合太陽能及太陽能電廠部署等領域。

因薄膜太陽能電池可以製鍍幾層微米級厚度的太陽光吸收層薄膜製程，極具良好的太陽能吸收與光電轉換效率，其光電轉換率可大於 18%⁽¹⁾，相較於半導體製程太陽能電池，薄膜製程方式可節省大量原材料、應用於可撓式基板⁽²⁾、在太陽光照較弱及早晨與傍晚時段(較高比率近紅外光)仍可發電⁽³⁾等特性，故而被認為是極具發展潛力的綠色能源⁽⁴⁾之一。CIGS 薄膜太陽能電池由玻璃基板、金屬鉬背電極、CIGS 吸收層、ZnS 緩衝層及透明導電薄膜(TCO)等所構成，其中 CIGS (copper indium gallium selenide) 的吸收層薄膜結構具有 350 nm – 1250 nm 的吸收光譜範圍及高光吸收係數 ($> 10^5/\text{cm}$)⁽⁵⁾，而相較於吸收光譜範圍在 400 nm – 700 nm 的矽晶半導體製程太陽能電池，CIGS 太陽能電池在早晨和傍晚時段則具有較佳的發電效能。

本檢測設備開發計畫為依客戶需求來研發可使用於 CIGS 薄膜太陽能電池製程中，建置太陽能板光致發光之光學檢測 (optical inspection) 與光譜量測 (spectral measurement) 之線上檢測系統機台，光致發光為薄膜材料檢測常用的工具，CIGS 薄膜發出的螢光波長約 1000 nm – 1300 nm⁽⁶⁾，螢光光譜的半高全寬⁽⁷⁾等參數可用於分析能帶間隙狀況，進而推估太陽光吸收能力。本設備可在完成 CIGS 主動層的薄膜製程之後，以本文所開發的光致發光之螢光強度與波長分佈之檢測設備，對整片太陽能板進行製程品質的即時檢測，可即時提供太陽能板製程之結果分佈及品質狀況，作為製程參數調整改善、設備參數、耗損狀態與更換的依據，以提升太陽能電池的生產品質與發電效能及競爭力。本設備可在 1 分鐘內完成一片板材的進出料及螢光之影像與波長的資料擷取與儲存，除了可提前驗出不良品，防止浪費後續上電極等製程與相關檢測⁽⁸⁾的成本外，還可依檢測分析與研判結果調整製程與設備。

完成客製化開發的太陽能板 PL 線上即時全檢測的 AOI 設備，是台灣儀器科技研究中心(儀科中心)結合台灣傳動產業第一大廠:上銀集團所開發，在台灣是首創且已導入專精於無鍍製程之碲化銅銦鎘 (CIGS) 薄膜太陽能電池模組生產上銀光電公司的生產線。檢測設備已於 2020 年初和生產線完成系統整測及壓力測試，確認設備的功能與性能符合要求，持續提供上銀光電公司的 CIGS 太陽能電池生產線的線上全檢測需求。

本量檢測系統機台與產線系統完成整測之後，可應用於以 PL 螢光特性進行線上板材品質檢測，取得 PL 光譜分佈及 PL 螢光強度分佈與表面污染微粒檢測等資訊，以利於鍍膜製程之品質評估與篩檢，為監控產線階段成品品質的一項重要檢測設備，並可取得產線品質數據及做為建立 IoT 4.0 管理架構之基礎設施，搭配後端的資料庫與數據分析工具，可提高

生產效能及具備產線智能化之能力。一般而言，自動光學檢測系統設備均不便宜，但本系統從系統架構設計與關鍵組件選用上，已考量在可符合系統性能規格狀況下，儘量降低硬體數量與成本，使得量檢測系統具有最大的性價比及維修便利性。

二、系統需求規格分析與架構設計

1. 系統操作場景與架構

本系統依使用者之量檢測需求分為兩個獨立的量檢測站位開發：

(1) CIGS 板材 PL 光譜量測機台：PL 光譜量測機台主要使用於板材 PL 螢光光譜的量測與分析，由兩大系統組成：(1) 板材 PL 光譜量測系統：量測系統主要由 PL 光譜量測裝置 (8*SWIR 光譜儀 + 激發光照明模組)、光譜資料之處理與儲存系統及光譜量測分析軟體等構成。(2) 光譜量測之定位移動平台：定位移動平台須具備可配合量測系統擷取光譜之功能及性能與精度等需求之移動與定位以及板材進出料與精密定位等功能。

(2) CIGS 板材 PL 光學檢測機台：PL 光學檢測機台主要使用於板材 PL 螢光分佈量測及污染物檢測，亦由兩大系統組成：(1) 板材 PL 光學檢測系統：檢測系統主要由 PL 光機取像裝置 (SWIR 面型相機與鏡頭 + 匹配照明範圍之激發光源模組)、影像資料之處理與儲存系統及光學檢測軟體等構成。(2) 光學檢測之定位移動平台：定位移動平台須具備可配合檢測系統取像之功能、性能與精度等需求之移動與定位以及板材進出料與精密定位等功能。

設備開發合作模式則為：(1) 儀科中心：負責光學檢測系統開發，包含系統規劃設計、陣列光機取像系統、檢測演算法與軟體及人機介面等。(2) 上銀科技：負責自動化平台開發，包含精密定位移動平台及上下料機械手臂。(3) 上銀光電：負責設備使用需求規格及設備系統效能與壓力測試等。(4) 由三方協同合作完成線上設備的系統整合測試與驗證。

考量能完整而正確的定義量測系統的架構及其需求規格與介面，故須清楚地描述系統的操作場景與外部介面，系統架構與操作場景如圖 1。

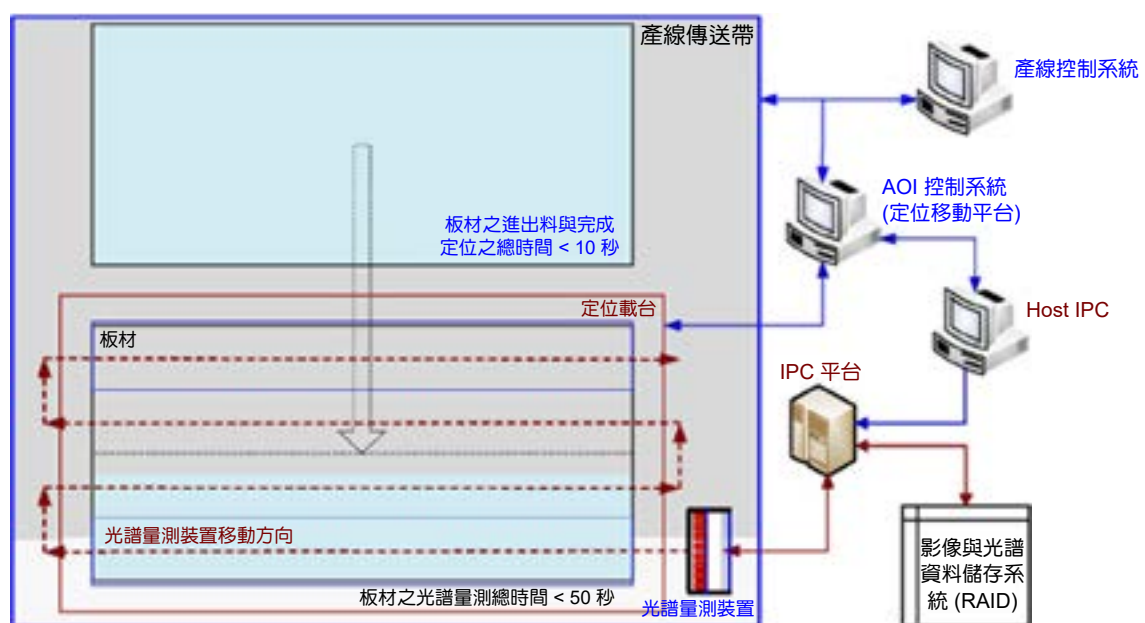


圖 1. CIGS 板材 PL 光譜量測之線上量測系統架構與操作場景。

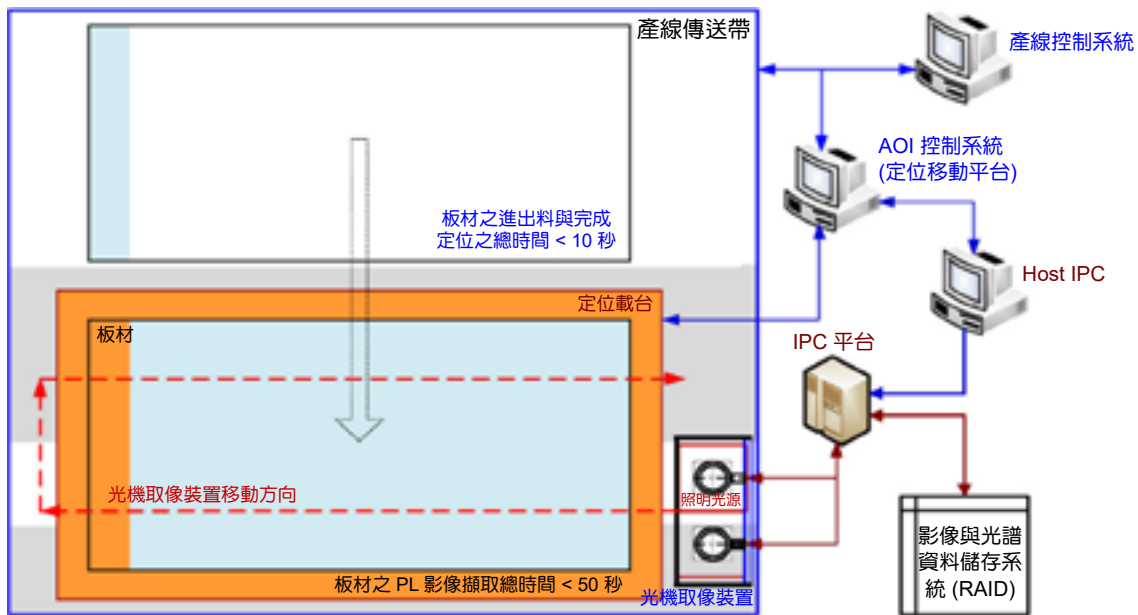


圖 2. CIGS 板材 PL 光學檢測之線上量測系統架構與操作場景。

CIGS 板材 PL 光譜量測機台：板材從產線的上一站傳送至 PL 光譜量測站位之後，進出料系統立即將待測板材移入量測區，並進行板材精密定位，完成後即進行全板材之 PL 螢光光譜資料量取與儲存等程序，完成之後亦立即進行資料處理與分析及品質評估參數解算，以做為板材鍍膜品質評估及製程改善之依據。

CIGS 板材 PL 光學檢測機台：板材從產線的上一站傳送至 PL 光學檢測站位之後，進出料系統立即將待測板材移入量測區，並進行板材精密定位，完成後即進行全板材之 PL 螢光影像擷取與儲存等程序，然後進行 PL 螢光影像校正處理與資料分析及污染物檢測等程序，以做為板材鍍膜品質評估及製程改善之根據。

兩個量檢測站位可共用一台 IPC，其廠牌與型號和已建置完成並使用於產線的另一 AOI 系統機台之 IPC 相同，且系統架構也設計為可與另一 AOI 系統之磁碟陣列儲存系統共用，故可大幅降低量檢測站之硬體建置與維修及備品之成本。

2. 系統需求規格與分析

依所提出之 CIGS 板材 PL 光譜量檢測之使用者需求，經初步規劃與分析後，以尺寸 $620 \times 1220 \text{ mm (W} \times \text{L)}$ 之待測板材為量測標的物，其系統需求規格分述如下：

2.1 板材 PL 光譜量測機台

- (1) 量測項目：板材 PL 光譜波長分佈量測及 PL 光譜分佈評估參數解算，項目包含 (A) 單點：光譜範圍中心波長、波寬 (3σ)、光譜輻射強度；(B) 全部量測點／板材：中心波長之平均值與標準差、波寬之平均值與標準差、光譜輻射強度之平均值與標準差。
- (2) 光譜量檢測效能：(A) 待測板材進出料與定位效能：總時間 < 10 秒；(B) 光譜量測裝置之量取效能：總時間 < 50 秒。(C) 檢測效能：每片板材之量測解算時間須 < 60 秒。

2.2 板材 PL 光學檢測機台

- (1) 檢測項目：以板材 PL 螢光強度分佈評估鍍膜品質；板材表面污染物之檢測。

- (2) PL螢光量檢測之需求規格：(A) PL 螢光強度分佈量測 (評估參數)：以 PL 螢光影像輻射度之平均值 (m_{PL}) 與標準差 (σ_{PL}) 評估板材鍍膜品質。(Based on：(1) 全板材範圍，(2) 每幅影像之板材範圍，(3) 標定區域範圍)；(B) m_{PL} 與 σ_{PL} 之篩檢標準可以操作介面加以設定；(C) 板材表面污染物檢測：尺寸 $> 750 \times 750 \mu m$ (3×3 pixels) 者須檢出。
- (3) 光學取像效能：(A) 待測板材進出料與定位效能：總時間 < 10 秒；(B) 光機取像裝置之取像效能：總時間 < 50 秒。
- (4) 檢測效能：每片板材檢測解算時間須 < 60 秒。

3. 系統設計與分析

依上述的系統需求規格進行規劃與分析之後，CIGS 板材 PL 線上量檢測系統由 CIGS 板材 PL 光譜量測機台 (板材 PL 螢光光譜量測與分析) 及 CIGS 板材 PL 光學檢測機台 (板材 PL 螢光分佈量測與評估及污染物檢測) 構成。兩者之系統基本架構很類似，以 PL 譜量測裝置或 PL 光機取像裝置、資料處理與儲存系統、精密定位移動平台、系統量檢測軟體及系統操作管理軟體等次系統所構成，CIGS 板材 PL 光譜量測與光學檢測之線上量測系統的功能方塊與介面之設計如圖 3 所示；茲將各次系統之功能分述如下：

- (1) **PL 光譜量測裝置**：主要功能為在滿足系統之光譜資料量測效能需求下，快速量取所需解析度的板材 PL 螢光光譜資料。光譜量測裝置主要由多組高性能 SWIR 光譜儀 (8 組)、激發光照明模組等構成；每一光譜儀量取點範圍為 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ，Y 軸每移動一次可同時量取 8×61 點的光譜資料，可在 43 秒內完成 $1220 \text{ mm} \times 620 \text{ mm}$ 板材之光譜量取。
- (2) **PL 光機取像裝置**：主要功能為符合系統取像效能需求下，快速取得板材 PL 螢光影像。光機取像裝置主要由面型高性能 SWIR 相機與光學鏡頭、激發光照明模組等組成，以取得檢測用板材 PL 螢光影像。在符合檢測功能與效能需求下，影像空間解析度為 $250 \mu m/\text{pixel}$ ，光機取像裝置為以 2 組光學取像模組構成，每次可同時拍攝二幅影像，來回掃描一次即可在 40 秒之內完成 $1220 \text{ mm} \times 620 \text{ mm}$ 板材之取像。
- (3) **資料處理與儲存系統**：PL 光譜量測裝置之螢光光譜資料及 PL 光機取像裝置之螢光影像會被即時的暫存於 IPC 記憶體中，隨之再轉存至容量 300 GB 之 SAS 磁碟中。IPC 也是光譜與影像資料之處理分析與量檢測之運作解算平台，具有雙 CPU 多核心、64 GB RAM 及 300 GB SAS 磁碟，以提供資料儲存及多執行緒 (multi-thread) 運算等功能。
- (4) **精密定位移動平台**：主要功能為提供 PL 光譜量測系統及 PL 光學檢測系統的自動精密定位與移動的需求。定位移動平台須具有重覆定位精度 $< 20 \mu m$ 及最大移動速度達 500 mm/sec 的性能需求，行程範圍須符合可取得板材全部範圍之 PL 螢光之光譜與影像資料。
- (5) **系統量檢測軟體**：主要功能為即時讀取完成取像而儲存於 IPC RAM 中的板材 PL 光譜資料及影像資料，再進行板材 PL 光譜評估參數解算以及進行 PL 螢光影像校正處理及量測評估參數解算與污染物檢測等，可評估鍍膜分佈與品質及依檢測標準篩檢板材表面瑕疵，然後產生及儲存量檢測結果，再依操作需求將之儲存於磁碟陣列儲存系統。
- (6) **系統操作管理軟體**：主要功能為提供 PL 光譜量測機台及 PL 光學檢測機台的操作與管理及圖形使用介面 (GUI)，以利於工程師與 OP 進行系統之參數設定、操作管理與監控及異常狀況處理等工作。

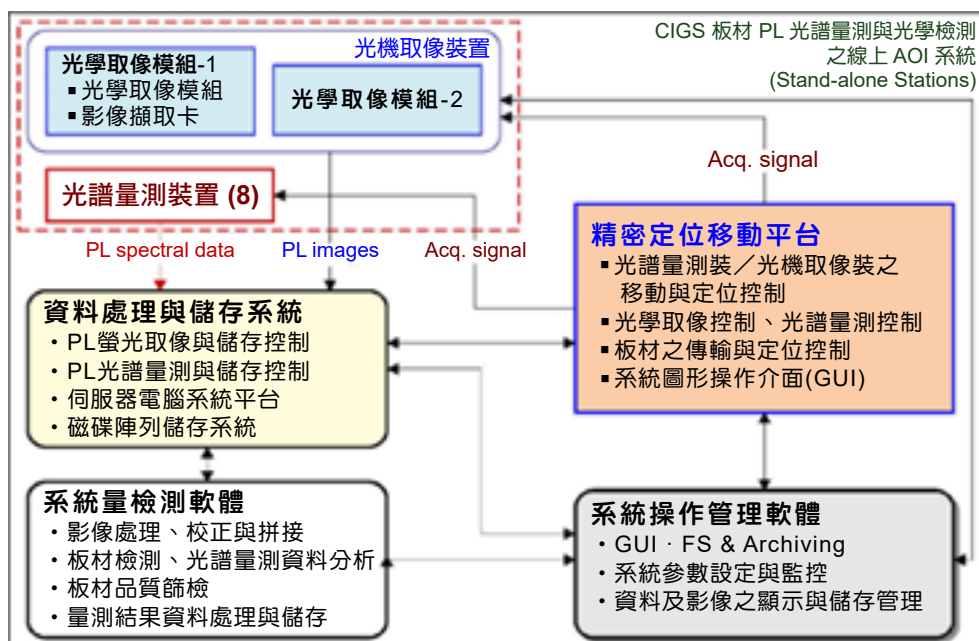


圖 3. CIGS 板材 PL 光譜量測與光學檢測之線上量測系統之功能方塊與介面圖。

考量關鍵組件的性能與品質、選擇彈性、來源穩定性以及產品更新時可藉由更換組件與調整系統軟體參數來提昇量檢測系統性能等因素，故以市購產品為選用標的。故經評估市售關鍵組件規格與性能以及完成系統架構與設計分析後，PL 光譜量測裝置、PL 光機取像裝置、資料處理與儲存系統及精密定位置移平台等次系統與硬體需求規格及設計分析如下：

(1) PL 光譜量測裝置

- 以多光譜儀構成可同時進行多點光譜量測之系統架構設計，光譜量測儀之可量測光譜範圍：900—1700 nm，量測積分時間範圍：1 ms—65 sec。
- 單一光譜儀之單點量測代表範圍：20 mm × 20 mm，板材長短邊之量測點數分別為 61 點與 31 點；單次光譜量測時間：0.16 秒，完成長邊 (X 方向) 61 點量測時間 ≈ 10 sec。
- 完成板材量測之短邊 (Y 方向) 橫向移動 3 次，每次移動之板材量測寬度 160 mm，光譜儀需求數為 8 台。因此共掃描 4 次，每片板材之光譜量測總時間 ≈ 43 秒。
- 激發光照明範圍須涵蓋：180 × 50 mm。
- PL 光譜量測裝置之架構設計如圖 4 所示；8 組光譜儀之測頭與照明模組整合，於 Y 軸上移動來量取光譜資料，搭配 X 軸移動，可進行全板材之光譜量測。

(2) PL 光機取像裝置

- 以面型光機取像裝置取得待測板材之 PL 螢光影像，以進行板材之鍍膜品質評估及表面污染物檢測。
- 物空間解析度：250 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ ，影像視野 160 mm × 128 mm；圖 5 為 PL 光機取像裝置架構設計，由兩組光學取像模組構成，每組光學取像模組配置 1 組面型高亮度 PL 激發光照明模組。激發光照明模組是以多個照明元件加以排列製作而成，提供符合照明範圍與強度及均勻性需求之激發光源，照明範圍涵蓋 180 mm × 140 mm。
- 相機：解析度 640 × 512 pixels、15 × 15 m/CCD、光譜涵蓋 900—1700 nm。鏡頭 WD ≥ 250 mm，可搭配 SWIR 相機。單幅影像 (PL 螢光) 之取像曝光時間 < 1.0 秒。

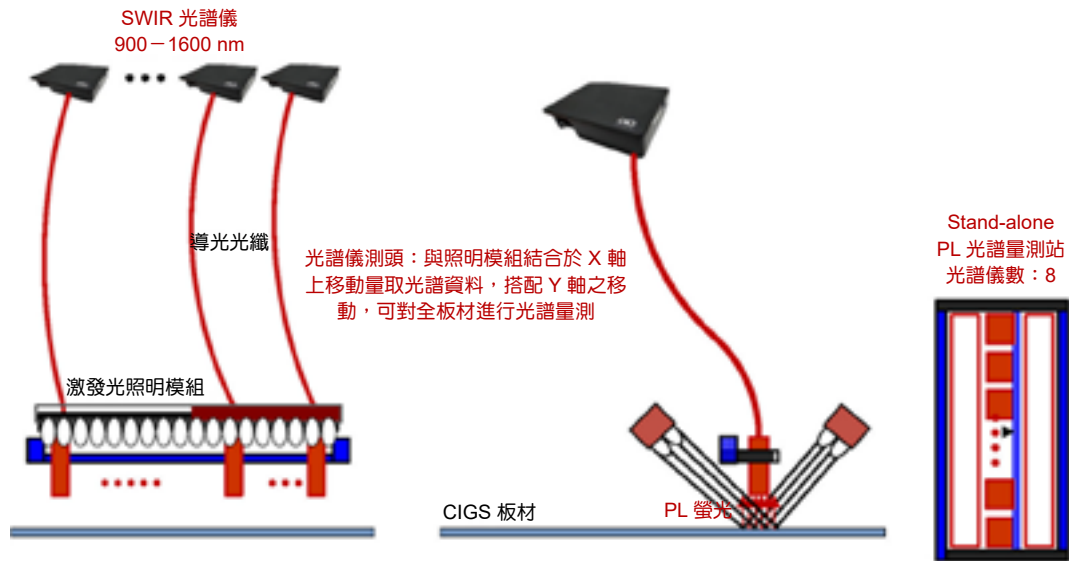


圖 4. PL 光譜量測裝置之架構設計。

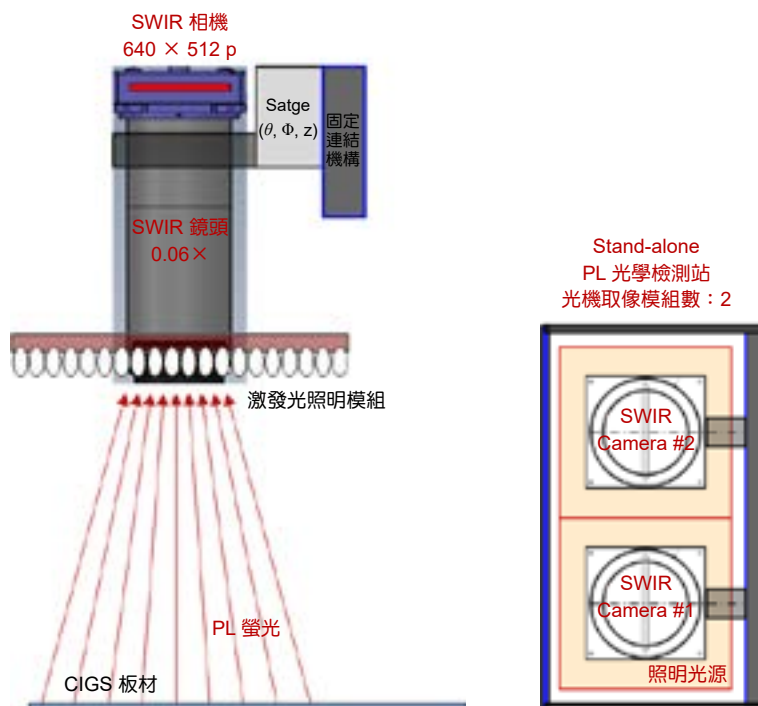


圖 5. PL 光機取像裝置之架構設計。

- 光機取像裝置於 X 軸向依序移動進行 PL 螢光取像，搭配 Y 軸移動 1 次，再於 X 軸向移動進行取像，即可完成全板材之 PL 螢光影像擷取，總取像時間約 40 秒。
- 單一光學取像模組重量 ≤ 12 Kg (包含相機、鏡頭、激發光照明模組、機構、三軸微調滑台等)，光機取像裝置之總重量 ≤ 25 Kg。

(3) 資料處理與儲存系統

- 儲存系統架構與容量：IPC 採用伺服器等級電腦平台，以 PCIE 介面及影像擷取卡與兩組光機取像模組進行影像資料傳輸。IPC 亦藉由 PCIE 介面與磁碟陣列儲存裝置連結，以儲存影像資料及量檢測結果。
- 量檢系統之主要硬體項目：(1) CIGS 板材 PL 光譜量測系統：SWIR (900–1700 nm) 光譜儀 8 台；PL 激發光照明模組 1 組；IPC 電腦伺服器平台 1 台。(2) CIGS 板材 PL 光學檢測系統：PL 螢光光學取像模組 2 組；PL 激發光照明模組 1 組；IPC 電腦伺服器平台 (與 PL 光譜量測系統共用)。

(4) 精密定位移動平台

- 取像移動架構：待測物完成定位之後，採取以移動 PL 光譜量測裝置或 PL 光機取像裝置的架構與方式進行 PL 光譜量測或影像擷取。
- 精密移動定位平台初步需求規格：
 - a. 三軸行程範圍：X $\geq$ 1240 mm、Y $\geq$ 400 mm、Z $\geq$ 200 mm。三軸之最大移動速度須達 500 mm/sec；重覆定位精度 $\leq$ 20 μ m。
 - b. 軸向承載能力須 $>$ 25 公斤 (可安裝 PL 光譜量測裝置或 PL 光機取像裝置)。
- 具有 X、Y、Z 軸防撞感應器，並可以軟體方式設定行程的安全極限，個別防撞感應器位置於最大行程內可依系統需求進行調整，機構潤滑須使用無塵油。

機台研發規格整理如表 1：

表 1. 機台研發規格表。

機台站點	PL 光譜量測機台	PL 光學檢測機台
量測光譜範圍	900–1700 nm	900–1700 nm
光譜解析度／影像解析度	$\leq$ 10 nm	250 μ m/pixel
激發光照明範圍	180 $\times$ 50 mm	180 mm $\times$ 140 mm
單次量測／拍攝範圍	2mm $\times$ 2 mm	160 mm $\times$ 128 mm
每片總量測點數／拍攝張數	61 $\times$ 31	10 $\times$ 4
總量測時間	$\leq$ 60 sec	$\leq$ 60 sec

三、量檢測系統建置

1. PL 光譜量測裝置

本裝置主要包含下列元件：

- 激發光高功率 LED 控制電路板及散熱元件

PL 等非線性光學效應需要高強度激發光源，故本裝置使用自行設計並委外製作的電路板，不使用市售控制設備以節省成本。自行設計之高功率電路板除了連接高功率電源供應器與控制電腦外亦可監控散熱元件，並在散熱元件異常時通知產線系統緊急停機以避免電路板損壞。

- 激發光高功率 LED 陣列

由 20 顆 LED 組成的陣列需要在工作距離處之特定範圍內達到均勻的照明，設計製作完成

後再使用積分球掃描照明範圍內光強度以確保光源均勻性。

- 激發光高功率 LED 濾鏡

因白光 LED 使用藍光 LED 晶片搭配黃光螢光粉，在高光強度的情況下會產生一些近紅外光，故需另加近紅外光濾鏡避免干擾 PL 光譜量測結果。

- 光譜儀測頭與導光光纖

由 8 組光譜儀測頭與導光光纖組成，測頭將板材發出的螢光導入光纖內，因激發光強度遠大於螢光，光譜儀內激發光波長的整數倍波段附近會出現明顯雜訊，嚴重干擾螢光光譜分析結果。故此處光路加上了可見光濾鏡以得到正確的螢光光譜。

- 光譜儀與 USB 連接線

光譜儀使用 8 台市售 OtO 產品，並使用 USB 傳輸線供電並傳輸資料。為強化操作穩定性，USB 線接到 USB Hub 再接到控制電腦，光譜儀用電源由 USB Hub 獨立提供而不和控制電腦的其他元件共用。

圖 6 為 PL 光譜量測裝置組裝完成後之圖片，此裝置架設在精密定位移動平台上，藉此掃描板材上不同區域的光譜。

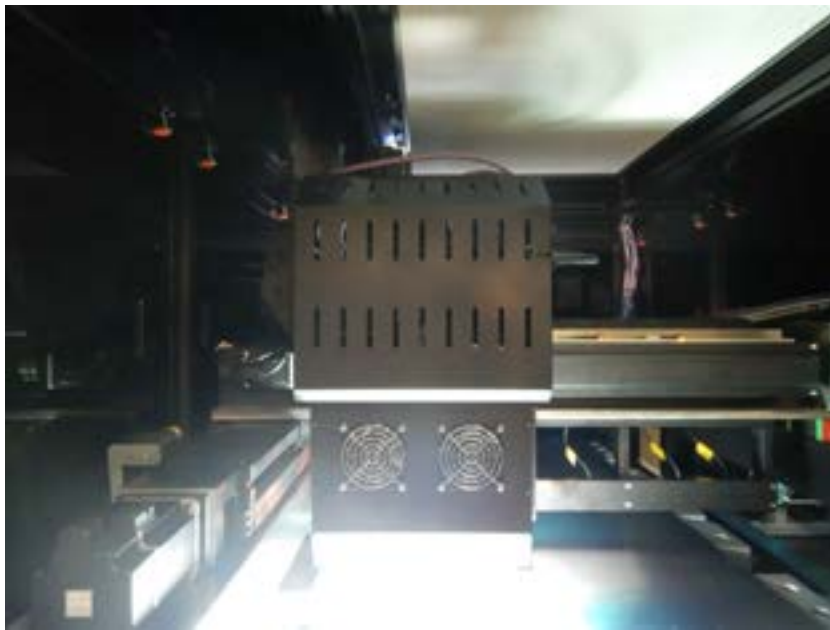


圖 6. PL 光譜量測裝置之實體圖。

2. PL 光機取像裝置

本裝置主要包含下列元件：

- 激發光高功率 LED 控制電路版及散熱元件

和 PL 光譜量測裝置類似，本裝置亦使用自行設計並委外製作的電路板。因 PL 光機取像範圍較大，使用的 LED 數量較多，故使用四片電路板分別控制不同區域的 LED。

- 激發光高功率 LED 陣列

由於照明區域較大，需要 68 顆 LED 組成陣列使相機視野範圍內達到均勻的照明，設計製

作完成後將激發光打在白紙上，再使用輝度計檢查整個照明範圍內光強度的均勻性。

- 激發光高功率 LED 濾鏡

和 PL 光譜量測裝置類似，白光 LED 也會在高光強度的情況下會產生近紅外光，故需另加近紅外光濾鏡避免 PL 影像受到干擾。

- 相機鏡頭與濾鏡

和 PL 光譜量測裝置類似，激發光強度遠大於螢光，且鏡頭為市售品僅設計近紅外光抗反射，可見光仍然有相當的強度穿透，干擾相機影像，故 2 支光機之鏡頭皆加上可見光濾鏡以避免出現 LED 的鬼影。

- 相機與 CL 連接線

2 台相機使用市售 Raptor 產品，使用獨立的變壓器供電與 CL 傳輸線傳輸資料。因此型號為 VIS-SWIR 波段，正常量測時需要在相機光路處濾掉可見光，才能得到正確的 PL 影像。

圖 7 為 PL 光機取像裝置組裝完成後之圖片，此裝置架設在精密定位移動平台上，藉此拍攝板材上不同區域的影像，再拼接成一張整個板材的圖片。

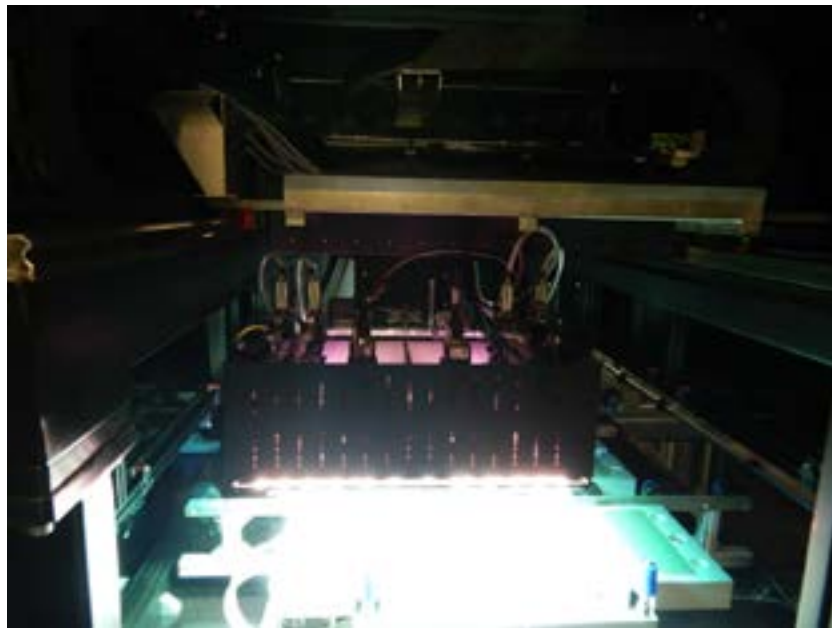


圖 7. PL 光機取像裝置之實體圖。

3. PL 整合控制軟體系統

本軟體系統包含系統操作管理軟體與系統量檢測軟體等軟體模組，同時與產線 PLC 系統高度整合進行全自動量檢測，將光譜資料與螢光影像合併分析並將結果上傳外部伺服器，本軟體系統主要包含下列元件：

- PLC 通訊控制

控制電腦和 PLC 以乙太網路連接，電腦和 PLC 建立 TCP socket 連線後，以 PLC 設備的封包傳輸協定讀取或寫入 PLC 的特定位址記憶體。產線端規畫一些記憶體區塊並給予特殊

意義，使控制電腦端得知目前處於流程的哪個站點並進行對應的操作，或是完成對應操作通知 PLC 進行流程下一步等。

- LED 與散熱裝置控制

可由 PLC 下指令或從使用者介面手動控制，手動控制需可單獨控制個別 LED。因為部分 LED 可能會出現亮度衰減造成照明不均勻，控制電路板韌體記憶個別 LED 上次電流設定並可在 PLC 下指令時以該電流設定驅動個別的 LED。此外，本元件亦監控 LED 與散熱裝置的狀態，在出現異常時通知 PLC 以通知產線人員進行處理。

- 光譜量測流程控制與光譜資料處理解算

電腦和產線端建立一套 PLC 通訊協定，光譜量測裝置移動到定點時 PLC 通知電腦量測光譜，量測完成後電腦通知 PLC 完成量測讓 PLC 移動光譜量測裝置到下一個量測點。電腦使用光譜儀廠商提供之 SDK 進行光譜控制與資料擷取，流程結束後再將所有光譜資料整合並進行薄膜光譜品質指標的計算。

- 相機影像拍攝流程控制與影像校正與拼接

和光譜量測流程類似，電腦和產線端建立另一套 PLC 通訊協定，光機取像裝置移動到定點時 PLC 通知電腦拍攝影像，拍攝完成後電腦通知 PLC 完成拍攝讓 PLC 移動光機取像裝置到下一個拍攝點。電腦使用相機控制卡廠商提供之 SDK 進行相機控制與影像擷取，流程結束後再對所有影像資料進行校正與拼接⁽⁹⁾，並從影像計算薄膜品質指標。

- 量測資料統整與外部系統資料交換

當同一片板材完成光譜量測和光機取像後，電腦將整合兩者解算的資料並輸出至外部 AI 預測系統，再將兩者解算資料與 AI 預測系統輸出的發電效能整合並輸出至資料視覺化系統供工程師即時監控並管理產線狀態。

四、量檢測系統整合測試與驗證

1. PL 光譜量測結果分析

本裝置將整個板材 61×31 區域所量測到的光譜進行下列測試分析：

- 個別區域光譜解算分析

進行螢光光譜解算前需先進行光譜的校正，以積分球標準光源的量測結果和標準光譜強度數值比對，避免出現假訊號並消除 8 台光譜儀的機差。螢光光譜中重要的參數為螢光光譜峰值及其位置、半高全寬與光譜曲線下面積 (整體發光強度)。這些參數可用於分析 CIGS 薄膜能帶間隙的狀況並可用於推估最終產品的發電效能。

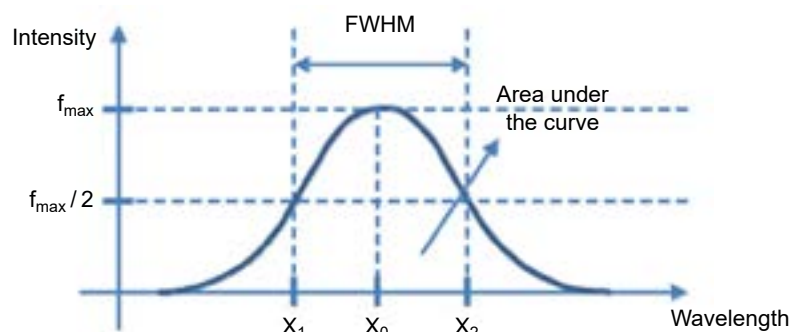


圖 8. PL 光譜與解算參數示意圖。

- 所有區域光譜解算結果整合分析

將所有區域光譜解算結果繪圖之後可以用來分析不同區域的 CIGS 薄膜特性，進而分析 CVD 製程條件的影響並優化製程參數。其中曲線下面積等同於螢光整體發光強度，整體的趨勢將類似光機拍攝影像。

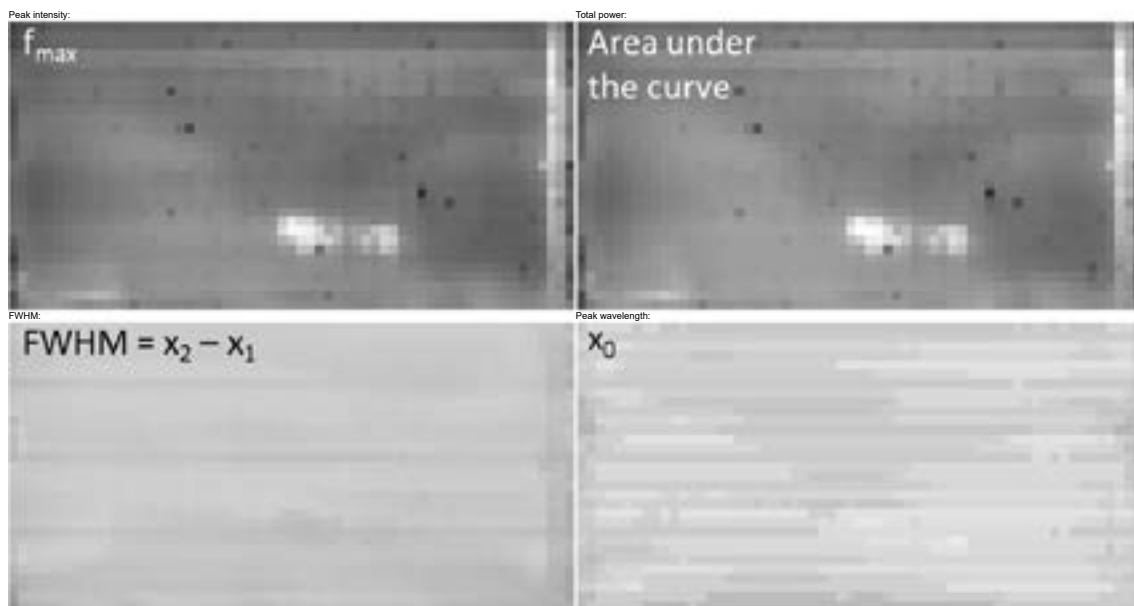


圖 9. PL 光譜解算參數空間分布圖。

2. PL 光機取像結果分析

本裝置將 10×4 區域所拍攝到的影像進行下列處理：

- 個別區域原始影像輻射度校正

原始影像中鏡頭造成的暗角效應會使得螢光影像在邊緣區域變暗，影響後續影像判讀。故拿掉 LED 濾鏡後拍攝白紙在不同 LED 亮度時的影像，從影像各畫素的灰階值進行線性度校正，校正後影像灰階值將正比於板材螢光輻射度。

- 個別區域原始影像幾何校正

原始影像中也會出現鏡頭造成的像差，需要進行失真的校正。同樣在拿掉 LED 濾鏡後拍攝印有圓點網格的白紙，使用 OpenCV 函式庫從影像中各個圓點的實際座標換算鏡頭失真的參數，OpenCV 可用此參數校正相機原始影像。此外此步驟亦可同時調整影像旋轉與縮放，保證後續影像拼接的正確性。

- 個別區域校正後影像拼接

完成上述輻射度校正與幾何校正後，需將所有區域的影像拼接成一張全版材的影像，方便之後進行影像判讀。同樣在拿掉 LED 濾鏡後拍攝全版材尺寸的白紙，上面印有尺規等網格影像，可用於研判每張原始影像拍攝區域相對板材的位置，因精密定位移動平台有很高的重複性，故可用上述量測所得相對位置拼接出整張板材的影像。拼接完成後影像將使用 OpenCV 函式庫進行缺陷檢測與計數等分析。

3. 全系統資料整合分析與外部系統整合測試

同一片板材完成上述分析後將與外部系統進行資料交換與整合測試：

- 全系統資料整合分析

PL 光譜量測分析與 PL 光機取像分析結果整合成一個較精簡的報表後，將用來進行最終產品發電效能的預測。包含 PL 量檢測站點後的製程，影響發電效能的因素眾多。因後續製程的優劣和進 PL 量檢測站點時的薄膜狀況也有一定的關係，故客戶使用機器學習技術，將上述報表與最終產品的發電效能進行訓練，得到可從報表預測發電效能的機器學習模型，實際測試結果可提前篩掉大部分的不良品，使最終產品的良率達到 98% 以上。最終上述報表和預測的發電效能也組成一個新報表並上傳至外部的資料視覺化系統供工程師即時管理產線狀態。

- 外部系統整合測試

上述測試完成後將進行全自動產線投貨測試，多片板材依序進入光譜站與光機站，兩個站點同時量測不同板材，增加量測效率。本系統除了自動輸出整合分析後量測資料外，還可通知產線系統設備狀態，在出現異常時即時通知工程師進行處理。

五、結論

本研究透過系統設計分析先規劃出適合於 CIGS 薄膜太陽能板的線上 AOI 系統架構，再展開相關的軟硬體細部規劃，並藉由豐富的光機設計經驗與成熟的數位影像處理技術，於 P3 機械劃線製程後，以機械手臂吸取太陽能板為始，進行後續一系列的步驟，最終成功地將 AOI 技術整合於大型 CIGS 薄膜太陽能板的生產製程線。憑藉 AOI 技術之應用，對生產線上的每片太陽能板都能進行數位化處理，快速且精確地完成相關的量檢測分析，有此豐富的數位資訊，可以連續監控製程中鍍膜區域的品質。當發現重大異常品質警訊時，製程工程師可以立即採取適當的處置，或調整製程參數，或更換必要之工具或進行必要之檢修等，以降低次級品與不良品的數量，可大幅提昇製程良率。

上銀科技為自動化精密定位移動平台的專業廠商，具有優良的精密機械設備開發與系統整合的能力與豐富經驗。光學鏡頭與取像裝置的設計製作及光譜量測與分析等為儀科中心的重要核心技術，在發展多年的光譜量測與分析、光機取像裝置、影像處理與量檢測及系統整合等技術能量與經驗的基礎上，可開發符合客戶需求的光學量檢測系統。因此，結合上銀科技公司在自動化精密機械設備上的研發與製造能量及豐富經驗，對合作開發計畫具有技術互補與加乘的效果，以開發符合其產業需求之具有光學量檢測的自動化智能製造系統與設備。

本設備可設置在不同製程階段的檢測站位進行線上全檢測，可在 1 分鐘的節拍時間 (takt time) 內完成一片板材的進出料及螢光之影像與波長的資料擷取與儲存，除可提前檢出不良品外，並可依檢測分析與研判結果即時調整製程與設備。

參考文獻

1. M. A. Green, Y. Hishikawa, E. D. Dunlop, D. H. Levi, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, A. W. Y. Ho-Baillie, *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, **27**, 3-12 (2019).
2. F. Kessler, D. Rudmann, *Sol. Energy*, **77** (6), 685-695 (2004).
3. A. K. Shukla, K. Sudhakar, P. Baredar, *Energ. Buildings*, **140**, 188-195 (2017).

4. 關旻宗, 王思淋, 李文貴, 黃中騰, 軟性太陽電池技術現況與發展, *工業材料雜誌*, **354**, 122-129 (2016).
5. V. S. Saji, I. H. Choi, C. W. Lee, *Sol. Energy* **85**, 2666-2678 (2011).
6. G. El-Hajje, D. Ory, J. F. Guillemoles, L. Lombez, *Appl. Phys. Lett.*, **109** (2), 022104 (2016).
7. S. I. Shimakawa, K. Kitani, S. Hayashi, T. Satoh, Y. Hashimoto, Y. Takahashi, T. Negami, *Phys. Status Solidi A.*, **203** (11), 2630-2633 (2006).
8. 陳志文, 陳銘福, 林儀豪, 應用於 CIGS 薄膜太陽能電池的陣列取像裝置及檢測系統, *科儀新知*, **220**, 86-97 (2019).
9. R. C. Gonzalez, R. E. Woods, *Digital Image Processing*, 3rd ed., Prentice Hall, (2007).

誌謝

感謝上銀光電公司提供設備開發合作計畫，儀科中心協同上銀科技與上銀光電公司完成此具有技術前瞻性與實用性的客製化 CIGS 薄膜太陽能板之光致發光自動光學檢測系統設備開發，且已應用於太陽能板生產線提供製程產品的線上全檢測，並在製程改善與良率提升方面發揮顯著的效益。

作者簡介

林志豪先生為國立清華大學光電工程研究所博士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心副研究員。

Chih-Hao Lin received his Ph.D. in the Institute of Photonics Technologies from National Tsing-Hua University. He is currently an Associate Researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

陳銘福先生為國立臺灣大學機械工程碩士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心研究員兼任組長。

Ming-Fu Chen received his M.S. in the Department of Mechanical Engineering from National Taiwan University. He is currently a Research Fellow and Division Director at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

陳柏睿先生為國立臺灣大學機械工程碩士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心副研究員。

Po-Jui Chen received his M.S. in the Department of Mechanical Engineering from National Taiwan University. He is currently an Associate Researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

蔡和霖先生為國立中山大學電機工程博士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心副研究員。

Ho-Lin Tsay received his Ph.D. in the Department of Electrical Engineering from National Chung-Sun University. He is currently an Associate Researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

連俊傑先生為國立中興大學機械工程碩士，現為國家太空中心副工程師。

Chun-Chieh Lien received his M.S. in the Department of Mechanical Engineering from National Chung-Hsing University. He is currently an Associate Engineer in Taiwan Space Agency (TASA).

基於機器視覺與深度學習的面板切割缺陷檢測

Machine Vision and Deep Learning Based Scribe Defect Detection for LCD

林祐誠、黃俊翔、羅鈺淳、何昭慶

You-Cheng Lin, Chun-Hsiang Huang, Yu-Chun Luo, Chao-Ching Ho

近年來資通訊產品需求增加導致 TFT-LCD 面板產業的蓬勃發展，但 TFT-LCD 面板的製程檢測仍然仰賴人工目測檢查，而人為評估瑕疵質量通常是主觀的且不穩定的，因此導入自動光學檢測 (automated optical inspection, AOI) 取代人工檢測是一項重要的自動化課題，且不同表面特性的材料需對應不同的取像照明方式，若取像照明方法不穩定會影響缺陷檢測過程中的整體穩定性。為此本研究開發一套用於 TFT-LCD 面板線上的即時自動光學檢測系統，利用影像辨識基板切割後耳料是否脫離正常，避免 TFT-LCD 面板因切割不良未檢出並流入後段製程，導致面板破裂或後端機台損毀，幫助提升製程良率，減少設備損毀之不良影響，最後加入深度學習來提升瑕疵檢測的效率，結果顯示加入深度學習的影像預測速度效率相比傳統方法提高了 38%，並達到 100% 的預測準確率。

In recent years, the demand for information and communication products has increased, leading to a thriving TFT-LCD panel industry. However, the process of inspecting TFT-LCD panels still heavily relies on manual visual inspection, which can often be subjective and unreliable. Therefore, replacing manual inspection with automated optical inspection (AOI) is an important issue. Since different materials with varying surface characteristics require different illumination methods, unstable illumination can affect the overall stability of the defect detection process. In this study, we developed a real-time automatic optical inspection system for TFT-LCD panels. The system uses images to identify whether the material is abnormal after the TFT-LCD substrate is cut, preventing poorly cut TFT-LCD panels from entering the back-end process, which can result in panel breakage or damage to the back-end machinery. The system helps to improve process yields and reduce equipment damage. The results show that the deep learning image prediction speed is 38% more efficient than the traditional method, and the prediction accuracy reached 100%.

一、前言

受益於半導體製程的蓬勃發展，各類資通訊產品需求大增，薄膜電晶體液晶顯示器 (thin film transistor-liquid crystal display, TFT-LCD) 在通訊產品中扮演重要的溝通媒介，導

致 TFT-LCD 顯示面板需求量增加，目前面板產業逐漸以輕薄化與曲面為導向⁽¹⁾，由於 TFT-LCD 面板為玻璃製品，在瑕疵檢測上一直存在許多的障礙，有需多瑕疵難以檢出，例如亮度不均 (mura)⁽²⁾ 或切割缺陷⁽³⁾ 等，過去有不少團隊提出了針對切割缺陷檢測的研究，范明榮等人⁽⁴⁾ 使用獨立成份分析 (independent component analysis, ICA) 搜尋瑕疵區域後進行一系列的分析與檢測，實現 TFT-LCD 之檢測應用，洪崇祐等人⁽⁵⁾ 透過傅立葉轉 (Fourier transform) 換方式找出各類型的表面瑕疵位置，運用深度學習輔助瑕疵檢測近年來也有許多探討及應用^(6,7)。

綜觀上述論文⁽¹⁻⁷⁾，所提出之瑕疵解決方案運行良好，但在結合現場產線複雜情況與速度議題上的研究較少被討論，本論文提出的方法克服了原始設備環境不可控的問題，在不干涉原始輸送系統的情況下達成瑕疵檢測，並透過自製之長型光源與高角度的打光方式，結合分段檢查機制與深度學習應用，提出一應用於面板製程生產線上的即時瑕疵檢測系統，對於大型且透明的樣本之檢測具有高度的檢測強健性與高檢查速度。

二、背景介紹

耳殘瑕疵如圖 1 所示，其發生的原因為 TFT-LCD 面板生產後需要進行分離切割，在切割的過程中可能會因為切割刀具的衰退⁽⁸⁾ 或是面板入料角度異常而未完全切割，未切割完全的 TFT-LCD 面板流入後續製程將會導致後段設備的損毀與破裂。而切割後的玻璃若是掉入面板上，則稱為掉落物瑕疵，掉落物瑕疵如圖 2 所示，掉落物瑕疵流入後段製程會刮傷 TFT 面板的主要顯示區，而 TFT 面板的刮傷都會降低透光度進而影響最後成像，因此耳殘瑕疵與掉落物的瑕疵檢查在切割製程中，扮演重要的角色。



圖 1. 耳殘瑕疵影像。



圖 2. 掉落物瑕疵影像。



圖 3. 正常面板。

近年來瑕疵檢測逐漸應用於各種製程上，但不同材質製品之間的照明強化方法差異甚大，對於像是耳殘瑕疵這種透明殘料的打光方法仍有許多進步空間，常常會因為光源穿透材料導致檢測影像上的對比度不足，使得後續演算法檢測失效，或者強健性下降等問題，因此對於 TFT-LCD 面板這種玻璃製品來說，挑選合適的打光方式是執行自動光學檢測上不可或缺的研究。

TFT-LCD 面板除了具有打光方式的問題外，也因為尺寸巨大而在挑選光源上備受挑戰，尤其是光源的選擇，雖然說大型物件的工業檢查並不罕見，但需要對大型物件進行針對性的打光強化卻是罕見的應用，以本研究所使用的 32 吋 (尺寸，710 × 640) TFT-LCD 面板來說，市售的商用光源並未找到如此大型之光源設備，在打光強化 32 吋 TFT 面板的瑕疵時面臨不少挑戰，因此挑選光源也是 TFT-LCD 面板瑕疵檢測上所需克服的困難點。

三、實驗規劃與系統架設

面對透明玻璃殘料的檢測，本研究實驗了三種不同的光源，圖 4、圖 5、圖 6 顯示了三種光源的照明結果，分別為背向光源 (圖 4)，同軸光源 (圖 5)，正向條形光 (圖 6)。因耳殘瑕疵為透明玻璃的關係，背向光線會穿透材料而使得整體對比度不足，而對比度不足又會使得殘料瑕疵與輸送機構影像融合於一起，導致最終難以分辨。雖然同軸光源強化了 TFT-LCD 面板電路區與顯示區的顏色差異，但仍然不具備足夠強健的對比度。透過正向打光的方式，本研究發現了使用條形光並以接近平行光軸的照射方式打光，能夠有效的分離出耳殘瑕疵，具有維持高度對比，後端演算法分割容易等優點，因此本研究最終選擇採用長條型光源，以強化耳殘瑕疵和掉落物與顯示區的對比度，達到最終檢測之效果。



圖 4. 背向光源。

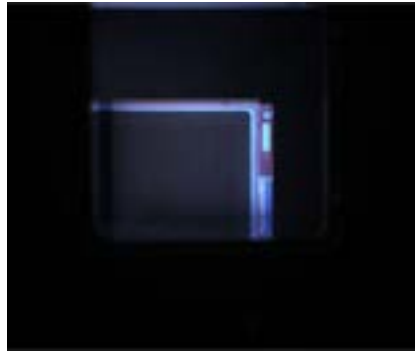


圖 5. 同軸光源。



圖 6. 正向條形光。

面板屬於大型物件，且在輸送過程中的速度極快，若是將取得之影像進行疊合檢測會導致檢測速度大幅降低，本研究為了符合產線上實際生產時所運行之速度需求，採用了分段檢查的機制，不需要取得完整影像即可進行單條影像的檢測，除了達到即時檢查的效果外，也一併解決視野不足與光源大小不足之問題。分段影像運行於演算法之流程如圖 7 所示，工業相機取像後，可直接對瑕疵進行連通域分析，透過閾值分割與形態學之強化，最終可以根據設定之閾值檢測出切割製程中產生之不良瑕疵，並傳送至使用者介面顯示。

雖然透過正向條形光可以即時的檢測到耳殘瑕疵，但在高速運送的過程中，對於 TFT-LCD 面板上的主要區域掉落物檢查仍有不穩定之情形，使用多重條件閾值分割與較多的連通域分析可提高檢查的穩定度，但卻犧牲了檢測的速度，因此本研究導入了深度學習於線上瑕疵檢測中，如圖 8 所示，本研究使用的神經網路係以殘差網路⁽⁹⁾ (residual neural network, ResNet) 作為骨幹網路，所搭建的 U 型卷積網路⁽¹⁰⁾ (U-net convolutional network)，共有四層下採樣網路與四層上採樣網路，最後一層網路將會輸出分割結果的影像。本研究所用之資料集為自行蒐集拍攝之資料集，資料圖像共有 1,140 張影像，測試瑕疵圖像有 19 張影像，測試良品圖像有 90 張，合計 109 張測試影像，每張影像大小為長度 64 像素、寬度 64 像素，詳細網路參數如下表 1 所示，深度學習模型推論速度每秒可預測 35.72 張影像，相比於傳統演算法每秒可分割出 25.64 張影像的速度，在預測速度上提高了 38%，且在分段檢查的機制上運作良好。

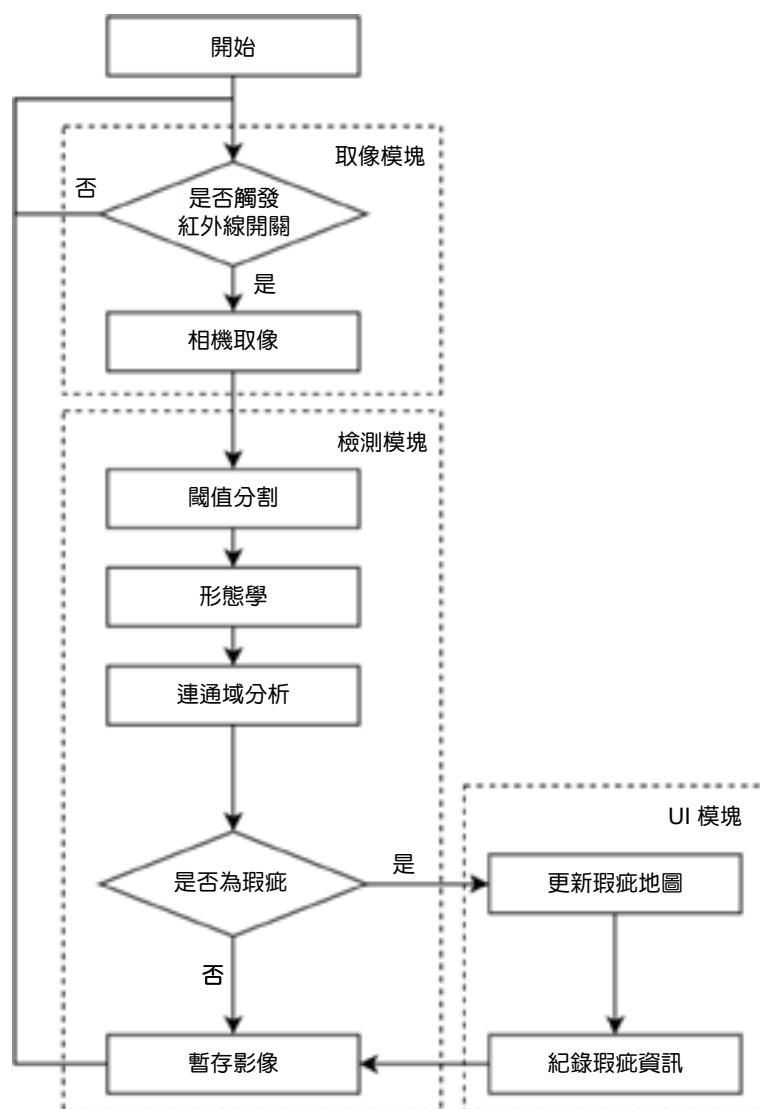


圖 7. 演算法運行流程。

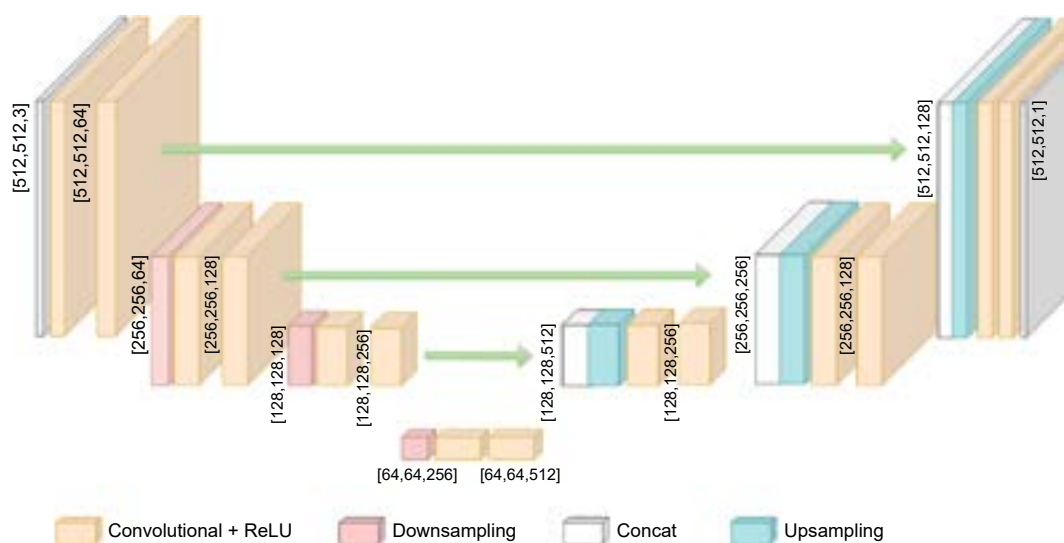


圖 8. 本研究採用之網路架構圖。

表 1. 網路訓練參數。

參數名稱	參數值
批量大小 (Batch Size)	4
訓練數量 (Epochs)	20
學習率 (Learning Rate)	0.009
損失函數 (Loss Function)	BCE + Dice
優化器 (Optimizer)	SGD

整體光機系統架構如圖 9 所示，系統架構包含了工業相機、工業電腦、光源、紅外線處發開關。因設計成外掛式的探頭，檢測模組並不依賴於原始傳送設備，不僅將其他自動化設備的影響性降至最小，還能在不干涉原始輸送設備的情況下達成線上即時檢測。如圖 10 所示，本文所開發之系統也具備使用者介面，因採用分段檢查的機制，在最終的影像呈現上不同於一般介面設計，採用了面板瑕疵地圖 (panel defect map, PDM) 的設計，在不執行循環影像拼接的情況下，仍然能快速的看出瑕疵的所在位置，並提醒使用者作後續處理。

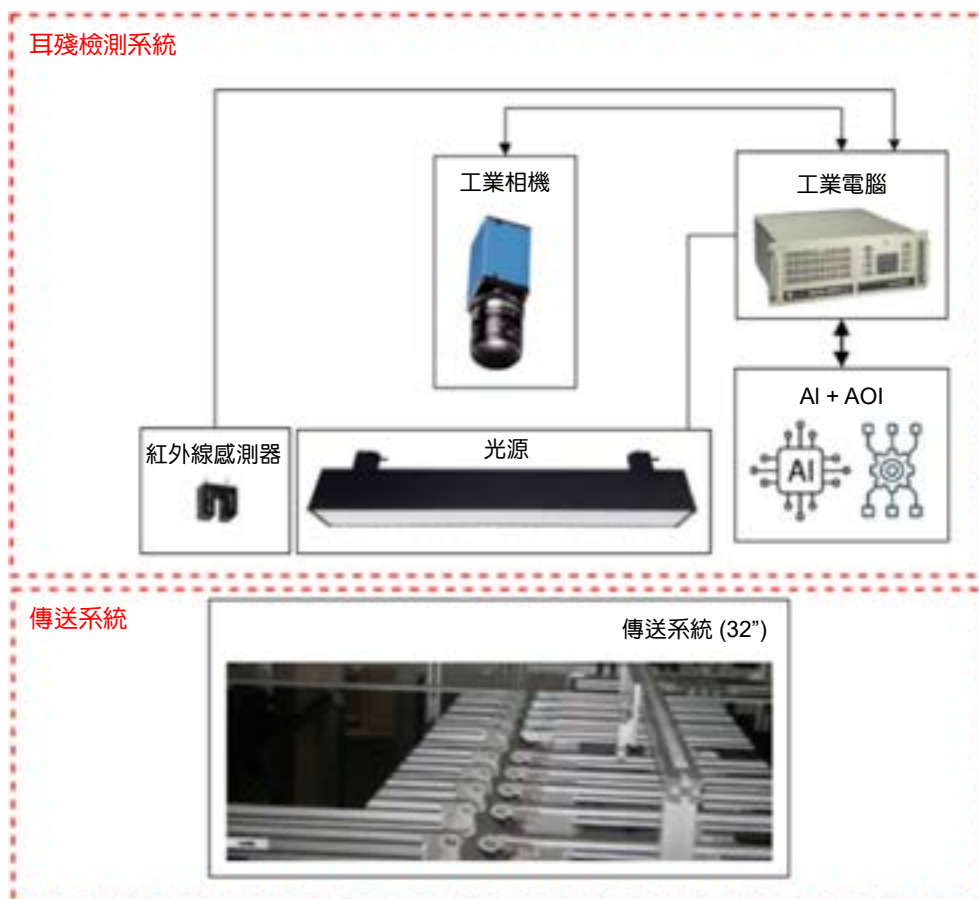


圖 9. 光機系統架構圖。

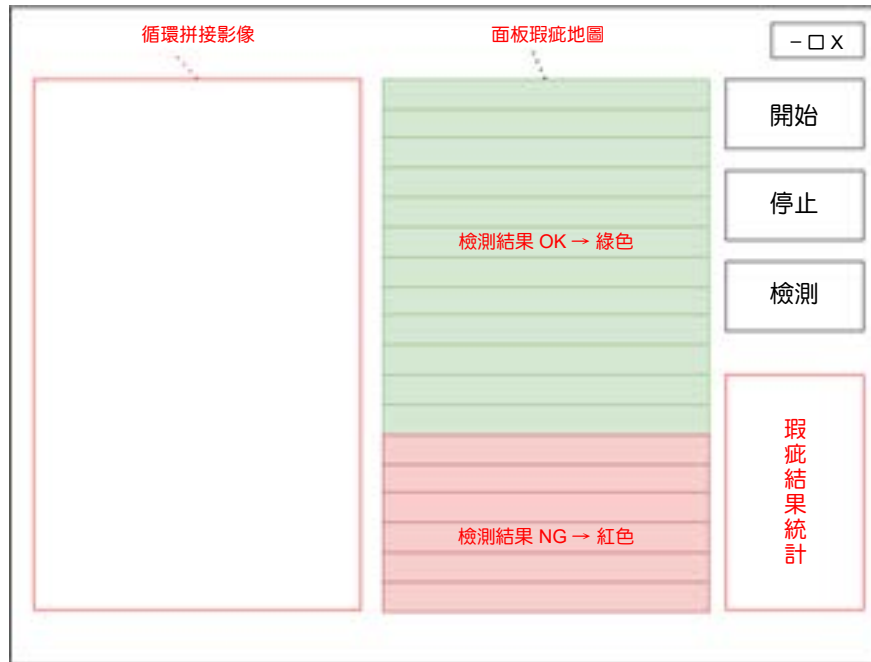


圖 10. 使用者介面設計示意圖。

本研究實際運行於產線的架設情況如圖 11 所示，現場環境並不像實驗室或整機設備一樣具有可控制的環境，除了工廠內有許多的雜亂環境光外，原始輸送設備的內部充滿不同的機構件與金屬材質，控制上也無法進行同步操作，這對於自動光學檢測來說是一個挑戰，本研究採用上述之照明方式並結合深度學習進行瑕疵檢測，仍維持高度的強健性，並可實際運用於產線上之線上即時瑕疵檢測系統。

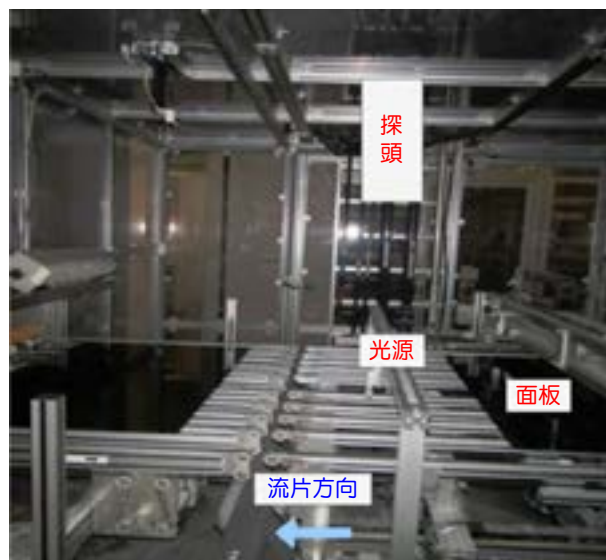


圖 11. 架設於實際產線影像。

四、結果與討論

深度學習檢測模型的學習曲線如下圖 13 所示，在迭代了 10 次後逐步達到收斂，雖 IOU 僅有 0.7，但分割模型的 70% 重合率經過閾值分割後作為檢測使用已能達到高度的準確率，模型預測的瑕疵影像與基準真相之差異如圖 12 所示，該預測結果可以整合在耳殘瑕疵演算法中的連通域分析中，根據使用者所設定欲檢出之耳殘瑕疵大小進行檢測，並將結果整合至瑕疵地圖影像中，圖 12 為多張 64×64 像素預測瑕疵圖拼接出的瑕疵拼接示意圖，中紅色線框出位置為深度卷積神經網路預測之瑕疵影像範圍，在 70% 信心水平預測下，可見其預測重合度相當高，同時推論速度每秒可預測 35.72 張影像，相比多重閾值分割每秒可分割出 25.64 張影像的速度，深度學習檢測大幅領先傳統多重分割演算方法，資料集中的測試結果，經計算後的混淆矩陣 (confusion matrix) 如表 2 所示，針對測試的 19 張瑕疵影像均能檢出，達到 100% 的檢出率，上述結果表明導入深度學習檢測模型除了有高預測速度的優勢外，也具備高準確度的優點。

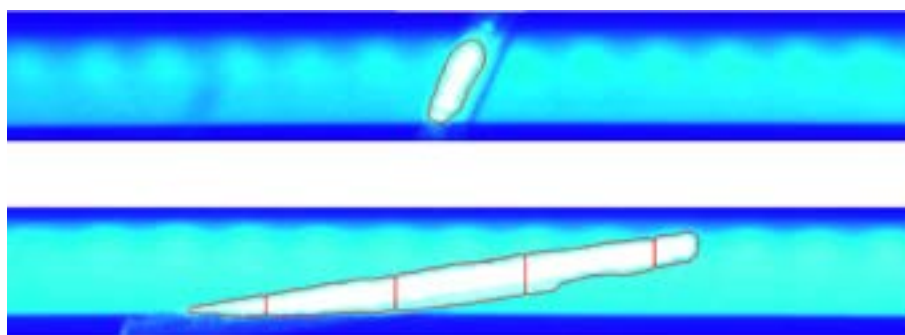


圖 12. 模型預測影像。

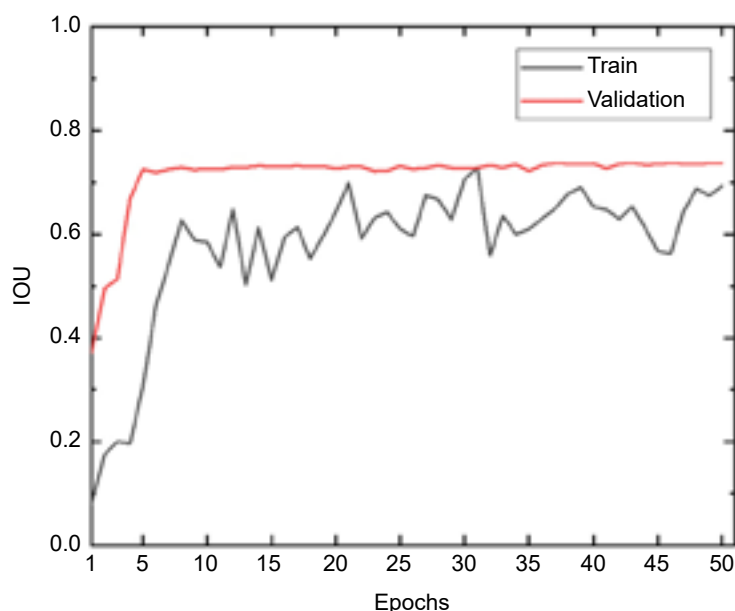


圖 13. 模型訓練—驗證曲線。

表 2. 掉落物測試資料集檢測混淆矩陣。

預測 \ 真實	缺陷	非缺陷
預測缺陷	19	0
預測非缺陷	0	90

運行檢測演算法後的結果如圖 14、圖 15 所示，圖 14 顯示上方耳殘瑕疵與其檢測結果，圖 15 顯示右方耳殘瑕疵與其檢測結果，可以看到檢測出的耳殘瑕疵寬度、高度，並判斷是否為瑕疵，連結至使用者介面上的面板瑕疵地圖如圖 16 所示，系統介面也提供了影像循環拼接的功能，在需要的時候才拼接影像，用以了解實際取得之影像結果。

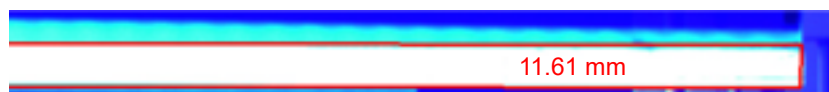


圖 14. 上方耳殘檢測結果影像。

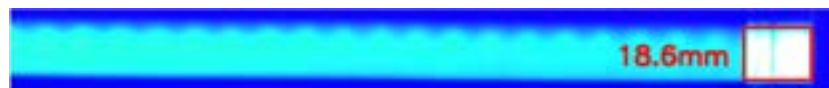


圖 15. 右方耳殘檢測結果影像。

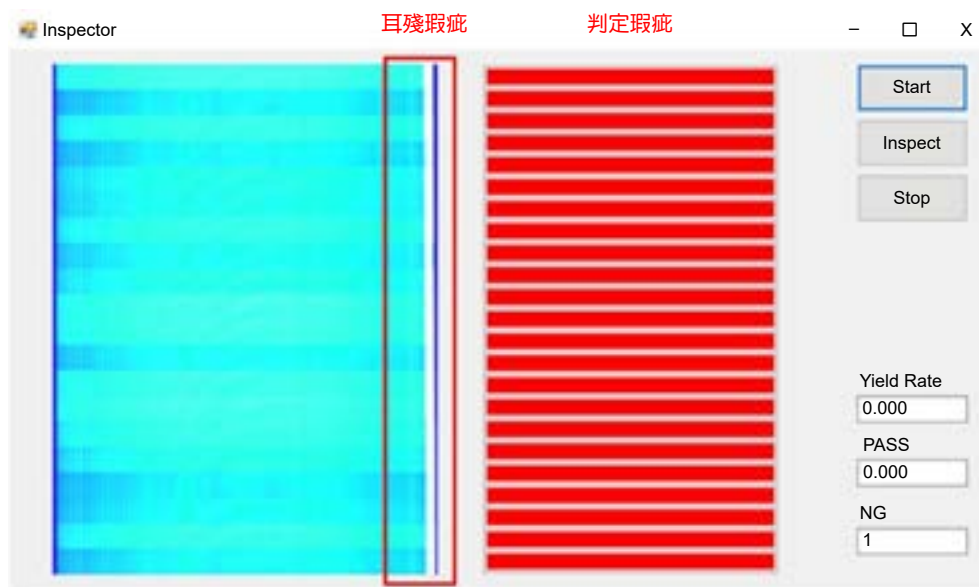


圖 16. 實際使用者介面顯示狀況。

五、結論

本研究所需檢測之樣品為透明材料且尺寸巨大，因此具備高對比度的照明方式與高速檢查策略顯得格外重要，本研究透過正向高角度之打光方法，克服實際場域之限制，實現了對

於透明類型的瑕疵進行檢測，對於速度之議題，提出了分段檢查策略並結合深度學習瑕疵檢測，最終檢測速度為 38 ms，成功的開發出一套針對大型透明物件之線上即時瑕疵檢測系統。

參考文獻

1. 楊晉欽，“應用獨立成份分析於 TFT-LCD 瑕疵檢測”，國立成功大學製造工程研究所，碩士論文，台南市，(2007).
2. Mao-Hsing Lin, Yung-Kan Chen, Wu-Cheng Kuo, Kun-Feng Huang, *SID Symposium Digest of Technical Papers*, **38** (1), 457 (2007).
3. Wonsuk Choi and Joohan Kim, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, **16** (7), 1655 (2015).
4. 范明榮，“面板輕薄化之研製與技術特性探討”，元智大學工業工程與管理學系，碩士論文，桃園縣，(2008).
5. 洪崇祐，“應用一維傅立葉分析於 TFT-LCD 液晶顯示面板之瑕疵檢測”，元智大學工業工程與管理學系，碩士論文，桃園縣，(2004).
6. 周秉翰，“基於深度卷積神經網路集成式學習於治具表面瑕疵檢測”，國立臺北科技大學機械工程系機電整合，碩士論文，台北市，(2021).
7. 余朝崑，“基於深度卷積神經網路於紡織布料之對色檢測”，國立臺北科技大學機械工程系機電整合，碩士論文，台北市，(2022).
8. Ming Zhou, B.K.A. Ngoi, M.N. Yusoff, X.J. Wang, *Journal of Materials Processing Technology*, **174** (1-3), 29 (2006).
9. Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun, "Deep residual learning for image recognition," *IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, June 27-30, 770 (2016).
10. Olaf Ronneberger, Philipp Fischer and Thomas Brox, "U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation", in *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention-MICCAI 2015: 18th International Conference, Munich, Germany, October 5-9, 2015, Proceedings, Part III* 18, 234 (2015).
11. 張頌榮，“TFT-LCD 面板之點線瑕疵自動化檢測系統”，國立成功大學製造工程研究所，碩士論文，台南市，(2005)
12. 陳啟倉，莊弘銘，液晶面板高速影像檢查的實現，電子月刊，**14** (5), 126 (2008)。

著者簡介

林祐誠先生現為國立臺北科技大學自動化科技研究所博士生。

You-Cheng Lin is currently a Ph.D. student in the Graduate Institute of Automation Technology at National Taipei University of Technology.

黃俊翔先生現為國立臺北科技大學機械工程系機電整合研究所碩士生。

Chun-Hsiang Huang is currently a M.S. student in the Department of Mechanical Engineering Institute of Mechatronic Engineering at National Taipei University of Technology.

羅鈺淳女士現為國立臺北科技大學機械工程系機電整合研究所碩士生。

Yu-Chun Luo is currently a M.S. student in the Department of Mechanical Engineering Institute of Mechatronic Engineering at National Taipei University of Technology.

何昭慶先生為臺灣科技大學電機工程博士，現為國立臺北科技大學機械工程系暨製造科技研究所教授。

Chao-Ching Ho received his Ph.D. in Electrical Engineering from National Taiwan University of Science and Technology. He is currently a Professor in the Department of Mechanical Engineering and Graduate Institute of Manufacturing Technology at National Taipei University of Technology.

高深寬比微結構之創新光學散射 關鍵尺寸量測技術

Novel Scatterometry Technique for Critical Dimension Metrology of High-aspect-ratio Microstructures

簡維信、楊福生、傅子英、陳亮嘉

Wei-Hsin Chein, Fu-Sheng Yang, Zi-Ying Fu, Liang-Chia Chen

本研究發展了一創新之光學關鍵尺寸量測 (OCD) 系統與技術，用以克服目前於先進封裝製程中，具高深寬比之微結構難以使用非破壞性檢測的困境。結合光譜反射術與光學散射術，並利用雷射寬頻光源的高空間同調性所設計之創新顯微光學架構，此技術可大幅提升量測之光效率，並在量測範圍上可實現單一結構的量測，避免了現存之光學量測技術限於量測多個結構之平均資訊的缺點，此為本技術的關鍵突破和特點。通過反向優化的最佳化工程，實驗驗證結果表明，本系統可同時量測線寬與線距為 $1\ \mu\text{m}$ 、深寬比為 3:1 之 RDL 結構的多項關鍵尺寸資訊。

In this study, we proposed a novel optical critical dimension (OCD) metrology system for non-destructive inspection of high-aspect-ratio (HAR) microstructures used in advanced packaging processes. The proposed system involves the integration of spectral reflectometry and scatterometry techniques, and incorporates the high spatial coherence of a broadband laser source for optimal beam shaping. The proposed technique significantly enhances the measurement light efficiency and enables single-structure measurements, addressing the limitations of existing optical metrology techniques that rely on average information from multiple structures. With the proposed model-based measurement scheme for solving an inverse problem, experimental tests demonstrate that multiple CDs of a RDL structure with a fine nominal linewidth and spacing of $1\ \mu\text{m}$ and an aspect ratio of 3:1 can be accurately measured.

一、前言

近年來，先進封裝技術為延續摩爾定律的方面上發揮了關鍵的作用。在此技術中，具高深寬比的微結構如矽穿孔 (through silicon vias, TSV) 與晶圓線路重佈 (redistribution layer, RDL) 被用於實現晶片間之垂直整合以及降低封裝體積⁽¹⁾。然而，目前於先進封裝製程中對於量測高深寬比結構之關鍵尺寸 (critical dimension, CD) 的主流方式必須採用掃描式電子顯微鏡 (scanning electron microscope, SEM) 進行破壞性的線下量測。

相較於 SEM，光學量測技術具有快速、非破壞性等優點，故較適合應用於線上量測。目前已有幾種光學量測技術被用於量測高深寬比結構之關鍵尺寸。其中，有研究使用白光干涉術 (white light interferometry, WLI) 量測矽穿孔之三維形貌⁽²⁻⁴⁾。然而，由於矽穿孔狹窄的結構幾何特性，會導致系統之光能使用效率大幅降低而降低量測訊號的強度與量測速度。另一方面，光譜反射術 (spectral reflectometry, SR) 亦可被用於量測高深寬比結構之尺寸資訊⁽⁵⁻⁸⁾。

然而，此技術限於量測結構的深度資訊，且侷限於量測大範圍照明區域內之平均尺寸資訊。此外，該技術在量測深度較深的結構時容易面臨量測訊號強度低落的問題。與光譜反射術相比，光學散射術 (scatterometry) 基於電磁理論模擬與實驗量測訊號的擬合可同時量測結構的多項尺寸資訊⁽⁹⁾。然而，同光譜反射術，此技術限於量測照明區域內多個結構的平均尺寸資訊。

為了克服上述量測技術的困境，本研究提出一結合光譜反射術與光學散射術之光學顯微量測系統與技術。利用雷射寬頻光源的高空間同調性，此技術可大幅縮小光斑尺寸，以提升量測之空間解析度並顯著提升光使用效率。另外，此技術基於電磁模擬所建立之光學系統模型，進行實驗與模擬訊號的擬合，可同時量測多項結構之關鍵尺寸。本研究成果預期對於量測緊密排列之高深寬比個體結構具有一定的應用價值。

二、量測方法

1. 高深寬比結構之量測限制

由於高深寬比結構的幾何特性，光學系統的照明數值孔徑 (numerical aperture, NA) 在量測上起到了相當重要的作用。如圖 1 所示，由於結構內部的遮蔽效應，光線只能以有限的入射角度抵達結構的底部。此幾何限制可表示為：

$$\tan \theta \leq \frac{w/2}{d} \quad (1)$$

其中 θ 為照明入射角度、 w 為結構開口寬度且 d 為結構深度。實際可進入結構底部之 NA 可表示為 $NA_{lim} = \sin \theta$ 。因此，隨著結構深寬比的提升，應降低系統之照明 NA 以提高量測之光能使用效率。

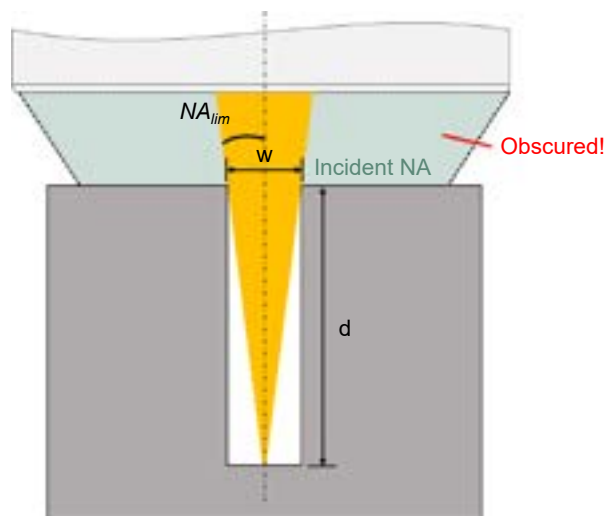


圖 1. 高深寬比結構對於照明 NA 的限制。

2. 量測原理

本研究所提出之系統的量測原理如圖 2 所示。基於光譜反射術的架構，此系統採用了寬頻的光源，並以接近準直的方式對待測結構進行照明。經照明後，從結構頂部與底部反射的光會在遠場產生干涉，並經由一光譜儀接收。此光譜干涉訊號包含了結構的尺寸資訊，並會被用於量測結構的重要尺寸參數。本研究所發展之基於模型的量測方式會於 2.3 節進行詳述。

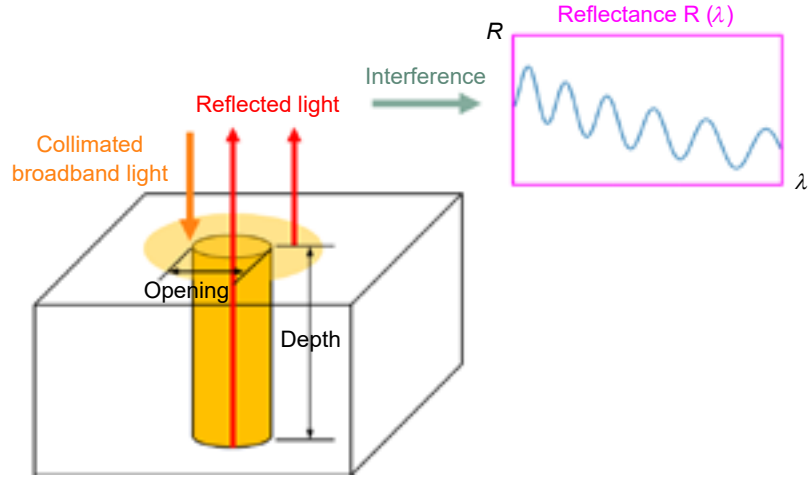


圖 2. 系統量測原理。

3. 基於模型的量測方式

本研究所發展之基於模型的量測方式乃以經由有限時域差分法 (finite difference time domain, FDTD)⁽¹⁰⁾ 所建立之光學系統的電磁模型為基礎，並透過粒子群最佳化演算法 (particle swarm optimization, PSO) 擬合實驗與模擬的訊號以逆向重建出結構的重要尺寸參數。此量測方式可由一非線性之最小平方問題的形式表示⁽¹¹⁾：

$$\chi^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{\mathbf{y}_i^{\text{exp}} - \mathbf{y}^{\text{sim}}(\mathbf{x}_i, \mathbf{a})}{\sigma_i} \right]^2 \quad (2)$$

其中， N 為量測訊號之取樣點數。 $\mathbf{y}_i^{\text{exp}}$ 代表實驗所量測之訊號，以一陣列表示。 $\mathbf{y}^{\text{sim}}(\mathbf{x}_i, \mathbf{a})$ 為模擬所量測之訊號，當中 $\mathbf{x}_i$ 為量測條件 (如波長、偏極態等)， $\mathbf{a}$ 則包含所模擬的結構尺寸參數 (如 TCD, BCD, Depth 等)。 σ_i 為每個量測點之不確定度，其可能由系統中的雜訊所產生。

在 PSO 中，首先會給定每個模擬之結構尺寸參數一個指定的浮動範圍 ($\pm \delta \mathbf{a}$)，並進行迭代直到獲得 χ^2 之最小值。當 χ^2 為最小值時，可經由實驗與模擬的最佳擬合結果獲得結構尺寸參數之最佳解 $\mathbf{a}_{\text{min}}$ 。此基於模型的量測方式的流程圖如圖 3 所示。

4. 光學系統模型的建置

在前述基於模型之量測方法中，必須先建立量測光學系統與待測結構之模型以準確模擬實際會產生的量測訊號。如圖 4 所示，在 FDTD 建模中，待測結構之幾何形貌由給定之尺寸參數所表示。此外，模型中需要提供結構組成材料之光學常數，並在模型的邊界加上合適的邊界條件 (boundary conditions, BC)。

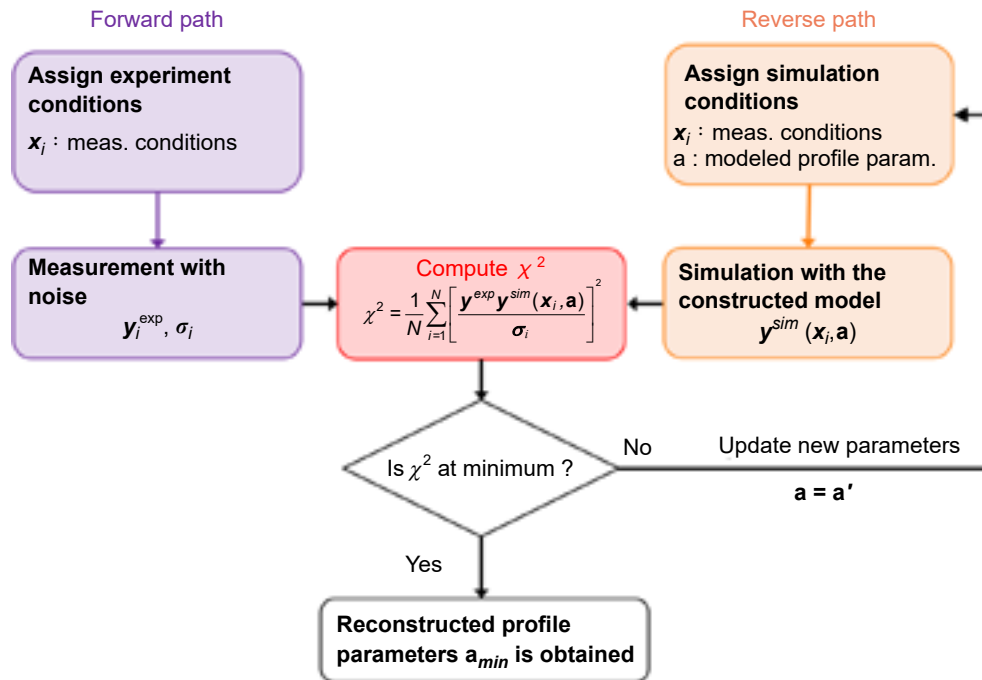


圖 3. 基於模型之量測流程圖。

由圖 4 所示之模型可模擬光與結構作用所產生之近場散射場，為了模擬真實光學系統所量測之訊號，本研究建立了一虛擬光學系統模型以模擬於遠場所接收之光學訊號⁽¹²⁾，如圖 5 所示。此虛擬光學系統模型中包含了四大部分：系統照明、光與結構作用產生散射場、散射場接收與成像。

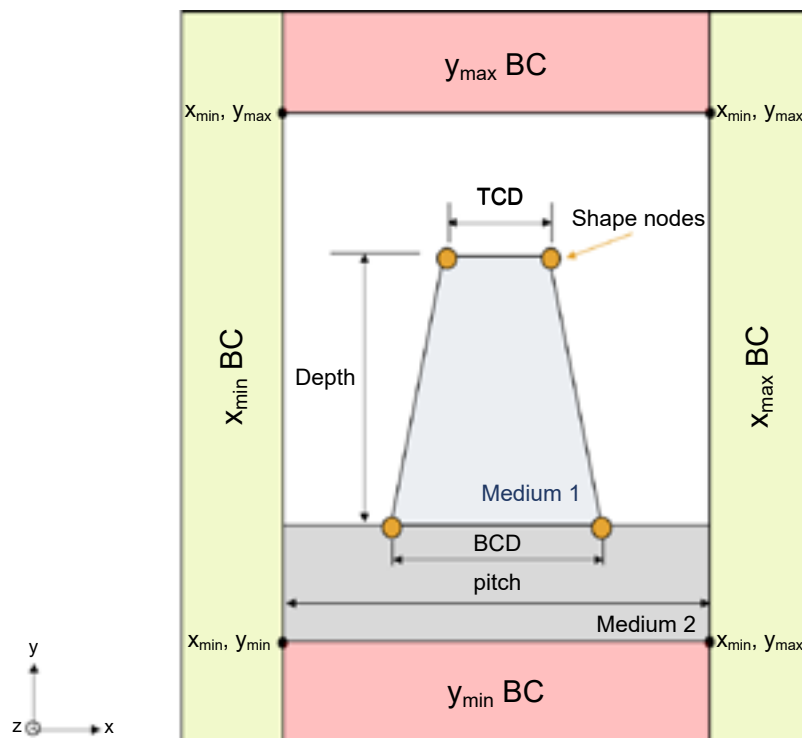


圖 4. 待測結構之模型示意圖。

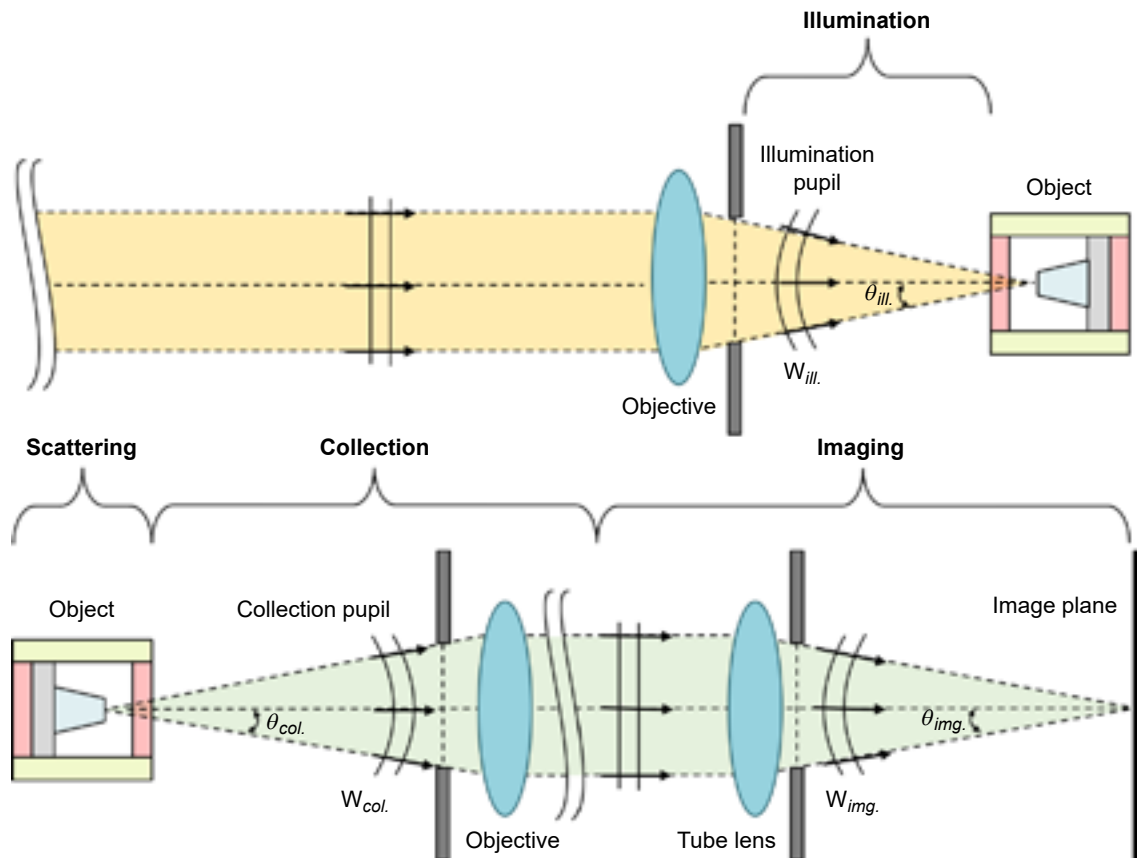


圖 5. 建立之虛擬光學系統模型示意圖。

三、光學系統設計與架構

根據光展量 (etendue) 守恆的概念，隨著結構的深寬比持續提升，將造成下游光學系統之光展量受到結構開口尺寸的限制，進而造成大量光能的損耗，如圖 6 所示。因此，要提升量測高深寬比結構之光效率，勢必要降低光源之光展量，即降低光源的尺寸與發散角。有別於非同調光源 (如氙燈)，雷射具有高空間同調性，並具有極小的發散角，故可將光聚焦至較小的光斑尺寸，同時維持高的光能使效率。基於此考量，本研究在系統中使用寬頻雷射作為光源。

本研究所提出的光學系統架構如圖 7 所示。在照明端的部分，寬頻雷射透過分光鏡導入物鏡，並於物鏡前焦處聚焦成腰部 (waist)，以藉由高斯光束在腰部所形成之平面光場對待測物表面進行照明。此外，透過在照明光路中置入一光圈來控制雷射光束進入物鏡之直徑大小，可調製出所需的照明 NA 與光斑尺寸。圖 8 為使用光學設計軟體 ZEMAX 之模擬結果，其中物鏡的 NA 設為 0.9，焦距設為 1.8 mm。表 1 為不同雷射光束直徑下所對應之有效照明 NA 與光斑尺寸。

在接收端的部分，來自樣品的回光會經物鏡所接收，並由分光鏡分為兩道。其中一道會經由鏡筒透鏡 (tube lens) 聚焦至影像感測器上，以獲得結構之二維影像，用以判斷目前的量測位置。另一道則會經鏡筒透鏡聚焦至光譜儀之光纖內，以量測結構所產生之干涉光譜訊號。本系統之實驗架設如圖 9 所示。

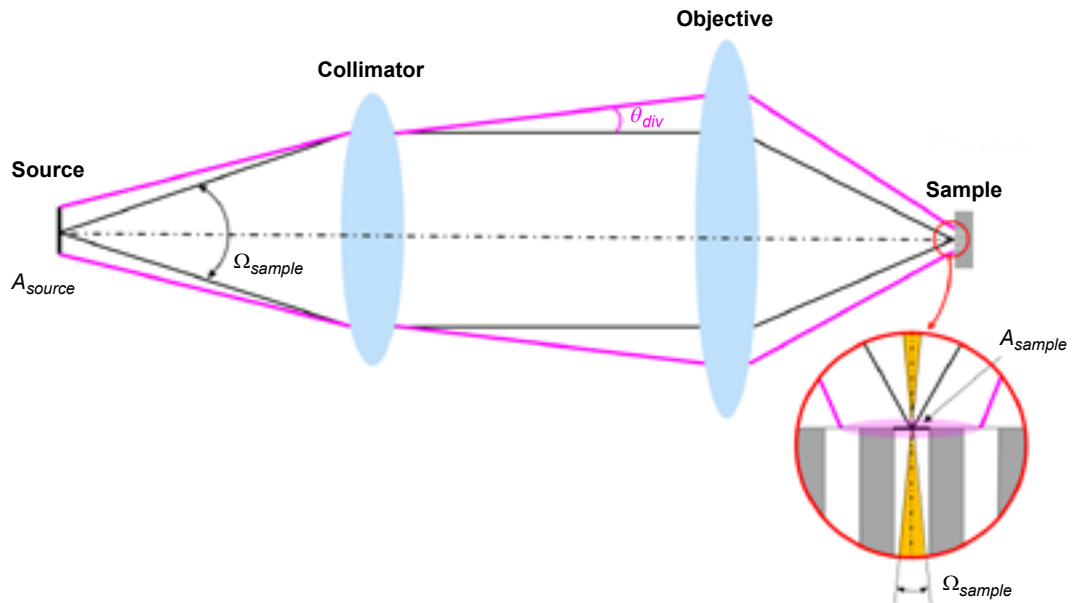


圖 6. 光展量守恆之概念。 A_{source} 與 A_{sample} 分別為光源之發光面積與結構之收光面積。 Ω_{source} 與 Ω_{sample} 分別為光源之發光立體角與結構之收光立體角。當 $A_{source}\Omega_{source}$ 遠大於 $A_{sample}\Omega_{sample}$ 時，將造成光源光能的大量損耗。為光源的發散角。

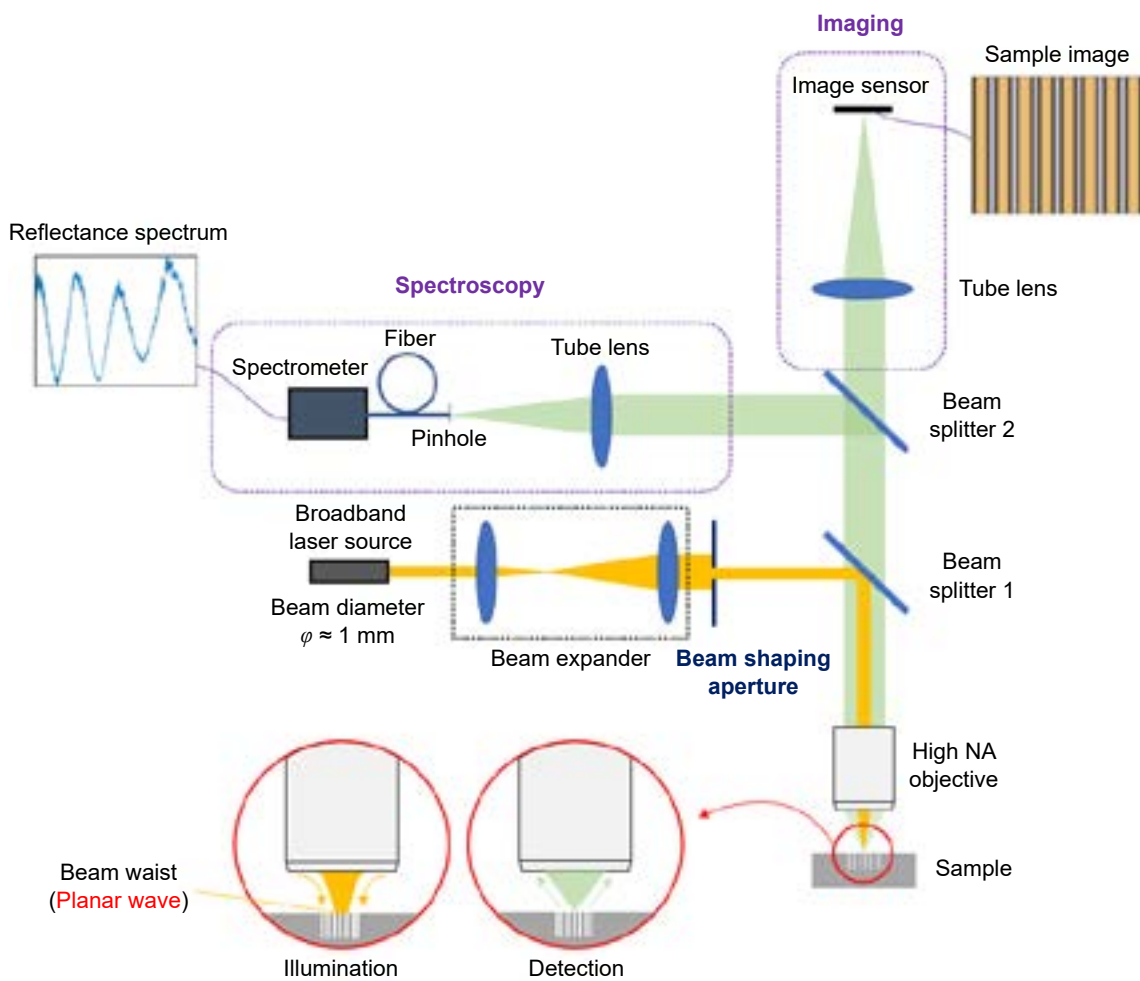


圖 7. 本研究所提出之光學系統架構圖。

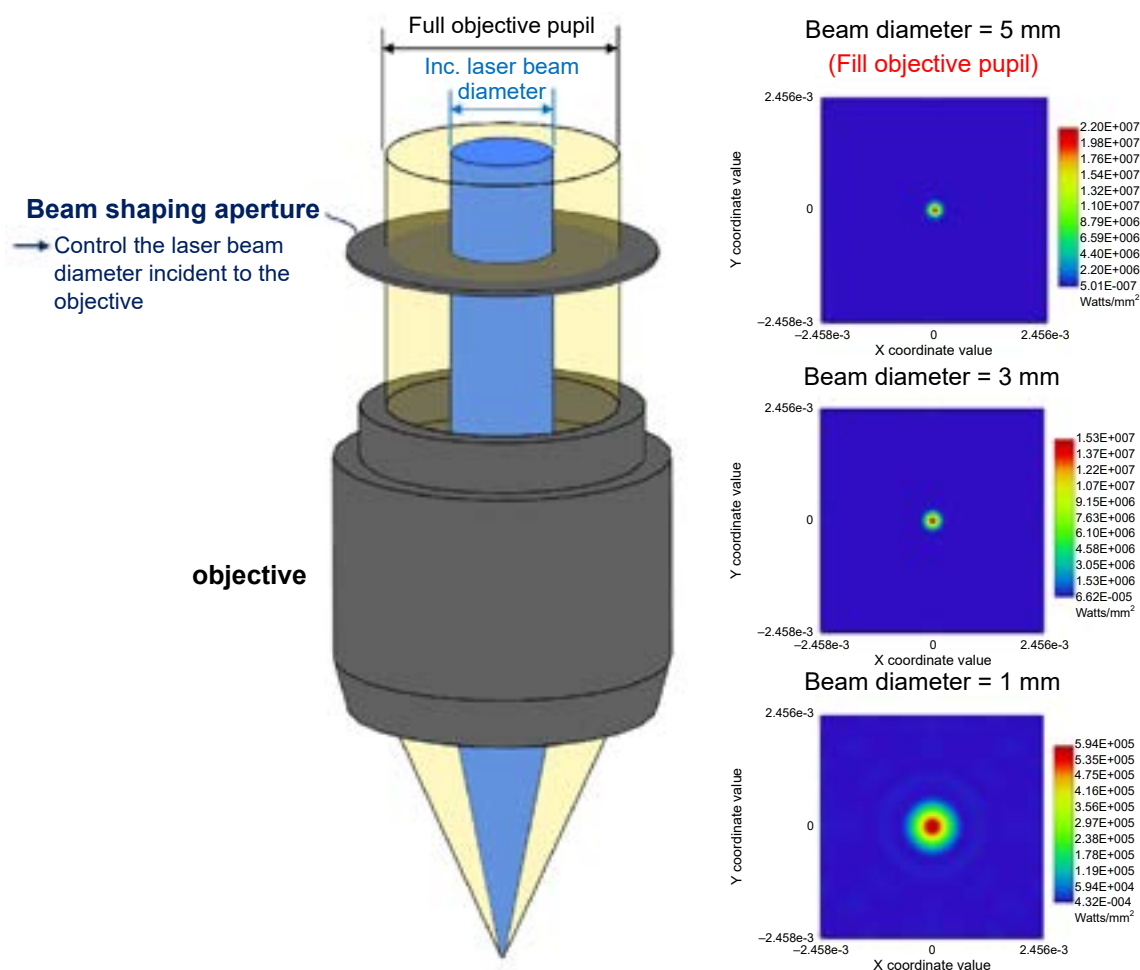


圖 8. 使用 ZEMAX 模擬照明 NA 與光斑尺寸的調製。

表 1. 不同雷射光束直徑所對應之照明 NA 與光斑尺寸。

雷射光束直徑	有效照明 NA	照明光斑尺寸
7.5 mm	0.90	0.502 μm
4.5 mm	0.78	0.533 μm
3 mm	0.64	1.379 μm
1.5 mm	0.38	4.278 μm
1 mm	0.27	5.968 μm

* 模擬所使用之波長為 $\lambda_{sim} = 500 \text{ nm}$

四、實驗結果分析

1. 多結構平均關鍵尺寸量測結果

在此節中，我們展示傳統光學散射術於量測多結構之平均關鍵尺寸的結果。量測樣品為一 RDL 結構，其公稱線寬與線距為 $1 \mu\text{m}$ 且深度為 $3 \mu\text{m}$ (深寬比為 3:1)。在此量測案例中，我們於系統內使用 5 倍物鏡並將雷射光束的直徑保持至 1 mm，以產生一較大的光斑尺寸 (直徑約 $32.3 \mu\text{m}$)，與一接近準直的照明 (有效照明 NA 為 0.01)。如圖 10 所示，由於在此條件下照明光斑約涵蓋 16 個結構，故我們在所建立的模型之邊界處施加了週期性邊界



圖 9. 本系統之實驗架設。

(periodic boundary condition)。此外，根據實際量測條件，在模型中我們設置照明為一非偏振、垂直入射之平面波，其波長範圍為 $\lambda = 480 - 700 \text{ nm}$ 。而模型中之接收 NA 則依所選用之物鏡設為 0.15。

如 2.3 節所述，結構之各項尺寸參數為藉由模擬與實驗訊號之最佳擬合結果而獲得。表 2 為給定各項尺寸參數之浮動空間。表 3 為此量測案例之最終量測結果，我們以原子力顯微鏡 (atomic force microscopy, AFM) 之量測值作為參考並進行偏差 (bias) 分析。實驗與模擬光譜之比較如圖 11 所示，兩者之決定係數 (R^2) 為 0.94。於表 3 中可見，系統在 5 次量測下，平均偏差為 AFM 量測值之 3.92%，且標準差 (1σ) 低於 $0.028 \mu\text{m}$ 。

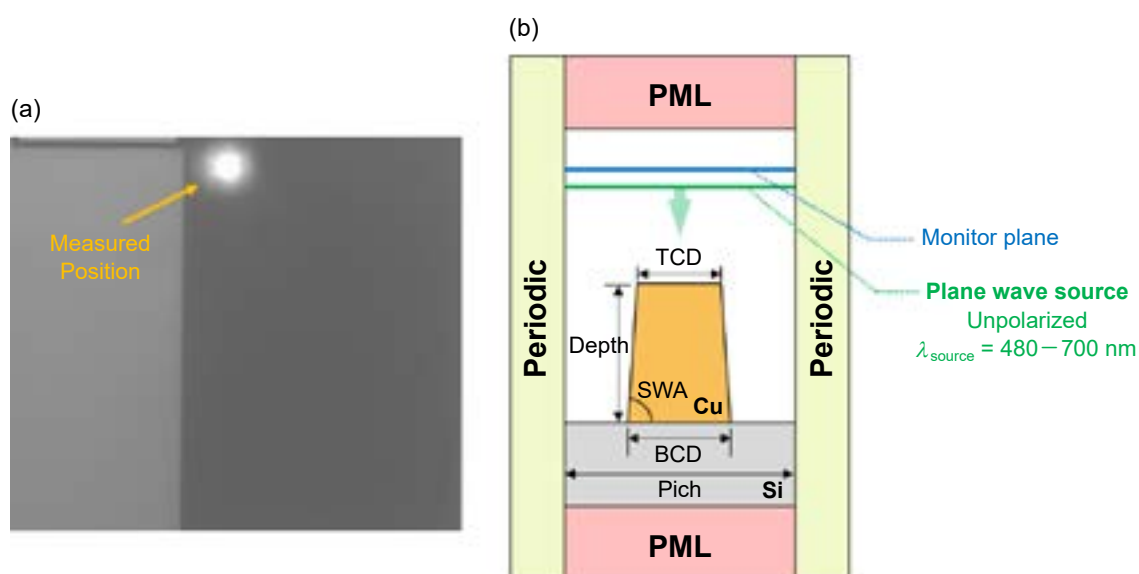


圖 10. (a) 照明光斑影像 (b) 多結構平均量測之模型示意圖。

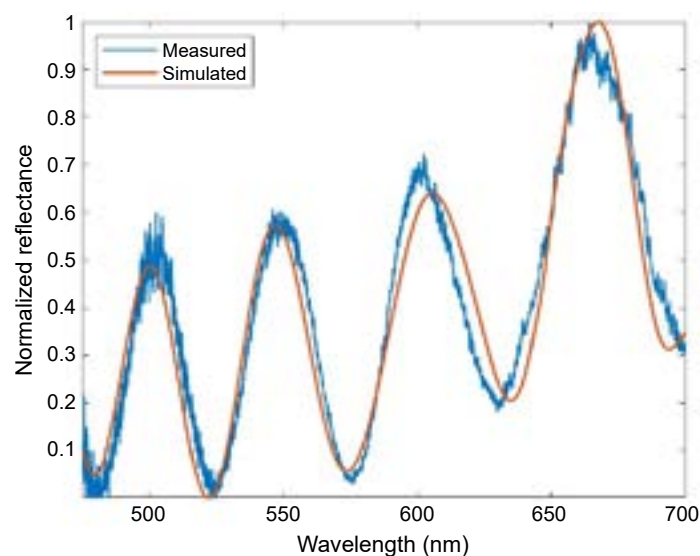


圖 11. 實驗與模擬光譜之比較。兩者之值為 0.94。

表 2. 各項結構尺寸之參數空間。

尺寸參數	參數空間
TCD (a_1)	$(1.2 \pm 0.15) \mu\text{m}$
BCD (a_2)	$(1.2 \pm 0.15) \mu\text{m}$
Depth (a_3)	$(2.9 \pm 0.15) \mu\text{m}$
Pitch (a_4)	$(2 \pm 0.15) \mu\text{m}$
SWA	$\tan^{-1}(2a_3/(a_2 - a_1))$ degrees
Grating material	Copper (Cu)
Substrate material	Silicon (Si)

表 3. 多結構平均量測結果。

尺寸參數	平均值*	標準差*	AFM	偏差
TCD (a_1)	$1.136 \mu\text{m}$	$0.027 \mu\text{m}$	$1.220 \mu\text{m}$	$-0.084 \mu\text{m}$; -6.89%
BCD (a_2)	$1.190 \mu\text{m}$	$0.028 \mu\text{m}$	$1.290 \mu\text{m}$	$-0.1 \mu\text{m}$; -7.75%
Depth (a_3)	$2.951 \mu\text{m}$	$0.005 \mu\text{m}$	$2.890 \mu\text{m}$	$0.061 \mu\text{m}$; 2.11%
Pitch (a_4)	$1.917 \mu\text{m}$	$0.015 \mu\text{m}$	$1.970 \mu\text{m}$	$-0.053 \mu\text{m}$; -2.69%
SWA	89.471°	0.416°	89.306°	0.165° ; 0.18%

* 5 次量測結果

2. 單一結構關鍵尺寸量測結果

在此量測案例中，利用同 4.1 節所述之量測樣品，我們針對單一結構進行關鍵尺寸的量測。由於此量測需要較高的空間解析，故在系統內我們使用 150 倍物鏡並將雷射光束的直徑保持至 1 mm，以產生一細小的光斑尺寸 (直徑約 $1.2 \mu\text{m}$)，以及有效照明 NA 為 0.39。如圖 12(a) 所示，在此條件下，可將照明光斑精準的定位於欲量測之結構位置上，此為本技術之

一大優勢。圖 12(b) 為對此量測案例所建立之模型。根據實際的量測條件，在模型中我們在邊界處施加了吸收邊界 (perfectly matched layer, PML)，並設置照明為一非偏振、波長範圍為 $\lambda = 480 - 700 \text{ nm}$ 之聚焦高斯光束，其束腰被置於結構頂部。模型中之接收 NA 則依據所選用的物鏡設為 0.9。

同樣利用表 2 之各尺寸的參數空間進行模擬與實驗訊號的最佳化擬合，本量測案例之最終量測結果如表 4 所示。圖 13 為實驗與模擬光譜之比較，兩者之決定係數 (R^2) 為 0.98。表 4 之量測結果顯示，系統在 5 次量測下，平均偏差為 AFM 量測值之 1.41%，且標準差 (1σ) 低於 $0.013 \mu\text{m}$ 。

由此量測案例可見，相較於 4.1 節中傳統多結構平均量測之結果，本研究對於量測單一結構關鍵尺寸的突破具有進一步提升量測準確度的潛力。

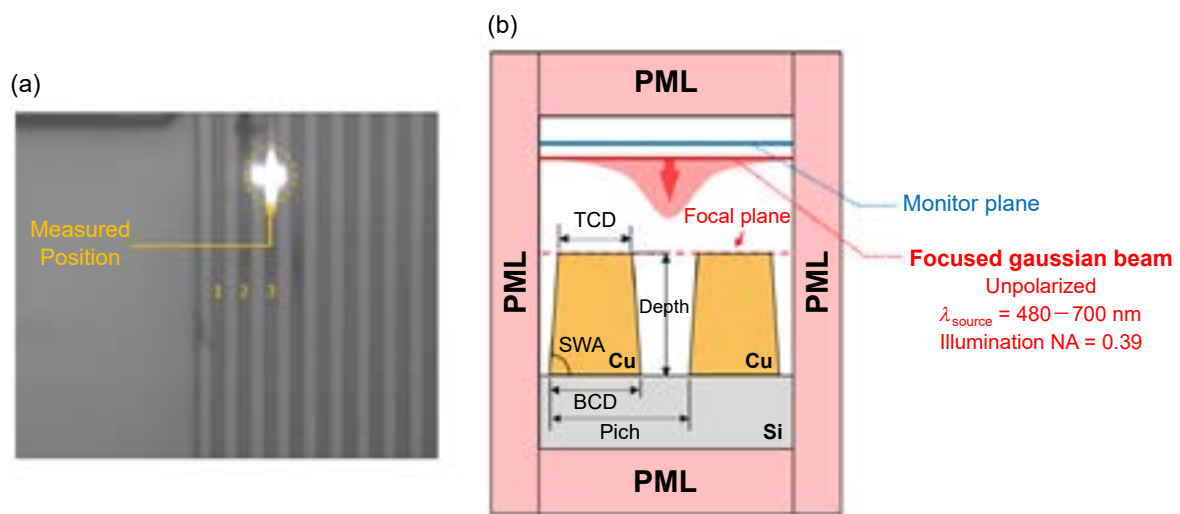


圖 12. (a) 照明光斑影像 (b) 單一結構量測之模型示意圖。

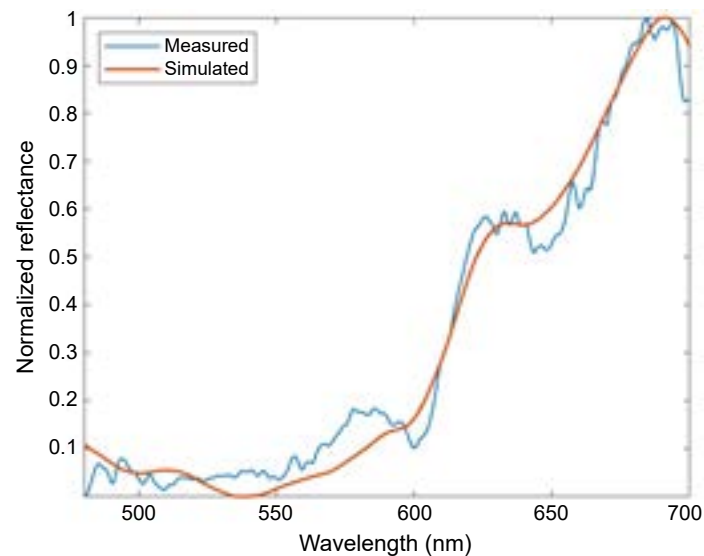


圖 13. 實驗與模擬光譜之比較。兩者之值為 0.98。

表 4. 單一結構量測結果。

尺寸參數	平均值*	標準差*	AFM	偏差
TCD (a_1)	1.214 μm	0.001 μm	1.220 μm	-0.006 μm ; -0.49%
BCD (a_2)	1.295 μm	0.013 μm	1.290 μm	0.005 μm ; 0.39%
Depth (a_3)	2.872 μm	0.012 μm	2.890 μm	-0.018 μm ; -0.62%
Pitch (a_4)	2.077 μm	0.009 μm	1.970 μm	0.107 μm ; 5.43%
SWA	89.197°	0.122°	89.306°	-0.109° ; -0.12%

* 5 次量測結果

五、結論

本研究所提出之光學量測系統基於寬頻雷射的高空間同調性，可將照明光斑尺寸降至 1.2 μm ，並同時維持高的光能使用效率。利用此系統之高空間解析，並搭配所提出之基於模型的量測方式，可實現同時量測單一結構之多項關鍵尺寸。經由量測範例證實，與傳統光學散射術之平均量測相比，本技術具有提供對欲量測結構更具代表性且更準確的量測結果的潛力。我們認為後續尚需要對局部因素 (如粗糙度、光學像差與光斑定位精度等) 如何影響量測結果進行詳細的分析，以進一步提升本技術之準確度與穩定度，用以因應未來先進封裝領域之量測需求。

參考文獻

1. Lau JH. Semiconductor Advanced Packaging: Springer; 2021.
2. Changhong Hyun, Seongryong Kim, and Heuijae Pahk, *Journal of the Optical Society of Korea*, **18** (5), 531 (2014).
3. Taeyong Jo, Seongryong Kim, and Heuijae Pahk, *Journal of the Optical Society of Korea*, **17** (4), 317 (2013).
4. Timoney P, Fisher D, Ko Y-U, Vaid A, Thangaraju S, Smith D, et al., "New interferometric measurement technique for small diameter TSV ", *25th Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference* , May 19-21(ASMC 2014).
5. Heulbi Ahn, Jaeseok Bae, Jungjae Park and Jonghan Jin, *Scientific reports*, **8** (1), 1 (2018).
6. Fursenko O, Bauer J, Marschmeyer S, *Microelectronic Engineering*, **139**, 70 (2015).
7. Yi-Sha Ku, *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, **13** (1), 011209 (2014).
8. Yi-Sha Ku and Fu Shiang Yang, *Optics Express*, **18** (7), 7269 (2010).
9. Christopher Raymond, "Overview of scatterometry applications in high volume silicon manufacturing", AIP Conference Proceedings, American Institute of Physics, (2005).
10. Ansys. Lumerical FDTD solutions, please refer to the website: <https://www.lumerical.com/>.
11. Press WH, Teukolsky SA, Vetterling WT, Flannery BP. Numerical recipes 3rd edition: The art of scientific computing: Cambridge university press; (2007).
12. Çapoğlu İR, Rogers JD, Taflove A, Backman V., *Progress in Optics*, **57**, 1 (2012).

作者簡介

簡維信先生為國立臺灣大學機械工程學系碩士，現於台大機械系擔任研究助理。

Wei-Hsin Chein received his M.S. in Mechanical Engineering from National Taiwan University. He is currently a Research Assistant in the Department of Mechanical Engineering at National Taiwan University.

楊福生先生現為國立臺灣大學機械工程學系博士生。

Fu-Sheng Yang is currently a Ph.D. student in the Department of Mechanical Engineering at National Taiwan University.

傅子英先生現為國立臺灣大學機械工程學系碩士生。

Zi-Ying Fu is currently a M.S. student in the Department of Mechanical Engineering at National Taiwan University.

陳亮嘉先生為南澳大利亞大學製造與機械系博士，現為國立臺灣大學機械工程學系特聘教授。

Liang-Chia Chen received his Ph.D. in Advanced Manufacturing and Mechanical Engineering from the University of South Australia. He is currently a Distinguished Professor in the Department of Mechanical Engineering at National Taiwan University.

預測雷射拋光後雷射粉床熔融零件的表面樣態：數值和實驗研究

Predicting the Surface Morphology of Laser Powder Bed Fusion Parts After Laser Polishing: Numerical and Experimental Study

范得福、陳章紅

Dac-Phuc Pham, Hong-Chuong Tran

雷射粉床式熔融 (laser powder bed fusion, LPRF) 過程可以利用雷射光束的熱能逐層熔化金屬粉末層的特定區域以製造具有複雜結構的零件。所構建零件的表面粗糙度是決定最終產品品質的主要因素，而雷射拋光採用雷射輻射熔化金屬的薄層，以獲得更好的表面品質。由於這項技術不需要額外的工具成本並在取代機械拋光方面展示了強大的潛力。若能準確預測應用雷射拋光後的表面結構將會為優化雷射拋光的加工條件奠定基礎。為解決這個問題在本研究中我們開發了一個綜合計算框架，用於預測經過雷射拋光後 LPBF 加工零件的表面形貌，包括表面生成模型、光線追蹤模型、熱傳遞模擬和低通濾波器。本研究發現表面粗糙度的關鍵預測值，包括平均粗糙度 (R_a) 和均方根值 (R_z) 與實驗結果的差異分別不超過 7.7% 和 9.8%。此外，相關長度是用於表示側向高度變化的參數，本研究也將模擬的相關長度 (cl) 與實驗結果進行比較，觀察到的模擬相關長度與實驗結果之間的最大誤差不超過 13.4%。

Laser Powder Bed Fusion (LPBF) process can produce parts with complex structures by using the thermal energy of laser beam to melt specific area of metal powder layers in a layer-by-layer manner. The surface roughness of the as-built parts is one of the major requirements to determine the quality of final products. Laser Polishing employed laser radiation to melt a thin layer of metal to achieve a better surface quality. Accordingly, this technology demonstrated its strong potential in replacing mechanical polishing because of no additional cost for tooling is required. Accurately predicting the surface topology after applying laser polishing will create a foundation for optimizing the processing conditions for Laser Polishing. For solving this issue, in this work, an integrated computational framework including surface generation model, ray-tracing model, heat transfer simulation low pass filter was developed to predict the surface morphology of LPBF processed part after applying laser polishing. It is observed that by using the proposed simulation model, the predicted and measured results of mean roughness (R_a), mean roughness depth (R_z) and correlation length (cl) are in good agreement with error less than 10%.

一、前言

雷射粉床式熔融 (LPBF) 過程利用高密度的雷射光束熔化金屬粉末的特定區域，形成具有特定厚度的固化層。然而當固化層降低一定距離，新的金屬粉末層將會以一定的厚度分佈，並透過控制雷射光束融合下一層。由於 LPBF 能夠在短時間內無需藉由工具和模具製造出複雜的 3D 零件，因此它被廣泛應用在工業界和學術界⁽¹⁾。

有許多加工參數皆會影響所製造零件的品質且與 LPBF 相關的物理現象非常複雜，由於 LPBF 過程的隨機性和眾多加工條件，可能會在過程中引發多種缺陷，如內部孔隙⁽²⁾、比傳統製造過程更高的表面粗糙度參數⁽³⁾。文獻中的作者報告了 LPBF 加工的不銹鋼 316L 零件的表面粗糙度 R_a 為 $16\text{ }\mu\text{m}$ ⁽⁴⁾。

因此，找到合適的加工條件以改善 LPBF 加工零件的表面紋理至關重要。例如，透過優化雷射功率、掃描速度和掃描間距，在文獻中的作者^(5,6) 觀察到 LPBF 加工零件表面粗糙度的顯著改善。然而 LPBF 加工零件的粗糙度仍無法滿足行業標準⁽⁷⁾，因此一些研究採用了雷射拋光策略來改善製造零件的表面品質，例如⁽⁸⁾ 的研究使用了相同的策略來提高 LPBF AlSi10Mg 零件的密度和表面粗糙度。

在先前的文獻指出，應用雷射拋光改善 LPBF 加工零件的表面紋理具有重要性，然而這些研究通常是透過試誤法來找出最佳參數。很多研究會使用模擬工具預測應用雷射拋光後樣品的表面形態，但在這些研究中卻忽略了初始表面對雷射輻射吸收的影響。

在文獻探討章節中提供了許多關於雷射拋光過程中有關物理現象的見解，當雷射光束照射金屬表面時，部分雷射能量將被吸收而其餘部分則被散射回去⁽⁹⁾。而雷射光束的吸收是熱傳遞模擬模型的重要輸入參數，且吸收的能量也會受到初始表面的影響。然而這些物理現象在先前的研究中被忽略了。

為了解決上述問題，本研究致力於建立一個計算框架，考慮初始表面對雷射吸收的影響，以預測最終由雷射拋光產生的表面，所提出的模型簡要描述如下。首先，測量 LPBF 加工後的表面形態，從測量數據中提取平均粗糙度 (R_a)、平均粗糙深度 (R_z) 和相關長度 (cl) 等參數，再使用文獻⁽⁹⁾ 所提出的數學模型，基於上述測量結果模擬一維表面輪廓。接著採用雙向反射分佈函數 (BRDF) 數學模型計算雷射吸收係數，並將其轉換為熱傳遞模擬中用於計算雷射光束照射區域的平均熔化時間。最後利用平均熔化時間計算臨界衰減頻率。根據計算得到的 LPBF 加工表面輪廓進行 FFT 算法，將其轉換為頻域，並使用低通濾波器和臨界衰減頻率來過濾原始表面的初始頻譜，最後使用反向 FFT 重建雷射拋光表面的最終輪廓。透過將模擬的輪廓計算得到的 R_a 、 R_z 和 cl 與雷射拋光表面測量得到的數據進行比較，驗證了所提出的框架。

二、研究方法

圖 1 顯示了本研究提出的綜合計算框架中用於模擬雷射拋光引起的表面輪廓的主要步驟。

1. 雷射粉床熔融和雷射拋光

為了進行後續的 LP 處理，本研究在 LPBF 試驗中製備了樣品。在 LPBF 過程中，若選擇不合適的加工條件可能導致樣品頂部表面的粗糙度較差⁽¹⁰⁾。因此在實際操作中，透過實驗和模擬方法⁽¹¹⁾ 初步預測 LPBF 過程的最佳加工條件，並將其用於進行 LPBF 實驗中。透過使用⁽¹¹⁾ 中的方法，本研究中選擇 SUS 420 材料的最佳加工條件以研究零件位置對零件頂

部表面粗糙度的影響，如圖 2 所示的構建板上不同位置製備樣品。此試驗在氮氣濃度低於 2000 ppm 與一台商用 Tong Tai LPBF 機器 (AMP-160) 的環境中進行。其樣品 (簡單的 3D 立方體) 採用 SUS420 金屬粉末製作而成，其粉末粒徑分佈為 20–60 μm 。每個樣品在每種情況下列印了 20 層，每層厚度為 30 μm 。主要的 LPBF 加工參數總結如表 1 所示。

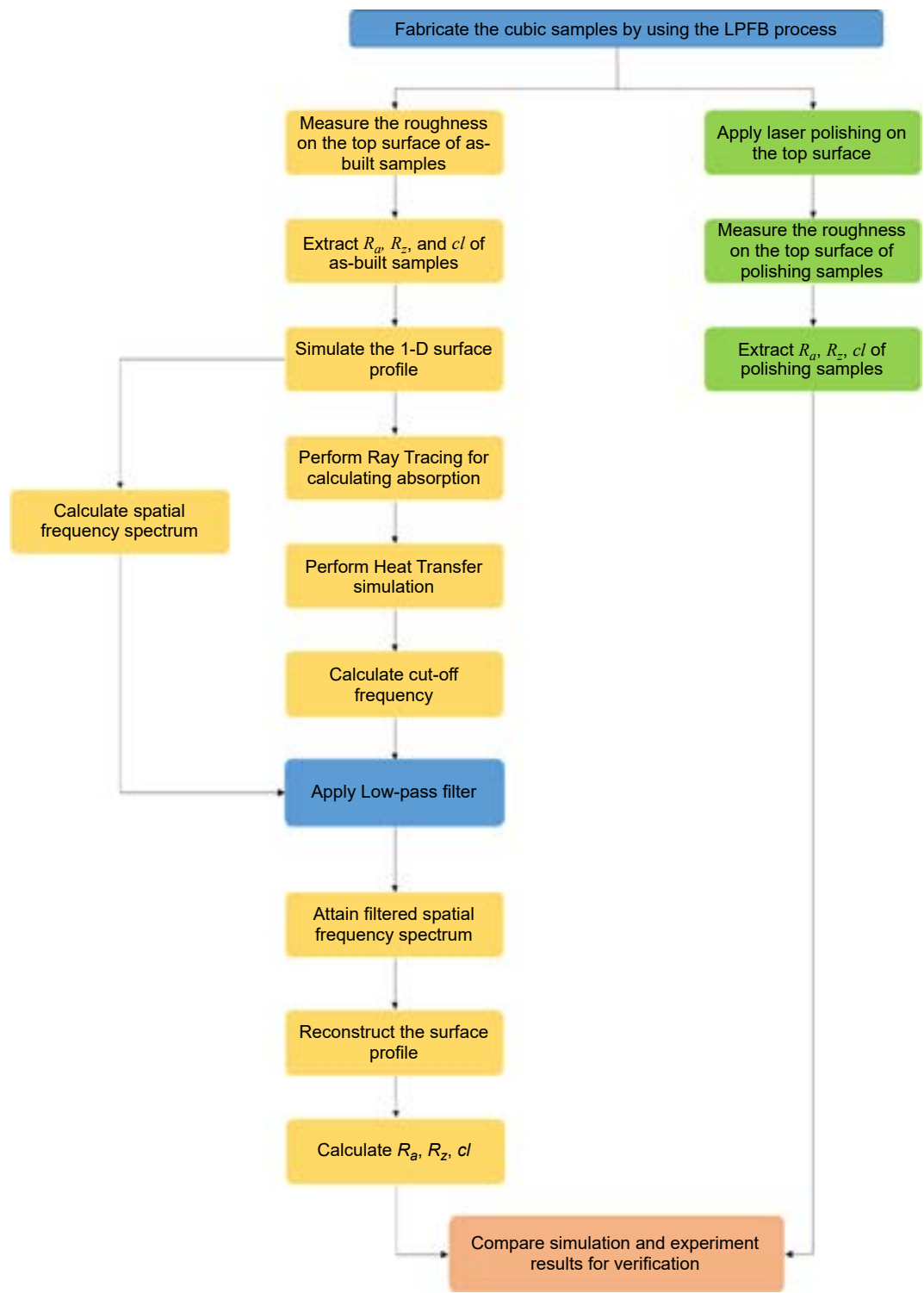


圖 1. 本研究提出的綜合計算框架中的主要步驟流程圖。

表 1. LPBF 過程的實驗參數。

參數	數值
雷射粉末	270 (W)
掃描速度	600 (mm/s)
掃描間距	140 (μm)
層厚	30 (μm)
相鄰層之間的旋轉角度	67°
雷射點尺寸	100 μm
雷射類型	Nd:Yag laser wavelength 1064 nm

在列印過程完成後，將樣品從試驗環境中取出並測量其頂部表面的粗糙度，再將樣品放回 LPBF 機器進行 LP 處理。為確保雷射光束的焦平面正確定位在樣品的頂部表面上，LP 過程中基板的 z 座標設定為 LPBF 過程結束時基板的最終位置。根據文獻⁽¹²⁾ 的實驗結果得知，當雷射照射金屬時，熔池的形成可以根據傳導熔化或穿孔熔化模式。在傳導熔化模式中，熱傳輸和流體流動是形成熔池的主要因素。相反地，在穿孔熔化模式中，反衝壓力將顯著影響熔池幾何形狀的形成。因此在 LP 實驗中設計調查模擬模型在預測傳導和穿孔模式下的表面粗糙度方面的能力，當固定試驗空間並在雷射功率和掃描速度中變動，使得得到的能量密度 (J/mm) 可以同時涵蓋傳導和穿孔模式。表 2 顯示了應用於每個樣品的雷射拋光條件。此外，本研究僅對每個零件的頂部表面的一半進行了拋光處理以進行比較 (參見圖 2 中右側的示意圖)。

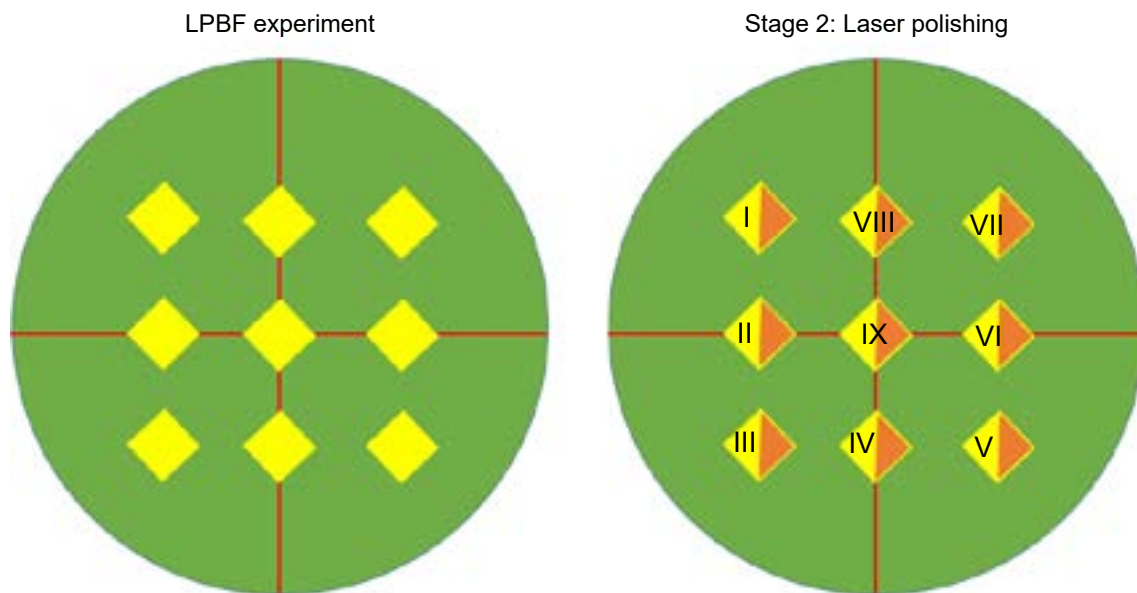


圖 2. LPBF 實驗和雷射拋光實驗的概念。

表 2. LP 過程的實驗參數。

案例	功率 (W)	掃描速度 (mm/s)	掃描間距 (μm)
I	200	1000	100
II	200	800	100
III	220	550	100
IV	220	800	100
V	240	500	100
VI	240	750	100
VII	170	1100	100
VIII	170	600	100
IX	170	1300	100

2. 表面粗糙度的測量

在完成 LPBF 和雷射拋光實驗後，使用 KEYENCE VK-X250 共焦雷射掃描顯微鏡對樣本頂部表面的表面形態進行了測量。圖 3(a) 顯示了典型的測量表面紋理，圖 3(b) 展示了相應的平均表面輪廓。根據文獻中指定的公式，獲得了代表表面型態的三個基本參數 R_a 、 R_z 和 cl 。

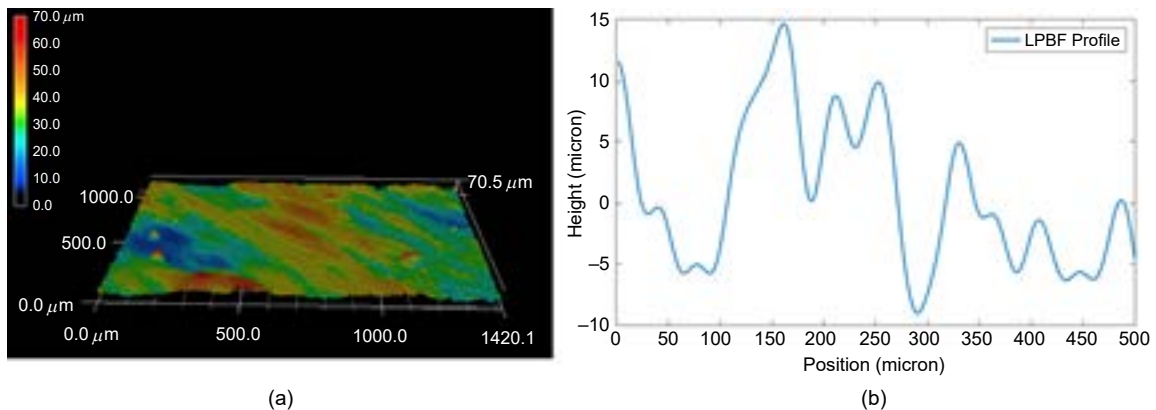


圖 3. (a) 測量的表面形貌；(b) 平均表面輪廓。

三、模型描述

1. 表面生成和光線追蹤模型

使用 Bergstrom 等人提出的數學模型⁽⁹⁾ 來為每個測得的 R_a 、 R_z 和 cl 模型構建一維表面輪廓。此數學模型指出，一般而言一維隨機粗糙度 $y = \zeta(x)$ 可以透過使用兩個分布函數來進行統計描述。第一個函數模擬了從平均參考值 ($\zeta(x) = 0$) 的高度波動，而後一個函數則控制了這些高度在橫向方向上的波動。高斯高度函數可以描述為：

$$p(\xi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\xi^2/2\sigma^2} \quad (1)$$

其中， σ 是模擬表面的平均粗糙深度 (R_z)。
自相關函數也符合高斯分布，如下所示：

$$C(\tau) = \langle \xi(x_1)\xi(x_2) \rangle = \sigma^2 \exp\left(-\frac{|x_1 - x_2|^2}{\tau^2}\right) \quad (2)$$

其中， x_1 和 x_2 是位於表面上兩個不同點的坐標， τ 是相關長度。圖 4 顯示了從實驗中提取的建造表面的平均輪廓以及由當前模擬模型模擬的相應輪廓，圖中可以看出從實驗中測得的 R_a 、 R_z 和 cl 值分別為 4.9 ± 0.8 、 7.5 ± 1.2 、 24.16 ± 1.3 ，而從模擬輪廓中得到的 R_a 、 R_z 和 cl 值分別為 5.01、6.33、24.11。整體而言，可以看出模擬模型能夠模擬 LPBF 處理輪廓的一般特徵。

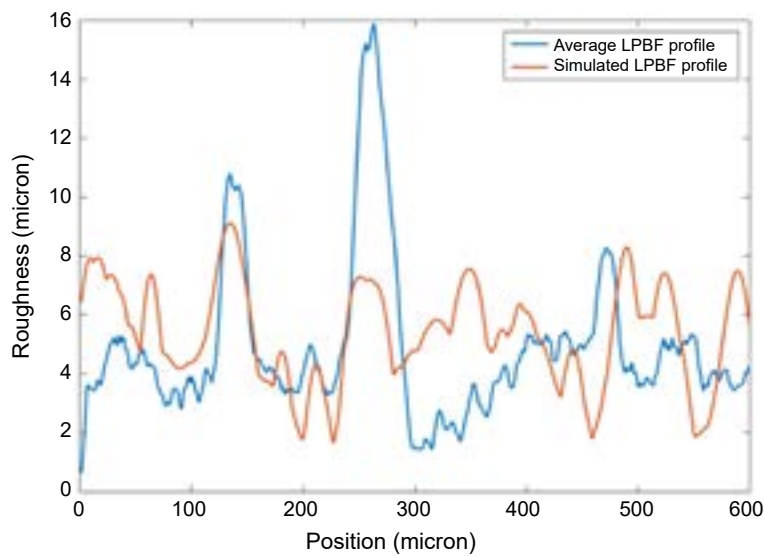


圖 4. 實驗中的平均輪廓和模擬的表面輪廓。

在雷射光束重新熔化過程中，雷射光束照射在固化金屬零件的表面，部分能量被金屬顆粒吸收，剩餘能量則被散射回來。Bergström 等人的研究表明⁽⁹⁾，吸收的雷射能量很大程度上取決於粉末層的表面粗糙度和金屬顆粒的光學特性。尤其在粗糙的表面上，雷射光束與表面形貌之間的相互作用程度大大增加，進而導致粉末層吸收的雷射能量增加。因此本模型採用雙向反射分佈函數 (bidirectional reflectance distribution function, BRDF) 算法來考慮表面形貌對雷射吸收的影響。BRDF 計算如下⁽⁹⁾：

$$\rho_{\lambda}''(\Omega_s, \Omega_i) = \frac{\pi}{c \cos(\theta_s)} \left(\frac{\frac{d\phi_s}{d\Omega_s}}{\frac{d\phi_i}{d\Omega_i}} \right) \quad (3)$$

其中， θ_s 是散射光的角度； ϕ_i 和 ϕ_s 分別是入射和散射輻射功率； Ω_i 和 Ω_s 分別是入射和散射的立體角。

將方程式 (3) 進行積分，可以得到以下定向半球反射率的表達式：

$$\rho_{\lambda}''(\Omega_i) = \frac{1}{\pi} \int_{2\pi} \rho_{\lambda}''(\Omega_s, \Omega_i) \cos(\theta_s) d\Omega_s \quad (4)$$

金屬表面的吸收函數可以表示為：

$$A_{\lambda}'(\Omega_i) = 1 - \rho_{\lambda}'(\Omega_i) \quad (5)$$

2. 熱傳導模型

將前一節計算得到的吸收率放至熱傳導模型中，用於計算雷射光束照射材料的熔化時間。

熱傳導模型的數學式表示如下⁽¹⁰⁾：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = q(x, y, z, t) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (6)$$

其中， ρ 是材料密度 (kg/m^3)、 c 是比熱 (J/kgK)、 T 是溫度 (K)、 t 是熱源的作用時間 (s)、 k 是熱傳導率 ($\text{W/(m}\cdot\text{K)}$)，而 $q(x, y, z, t)$ 則是單位體積的熱發生率 (W/m^3)。根據實驗設定，初始條件為 293K。

應用在計算定義域頂部表面的雷射熱通量表示如下⁽¹³⁾：

$$q(x, y, t) = \frac{2AP}{\pi R_0^2} \exp \left[-\frac{2((x-vt)^2 + y^2)}{r_0^2} \right] \quad (7)$$

其中 A 是在第 3.2 節中所獲得的吸收係數， P 是雷射功率， r_0 是雷射半徑， v 是雷射光束的掃描速度，而 x 、 y 則是計算定義域頂部表面上的坐標。

本模擬模型也考慮了由對流冷卻和輻射冷卻引起的熱損失，表示為^(14, 15)

$$Q_{rad} = -\sigma \epsilon (T^4 - T_a^4) \quad (8)$$

$$Q_{conv} = -h_c (T - T_a) \quad (9)$$

其中， T 是工件的溫度， T_a 是環境溫度， σ 是史帝芬常數 ($5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)， ϵ 是發射率 (固態為 0.4、熔融材料為 0.1)，而 h_c 是熱傳導係數 ($h_c = 100 \text{ W/m}^2\text{K}$)。圖 5 顯示了數值模型中的初始和邊界條件設定，以及雷射拋光過程中雷射光束的軌跡。

3. 使用低通濾波器模擬的拋光表面輪廓

當雷射光束照射在粗糙表面上時，雷射能量會被金屬表面吸收 (參見第 3.2 節)。當吸收的能量足以熔化粗糙的金屬表面，熔融金屬將引起表面張力，這也是導致初始表面輪廓平滑效果的主要因素之一。換句話說，可以透過假設初始粗糙表面的最高頻率衰減來模擬拋光表

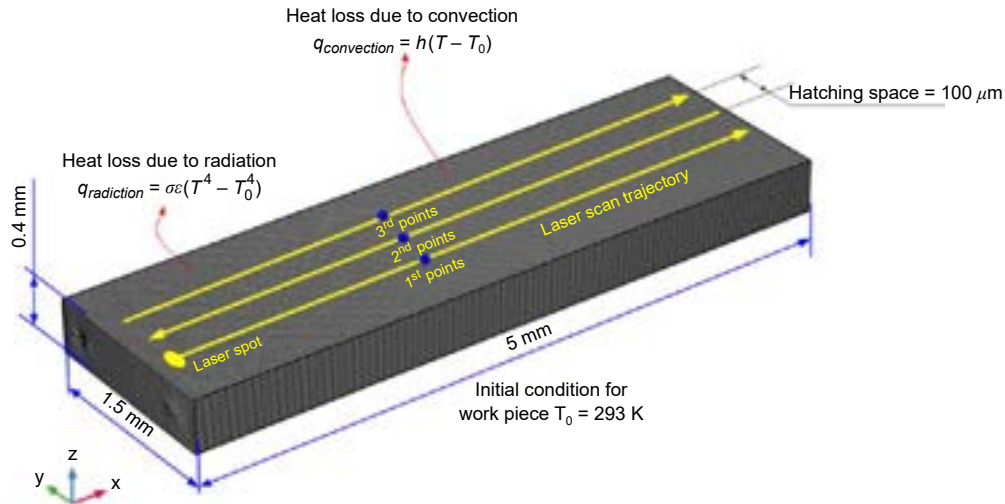


圖 5. 目前模擬模型的初始和邊界條件概念圖。

面⁽¹⁶⁾。可以根據文獻提出的方式，可以把衰減原始表面較高頻率表示為⁽¹⁶⁾。

$$f_{cr} = \left(\frac{\rho}{8\pi^2 \mu t_m} \right)^{1/2} \quad (10)$$

其中， f_{cr} (1/mm) 代表臨界頻率， μ (Ns/m²) 為動態黏度， ρ (kg/m³) 為密度，而 t_m (s) 代表平均熔化時間。需要注意的是，平均熔化時間是透過對位於圖 5 中雷射光束中心的節點上的所有熔化時間進行平均計算得到的。

四、結果與討論

對於 LPBF 加工所產生的每個表面形貌情況 (見第 3.1 節)，驗證過的表面生成模型被用來重構表面形貌。接著模擬的輪廓被導入光線追蹤模型計算雷射光束的吸收率。對應不同表面粗糙度情況的計算吸收值輸入到第 3.2 節描述的驗證過的熱傳導模型中計算熔化時間。圖 6 顯示了圖 5 中所示的 3 個點的歷史溫度。對於圖 5 所示的雷射掃描軌跡中心的每個節點計算了對應的熔化時間，並將平均熔化持續時間取平均值，再使用公式 (10) 確定模擬雷射拋光輪廓的截止頻率。

為了展示建立的模型在預測雷射拋光後樣品表面形貌的能力，我們在案例 VIII 中比較了平均拋光剖面 and 模擬拋光剖面，結果如圖 7 所示。從結果可以看出建立的類比模型能夠捕捉到實驗得到的拋光表面結構。特別是，實驗中鐳射拋光剖面的 R_a 、 R_z 和 cl 分別為 4.01 微米、4.94 μm 和 9.2 μm ，而模擬剖面得到的結果為 $R_a = 4.14 \mu\text{m}$ ， $R_z = 5.17 \mu\text{m}$ ， $cl = 9.82 \mu\text{m}$ 。

為了進一步驗證模擬模型在預測雷射拋光後金屬表面拓撲的能力，我們提取了拋光表面的 R_a 、 R_z 和 cl 參數，並將其與在不同加工條件下的模擬模型預測結果進行比較，如表 2 所示，比較結果顯示在圖 8(a)、(b)、(c) 中。觀察雷射拋光後表面參數的實驗和模擬結果，可

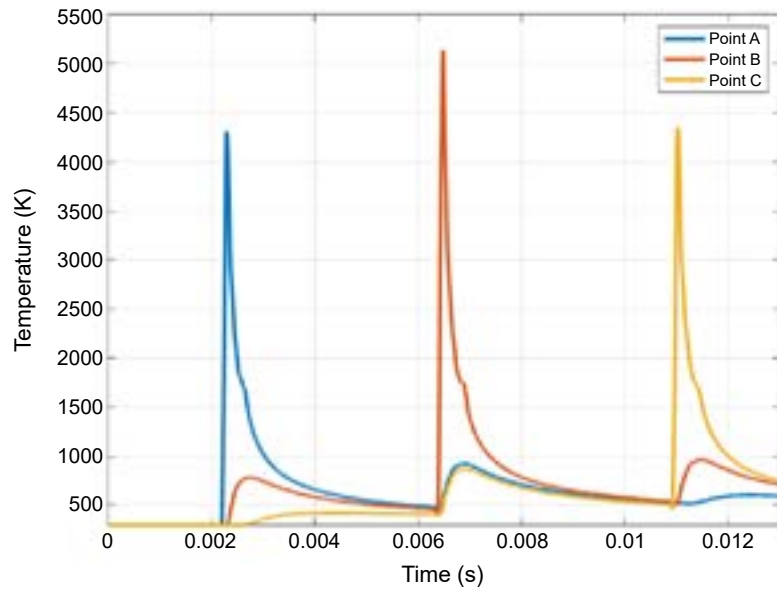


圖 6. 圖 5 中所示的三個點的溫度曲線。

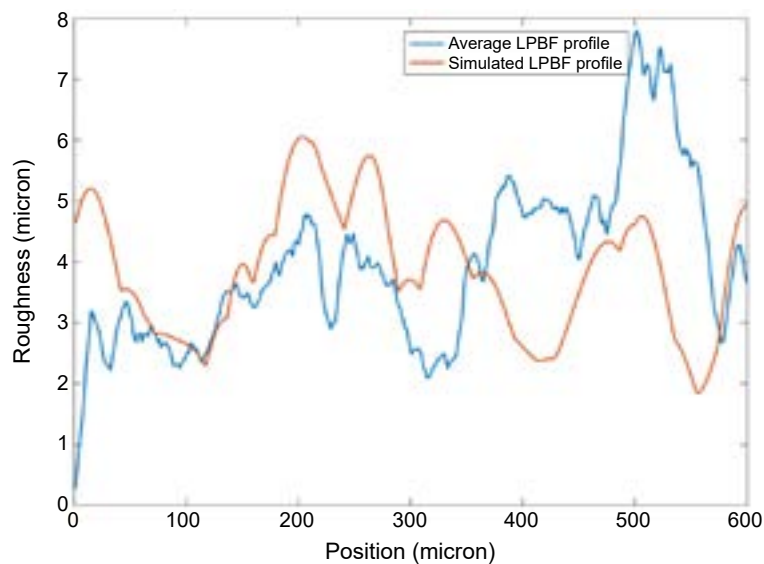


圖 7. 雷射拋光的平均測量剖面與模擬剖面比較。

以看出在能量密度從 $0.13-0.3 \text{ J/mm}$ 變化的情況下，模擬的 R_a 、 R_z 和 cl 結果與實驗結果非常吻合，特別是模擬結果與實驗結果之間的誤差為： R_a 小於 5.5% 、 R_z 小於 6.7% 、 cl 小於 15% 。然而在能量密度為 0.28 J/mm 的案例 VIII 中，模擬結果略高於實驗結果。

五、結論

本研究提出了一個計算框架，包括表面生成演算法、光線追蹤模擬、熱傳導和空間頻率濾波演算法，用於預測雷射拋光後 LPBF 加工表面的拓撲。本研究的主要貢獻可以總結如下：

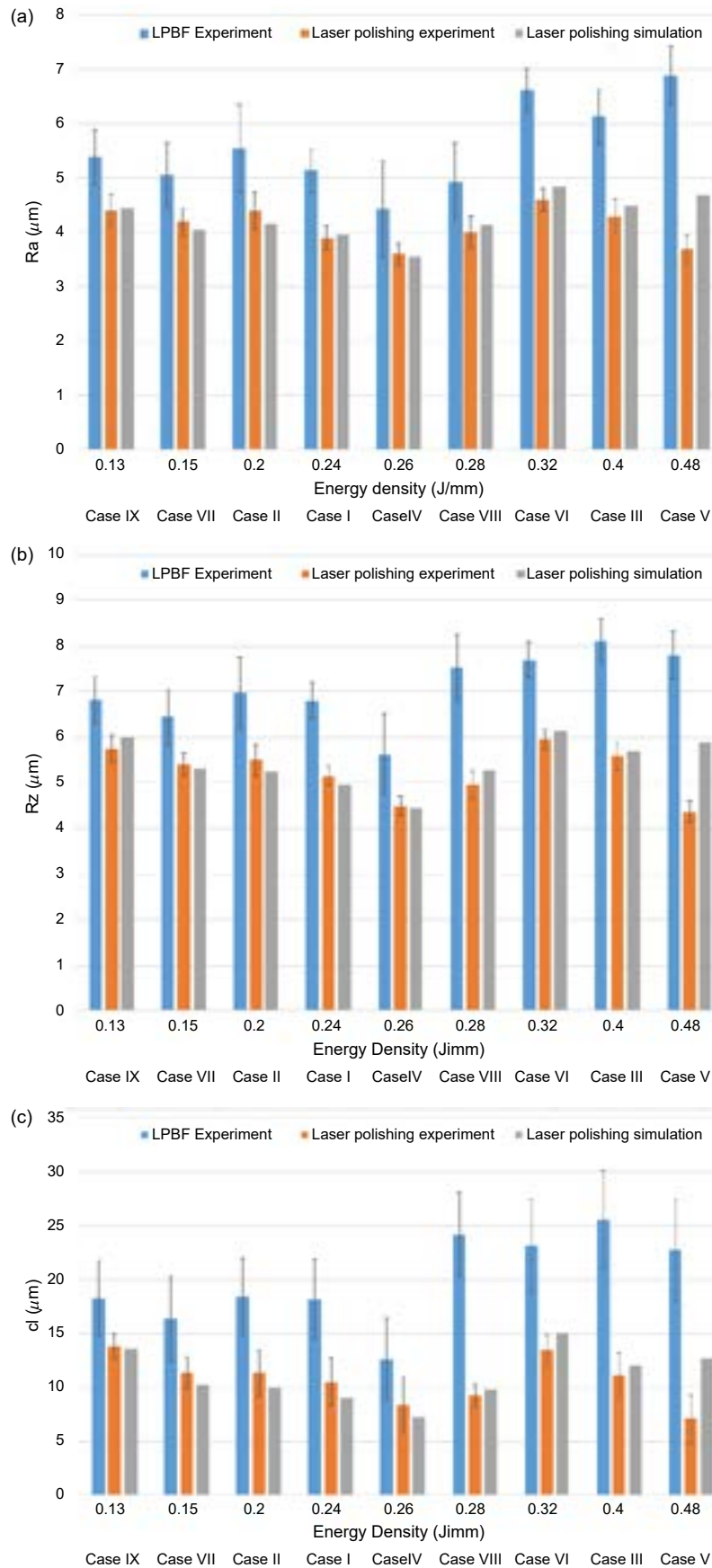


圖 8. LPBF 加工樣品、雷射拋光樣品和模擬雷射拋光樣品的表面參數。

- 表面粗糙度模型可以模擬具有與 LPBF 加工過程相同的 R_a 、 R_z 和 cl 參數的表面。
- 光線追蹤演算法可用於計算與不同表面拓撲相對應的吸收率。研究發現，粗糙的表面能夠吸收更多的雷射能量。此外，計算得到的吸收率對預測的表面形貌具有顯著影響。
- 集成以上兩個模型與熱傳導模型和空間頻率濾波演算法，可以用於模擬雷射拋光後的表面拓撲。

總體而言，建立的模型為預測雷射拋光後 LPBF 加工表面的形貌提供了有效的工具。在未來的研究中將開發一個更複雜的模擬模型，考慮使用蒸汽反衝壓力與熔融金屬的氣液介面之間的隨機相互作用效應，以全面模擬該區域的表面輪廓形成。

誌謝

本研究受到國家科學及技術委員會 NSTC 110-2222-E-218-002-MY2 的經費資助。

參考文獻

1. Lan Chen, Brodan Richter, Xinzhou Zhang, Xudong Ren, Frank E. Pfefferkorn, *Additive Manufacturing*, **32**, 101013 (2020).
2. Zackary Snow, Abdalla R. Nassar, Edward W. Reutzel, *Additive Manufacturing*, **36**, 101457 (2020).
3. Evren Yasa and Jean-Pierre Kruth, *Advances in Production engineering and Management*, **6**, 259 (2011).
4. Wakshum M. Tucho, Vidar H. Lysne, Håkon Austbo, Atle Sjolyst-Kverneland, Vidar Hansen, *Journal of Alloys and Compounds*, **740**, 910 (2018).
5. Jacob C. Snyder, Karen A. Thole, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **142**, 071003, (2020).
6. Longchao Cao, Jingchang Li, Jiexiang Hu, Huaping Liu, Yuda Wu, Qi Zhou, *Optimization of s Laser Technology*, **142**, 107246 (2021).
7. T. Deng, J. Li, and Z. Zheng, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **148**, 103472 (2020).
8. W. Yu, S. L. Sing, C. K. Chua, and X. Tian, *Journal of Alloys and Compounds*, **792**, 574 (2019).
9. D. Bergström, J. Powell, and A. Kaplan, *Journal of applied physics*, **101**, 113504 (2007).
10. B. Richter, N. Blanke, C. Werner, F. Vollertsen, and F. Pfefferkorn, *Jom*, **71**, 912 (2019).
11. H.-C. Tran and Y.-L. Lo, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **105**, 4443 (2019).
12. D. Hann, J. Iammi, and J. Folkes, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **44**, 445401 (2011).
13. H.-C. Tran and Y.-L. Lo, *Journal of Materials Processing Technology*, **255**, 411 (2018).
14. H. Wang, Y. Kawahito, R. Yoshida, Y. Nakashima, and K. Shiokawa, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **118**, 562 (2018).
15. C. Multiphysics and C. Module, *Version: COMSOL Multiphysics*, **3**, (2014).
16. E. Ukar, A. Lamikiz, S. Martínez, I. Tabernero, L.N. López de Lacalle, *Journal of Materials Processing Technology*, **212**, 1305 (2012).

作者簡介

范得福現為南臺科技大學機械工程學系博士生。

Dac-Phuc Pham is currently a Ph.D. student in the Department of Mechanical Engineering at Southern Taiwan University of Science and Technology.

陳章紅為臺南成功大學機械工程學系獲得博士學位，現為南臺科技大學機械工程系助理教授。

Hong-Chuong Tran received his Ph.D. in the Department of Mechanical Engineering from National Cheng Kung University. He is currently an Assistant Professor in the Department of Mechanical Engineering at Southern Taiwan University of Science and Technology.