NARLabs 國家實驗研究院

#### 台灣儀器科技研究中心

Taiwan Instrument Research Institute

Instruments Today 2019 Q4

# 系统统统



台北國際光電週系列活動 **OPTO TAIWAN** 



## OPTO Taiwan

### 國際光電大展

The 29th Int'l Optoelectronics Exposition www.optotaiwan.com

Oct 21-23, 2020

Taipei Nangang Exhibition Hall 1 台北南港展覽館1館

#### **Exhibits**

- Compound Semiconductor
- Optoelectronics Devices
- Optical Input/Output & Storage Device
- Laser applications
- Vacuum Coating
- Optical Fiber Communication
- Biophotonics
- 3D Printing

#### Concurrent Exhibition

精密光學展

Mini/Micro LED專區

5G光通訊專區

智慧車用及感測專區

生醫光電專區

#### Organizer



光電科技工業協進會 Photonics Industry & Technology Development Association 10093台北市羅斯福路二段九號五樓 5F, No.9, Sec.2, Roosevelt Road, Taipei 10093, Taiwan

Tel: +886-2-2396-7780 Fax: +886-2-2396-8513

[ Overseas contact ] Pamela Hsiao (ext. 805) E-mail: exhibit@mail.pida.org.tw 陳小姐 (ext. 886) E-mail: ginger@mail.pida.org.tw



# 和撰新知

#### INSTRUMENTS TODAY 季刊

中華民國一百零八年十二月三十一日出版



#### 封面說明

為因應少子化產生之勞動力不足、勞動成本增加的衝擊,加上產品生命週期變短、市場快速變化、人才技術的不足以及學用落差大,因而造成上、下游中小企業趕不上旗艦大廠的腳步,影響台灣產業國際競爭力,因此必須發展智慧製造技術。臺灣製造業要邁入智慧製造時代,第一步就是推動智慧機械的發展。本期即以「智慧機械」為專題,介紹打造智慧機械的關鍵要素包含感測器、機台控制器、系統裝置整合、機聯網、人工智慧應用等項目,在國內技術發展與應用情形。

•發 行 人:楊燿州

•諮詢委員:吳文桂、陳力俊、闕志達、蔡定平

•客座主編:邱顯俊

• 執行編輯: 林麗娥、陳柏荔、魏崇倫

• E-mail: editor@tiri.narl.org.tw

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

中華民國六十八年元月創刊

•地 址:新竹市科學工業園區研發六路 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

## 221 科镍新知

中華民國一百零八年十二月



#### 智慧機械

4 加速規與溫度感測器 鄭志鈞、程文男、邱昱阩、陳韋任

19 工業 4.0 與智慧製造的關鍵技術:工業物聯網與 人工智慧

洪哲倫、張志宏、林宛儒

**26** 機械工廠內之異質機臺連網整合與應用 李維楨、鍾俊輝、劉孟昆、郭重顯、項天瑞、楊朝龍、羅乃維

35 強化學習應用於深孔機加工參數優化 陳國榕、張晉蒝、李慶鴻

45 工業用機器人控制技術簡介 游鴻修、蕭欽奇

56 工具機主軸熱變位預測技術 盧亦軒、劉德葳、洪茂棋、蔡孟勳

71 航太零件難削材之智慧製造技術 李政男、謝旻璋



36

#### 廣告索引

- ・光電科技工業協進會......

.....封面裡

- **88** 應用於晶圓級氣體感測器之高效能點測設備開發 陳銘福、林儀豪、陳志文、陳柏睿、林郁欣、卓文浩、陳建霖、柯志忠
- 101 科儀新知目錄索引 (218 期-221 期)

#### **INSTRUMENTS TODAY**

December 2019

#### **Special Issue: Smart Machinery**

- 4 Accelerometer and Temperature Sensor
  - Chih-Chun Cheng, Wen-Nan Cheng, Yu-Sheng Chiu, Wei-Jen Cheng
- 19 The Critical Technologies of Industry 4.0 and Smart Manufacturing: Industrial Internet of Things and Artificial Intelligence

Che-Lun Hung, Chih-Hung Chang, Wan-Ju Lin

26 Integration of Heterogeneous Machines and Its Applications in a Machining Factory

Wei-chen Lee, Chunhui Chung, Meng-Kun Liu, Chung-Hsien Kuo, Tien-Ruey Hsiang, Chao-Lung Yang, Nai-Wei Lo



Guo-Rong Chen, Chin-Yuan Chang, Ching-Hung Lee

45 Introduction to Industrial Robot Control Technology

Hung-Hsiu Yu, Chin-Chi Hsiao

Thermal Displacement Prediction Technology of Machine Tool Spindle

Yi-Synan Lu, Te-Wei Liu, Mao-Qi Hong, Meng-Shiun Tsai

71 Techniques of Intelligent Manufacturing for Difficultto-cut Material Applied in Components of Aerospace Industry

Jeng-Nan Lee, Min-Jhang Shie



Ming-Fu Chen, Yi-Hao Lin, Chih-Wen Chen, Po-Jui Chen, Yu-Hsin Lin, Wen-Hao Cho, Jian-Lin Chen, Chi-Chung Kei



86



98

### 加速規與溫度感測器

### Accelerometer and Temperature Sensor

鄭志鈞、程文男、邱昱阩、陳韋任 Chih-Chun Cheng, Wen-Nan Cheng, Yu-Sheng Chiu, Wei-Jen Cheng

隨著科技的進步與發展,人們對於「製造」的需求早已不僅止於自動化生產。然而,無論是設備異常偵測、零組件使用壽命預估甚至是工具機聯網製造,感測器都扮演著不可或缺的腳色,例如:想要知道工具機加工過程中為何有異常振動,就必須仰賴加速規量測振動訊號來進行分析;想要知道溫度變化對於機台熱變形的影響,就必須透過位移感測器與溫度感測器來所量測之數據來建立熱變位誤差模型。本文將介紹兩種常用的感測器一振動、溫度感測器,並敘述其應用於工具機狀態監測之使用情境。

Paving by the development and improvement of technologies, "manufacturing" in these days requires more than automation. No matter equipment abnormal detection, component life cycle prediction, or IIoT in machine tool manufacturing, sensors are crucial and play an indispensable role. For understanding why and how abnormal vibrations are excited during the machine tools' operation, accelerator is necessary to capture vibration signals for analysis; for realizing how temperature variation influence the thermal deformation of machining tools, displacement and temperature sensors are required for establishing the thermal displacement prediction model to compensate the displacement error. This paper will introduce two generally used sensors mentioned in the above applications-accelerators and temperature sensors, and the circumstance of how they play their roles in machine tool state monitoring.

#### 一、加速規感測器

振動 (vibration) 是日常生活中隨處可見的一種物理現象,例如敲擊桌面,即會使整個桌子產生振動,倘若敲擊的力道較大時,則在桌子另一端的人觸摸桌面時就會感受到桌面似乎有微小的振動。然而,每個人對於振動的感受程度不盡相同,一般來說會以加速度 (acceleration) 的物理量來進行量化,其常用單位為  $m/s^2$  或 g (重力加速度,1 g=9.81  $m/s^2$ ),因此在進行振動量測時所使用的感測器,我們稱之為「加速規」。

常用加速規的種類依感應原理分類,有壓電式 (piezoelectric) 加速規、電容式 (capacitive) 加速規兩種,壓電式加速規是以具壓電效應之陶瓷材料所製成,其感測雜訊、有效頻寬、線性度…等特性較佳,適用於精密振動量測,商用壓電加速規之相關製造技術相當成熟,較知名廠商如 PCB、Kistler、Endevco…等,均已規畫相當完整之產品線,例如旋轉機械之可量測範圍大且有效頻寬高之感測器,亦或是監測地表震動或橋梁晃動之低頻寬但高

解析度之加速規<sup>(1)</sup>,後續會針對壓電式加速規之感應原本進行相關介紹;電容式加速規主要材料為矽晶片,透過微機電製程 (micro electro mechanical systems, MEMS),將其蝕刻為閘狀或梳狀結構,以其間隙移動所衍生電容值變化,來做為振動量測感測器,近幾年在物聯網推廣下,市售較易取得便宜加速規,均為電容感測方式,然其大部分振動性能略差於壓電式加速規,因此較適用於準確需求不高之應用上,例如手機翻轉螢幕的重力感測器 (G sensor)、車輛安全氣囊的碰撞感測器…等,市面上壓電加速規廠商會同時提供電容式加速規給使用者,然大部分是向 MEMS 加速規晶片製造商進行採購,例如 ADI、STMicroelectronics、InvenSense…等,再搭建對應之周邊電路進行封裝。

有關加速規相關之學術研究上,近幾年在工業 4.0 與工業物聯網之發展趨勢下,政府鼓勵感測器自主研發,因此由科技部於 2015 年推動物聯網感測器服務平台專案計畫,以及接續之智慧機械與 AQI 氣體感測器服務平台專案計畫管理平台,均以研發各式應用之感測器為主要目標,包含加速規、氣體、力量感測器…等。其中有關加速規開發,是以微機電製程之 MEMS 加速規為大宗,藉由製程技術與周邊電路設計,來提升感測性能,已可將有效頻寬提升至 5000 Hz,高於市售常用 MEMS 加速規之 1600 Hz,共振頻率亦從 4000 Hz 提升至 6000 Hz。

#### 1. 壓電式加速規威應原理

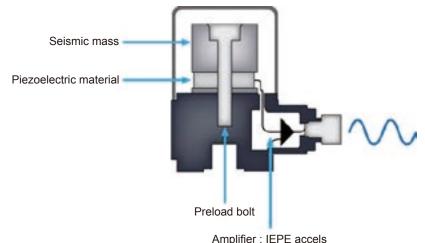
法國物理學家雅克·居禮 (法語: Jacques Curie) 與其弟皮耶·居禮 (法語: Pierre Curie) 在 1880 年發現壓電效應 (piezoelectricity)<sup>(2)</sup>,其產生於某些特殊的壓電材料,例如晶體 (crystals) 或陶瓷 (ceramics),當機械應力施加於這些特殊材料時,會使電荷 (electric charge) 累積在這些固體材料中,白話來說,壓電材料在通電時,會產生振動;反之若在壓電材料施予外力,例如拍擊,則會產生電。由於壓電材料具備轉換機械能與電能的特性,因此常被使用於製作感測器的內部元件,壓電式加速規即為應用此感應原理所設計的感測器。

壓電式加速規主要是透過感測器中的壓電材料承受機械應力時,其所衍生之電荷變化來量化振動大小。當加速規吸附或黏貼於待測物上時,待測物所感受之振動,同時會傳遞至加速規內部的質量塊 (seismic mass),當質量塊因振動所產生之機械能經壓電效應轉換為電能時,即獲得振動與電壓之關係。圖 1 所示為 IEPE (integrated electronic piezoelectric) 型式的加速規,其特色為透過電流激發來替內建的放大器供電,以獲得較穩定且不易受到雜訊干擾的電壓訊號<sup>(3)</sup>。

#### 2. 加速規選用

加速規感測器之種類繁多,主要針對待測物的振動特性,進一步衍生不同規格。然而,並非一味地追求高規格的感測器,就可以取得訊號品質優良的量測數據,如何挑選合適感測器作為量測振動的工具,取決於使用者對於待測物所產生的訊號特性是否有足夠的理解,以及對於量測環境可能造成的影響是否可以有效地進行事先評估。以下將介紹選擇加速規時通常會考量的一些指標(4):

- (1) 靈敏度:加速規感測器可將待測物的加速度大小量化為電壓值,若要將電壓值還原為加速度量值,就必須透過除以靈敏度的方式來做轉換。靈敏度的公制單位通常為 mV/g,意指每單位加速度所對應的毫伏特數值。
- (2) 量測範圍:一般常用加速規的振動量測範圍約為 500 g,而高靈敏加速規的振動量測範圍



need current excitation

圖 1. IEPE 加速規感測原理。

約為 50 g,若以壓電式加速規常見的輸出電壓 5 V 來換算,則靈敏度為 10 mV/g 與 100 mV/g。然而上述關係也可以表示為 0.1 g/mV 與 0.01g/mV,意即一般加速規雖然量測範圍較大,但其對於微小振動 (< 0.1 g) 的感應能力較差;高靈敏加速規雖然量測範圍較小,但卻較能反映微小的振動量。因此量測範圍並非越大越好,還是需要針對其振動特性挑選合適規格,才能獲得準確的量測結果。

- (3) 可用頻率範圍:頻率的單位為赫茲 (Hertz, Hz),我們可以將其理解為待測物每秒振動的次數,即週期 (period)的倒數。理想加速規的靈敏度為在不同頻率皆為定值,然而在實際應用上,各頻率之靈敏度不盡相同,通常我們會採用靈敏度下降 3 dB 或變化 5% 以內的頻率,作為可用頻率範圍。
- (4) 量測方向:加速規以量測方向進行分類,有單軸或三軸加速規兩種,即可量測單一方向或同時可量測三個方向的振動,雖然三軸加速規較能顯示待測物在立體空間中的運動情形,但三軸加速規價格較高,一般會依據是否需要量測三軸向進行數據分析,或單純因成本考量要犧牲部分性能,來進行取捨。
- (5) 感測器質量:量測待測物振動時,加速規會以接觸方式貼附於待測物上,而加速規質量大小,會影響待測物上實際量測的振動量,即加速規在量測時,也會被視為待測物的一部分,倘若感測器與待測物的質量過於接近,勢必會影響到待測物的振動特性,導致不正確的分析結果。一般來說,感測器質量以小於待測物質量 10% 以內較佳。
- (6) 量測環境:加速規常被應用於量測機械作動的振動,然而許多機械之運作環境會處於高溫或充滿油氣的狀態,部分製程甚至會噴灑液體以進行冷卻,因此必須根據量測環境的差異,來選用具有特殊保護功能的加速規,例如抗高溫、防水或防油的工業等級加速規。

#### 3. 加速規件能測試

在確認相關應用領域之加速規需求後,便可從廠商提供規格中進行挑選,一般而言,要確認購買加速規是否適用,除以廠商提供校正資料作為依據外,可搭配振動相關測試儀器,以實驗方式進行確認或驗證:

- (1) 靈敏度校正:將壓電式或電容式加速規放置於加速規校正器上推動,校正器會提供 159.2 Hz,1 g·rms 的準確振動量,可確認待測加速規所量測電壓訊號,是否可對應其出廠靈敏度校正表。因電容式加速規可量測靜止狀態下之直流訊號,即承受重力加速度之 1 g振動量,因此可藉由加速規翻轉 180 度方式,來量測其在 1 g 變化時之電壓訊號,簡易評估其靈敏度大小。
- (2) 非線性度:運用激振器 (shaker) 激發單頻振動,以一般測試規範而言,激發頻率為 100 Hz,力量大小以可量測範圍進行均分,例如加速規之量測範圍為 5 g,則可將測試振動大小以每次遞增 1 g方式,來記錄加速規所量測對應振動量與誤差量,進一步評估其非線性度。
- (3) 有效頻寬:運用激振器激發寬頻訊號 (white noise),將加速規量測振動量以快速傅立業轉換 (Fast Fourier transform, FFT) 進行頻譜計算,且從頻譜觀察能量下降至 3 dB 位置之頻率點,即為有效頻寬。同時,可藉此量測加速規共振頻率,一般為頻譜上極大值之頻率位置。
- (4) 背景雜訊:加速規量測系統架設完成後,量測靜止狀態下之振動訊號,為其雜訊,一般 會以頻譜能量分佈來進行量化,而在進行雜訊分析時,量測系統中的擷取卡 (ADC) 本身 雜訊亦會參與其中,因此要確保擷取卡之雜訊遠低於加速規雜訊,一般會以具備頻譜分 析能力之示波器進行搭配。

#### 二、溫度咸測器

溫度為單位制中 7 個基本單位之一,其與日常生活息息相關,比如冷氣、冰箱、暖爐、飲水機…等電器,均是在進行溫度傳遞或轉換相關之應用,一般在進行溫度量值的評估時,會以攝氏溫度 (Celsius degree, °C)、華氏溫度 (Fahrenheit degree, °F) 或克耳文 (Kelvin, K) 表示,相互轉換公式為: °F = 1.9 °C + 32 ,K = °C + 273.15 。

人可以藉由手接觸物體的方式,來評估待測物的溫度,例如比較體溫高或低,抑或是根據目前人體感受室溫,或是根據以往累積的經驗來猜測目前溫度為幾度。以人接觸的方式來進行溫度量測易帶有主觀感受,若由 10 個人來評估,只能以統計的方式彙整出溫度可能落在哪段範圍,例如中午時間經統計後,約為 26-28 °C 之間,然而沒人可斷定確切溫度為何?因此,要如何精確量測溫度,就得藉由與溫度相關的量值 (例如電壓或電流),以建立關係方程式來間接量測到溫度,而能建構此溫度關係之裝置,就稱之為溫度感測器或溫度量測系統<sup>(5-8)</sup>。

溫度量測可粗略分為接觸式與非接觸式兩種,接觸式感測器可藉由液體熱膨脹、固體熱變形、電阻或電動勢變化來推測當前溫度,民生常用感測器除了水銀與機械簧片溫度計外,電子式溫度感測器則為熱敏電阻,工業上常用溫度感測器為鉑電阻 (Pt)、熱電偶 (thermalcouple),溫度感測器較知名廠商如 Omega、Kimo···等,然所需技術門檻與製造成本較低,國內外有眾多供應商可提供相關產品;非接觸式則是藉由待測物所發出紅外線能量來量測其溫度量值。而為將量測溫度配合自動化或工控系統進行數據紀錄與後續進一步分析,通常會將感測訊號轉換為電壓 (0-10V) 或電流 (4-20 mA) 之類比訊號,再進行數位轉換。

以下會就常用溫度感測器進行概略介紹,包含熱敏電阻、電阻溫度感測器、熱電偶與非接觸式溫度感測器。

#### 1. 熱敏電阻

熱敏電阻 (thermistor) 為一溫度感測元件,如圖 2 所示,其電阻值會隨著溫度變化相關,因此可藉由量測建構簡單電路來量測電阻值,即可運用其相關性或公式獲得對應溫度數值。熱敏電阻之製程方式為在半導體材料混入不同比例之氧化物,且在高溫下燒結而成,一般常用溫度量測範圍介於 –90 °C – 130 °C,但可藉由調整材料成份,使其量測落於 500 °C – 1100 °C 之高溫範圍。



圖 2. 熱敏電阻元件<sup>(9)</sup>。

熱敏電阻種類可粗略以溫度與電阻變化之斜率關係區分,當電阻-溫度關係為負相關時,稱之為 NTC (negative temperature coefficient) 熱敏電阻;反之若為正相關時,則稱為 PTC (positive temperature coefficient) 熱敏電阻,如圖 3 所示。

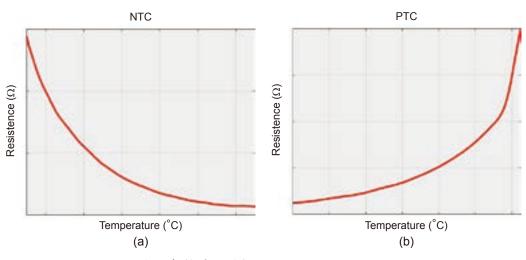


圖 3. 熱敏電阻種類: (a) NTC; (b) PTC。

然而,熱敏電阻的電阻與溫度實際並非呈線性關係,會如圖 4 所示之曲線變化,因此在工業應用上,PTC 熱敏電阻會運用其電阻隨溫度增大之特性作為保護電路之應用,例如自復式保險絲<sup>(11)</sup>;NTC 熱敏電阻相對 PTC 熱敏電阻而言,電阻與溫度較呈線性關係,因此

會作為溫度感測器之應用,雖然仍需以非線性關係公式來進行曲線擬合,但其靈敏度高之特性,非常適合用於溫度劇烈變化之量測應用,例如汽車引擎之進排氣溫度監測<sup>(12)</sup>。

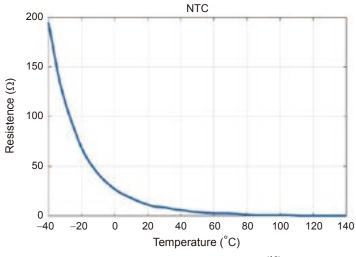


圖 4. NTC 熱敏電阻實際量測曲線(10)。

#### 2. 電阻式溫度感測器

藉由電阻變化方式來量測溫度之感測器,可稱之為電阻式溫度感測器 (resistance temperature detector, RTD)。以熱電阻材料進行區分,有 Pt100、Pt1000、 Cu50 與 Cu100… 等,電阻與溫度會如圖 5 所示,為高度線性關係,其中又以 Pt100 使用最為廣泛。Pt100 為一種以鉑 (Pt) 金屬所製成之電阻式溫度感測器,數字 100 定義為在攝氏 0 °C 時,其所量測電阻值為 100 歐姆  $(\Omega)$ ,量測溫度範圍介於 -200 °C -800 °C 間,其電阻與溫度之關係可表示為  $R=R_0$   $(1+\alpha T)$ ,其中  $R(\Omega)$  為量測溫度 T (°C) 所對應電阻值, $R_0=100$   $\Omega$ ), $\alpha$  則為其

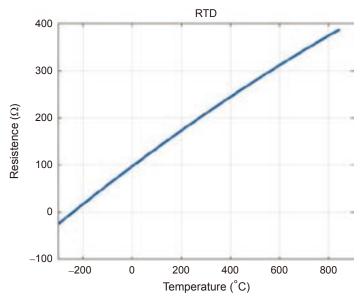


圖 5. RTD 量測曲線。

靈敏度,一般約為 0.004 附近;Cu50 則代表其材料為銅,且在攝氏 0 °C 時,其所量測電阻 值為 50 歐姆  $(\Omega)$ ,而其溫度量測範圍則介於 -50 °C -150 °C 間。圖 6 與表 1 為熱電阻與熱 敏電阻之溫度曲線變化與差異比較,主要可觀察到熱電阻之線性度高,而熱敏電阻的靈敏度 較大,可根據溫度量測的準確度以及反應速度來進行取捨。

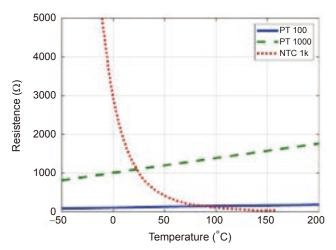


圖 6. 熱敏電阻與熱電阻之溫度曲線比較。

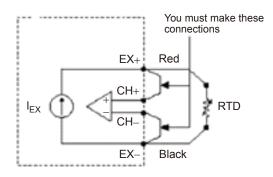
項目/種類	熱敏電阻	熱電阻
成本	低	高
材料	半導體	金屬
量測範圍(常用)	低	高
線性度	低	高
靈敏度	高	低
電路複雜度	低	高

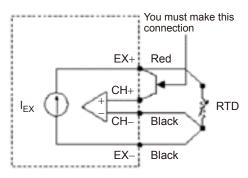
表 1. 熱敏電阻與熱電阻比較。

要運用熱電阻進行溫度量測,由於其電阻隨溫度變化之幅度較小,即靈敏度較低,因此需搭配周邊電路來提升準確性,主要目的為降低線阻所衍生之量測誤差,可分為二線、三線與四線型式<sup>(13, 14)</sup>,如圖 7 所示,一般工業上以三線式最為普遍,圖 8 為運用單晶片,以及搭配適用於熱電阻感應電路之晶片 (Maxim MAX31865) 所建構溫度量測系統<sup>(15)</sup>。

#### 3. 熱電偶

熱電偶為基於熱電效應<sup>(16)</sup> 所衍生之溫度感測器,其溫度量測範圍較廣 (-200 °C-1000 °C for K type),反應速度也較快,因此工業上使用廣泛。熱電偶由兩種不同金屬所構成,如圖 9 所示,兩金屬端點會焊接在一起,成為溫度感測之接觸點,而當此端點存在溫差變化時,在此迴路中會產生電動勢,稱為熱電效應,此現象是由 Seebeck 所發現,又稱席貝克效應 (Seebeck effect),其中溫度較高的一端稱為工作端,另一端則稱為參比端或冷端<sup>(17)</sup>。





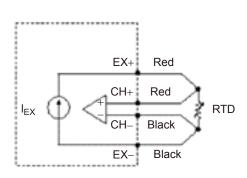
(b)

Two-Wire RTD Configuration

■ = Connection to Terminal Block ■ = Connection to Terminal Block

Three-Wire RTD Configuration

(a)



Four-Wire RTD Configuration

■ = Connection to Terminal Block

(c)

圖 7. 熱電阻感測器接線方式:(a) 二線式;(b) 三線式;(c) 四線式(13)。

熱電偶量測溫度與電動勢之關係,取決於兩種金屬的材料特性,國際標準規範將熱電偶依不同材料之組成,分為  $B \times E \times J \times K \times N \times R \times S$  與 T 八種類別  $(Type)^{(18)}$ ,且稱為標準熱電偶,如表 2 所列。要如何選用熱電偶類別來進行溫度量測,可參考以下建議:

●低溫量測: T type, -250 °C

• 高溫量測: N type, 1200°C

• 高靈敏度: E type, 68 μV/°C

•取得容易: K type, -200 °C-1000 °C

● 溫度校正: S type

如上所述,熱電偶感測端是由兩種不同金屬材料所構成,且藉由電動勢變化進行溫度量測,然而要獲得較精準結果,需要多瞭解冷端對於溫度量測之影響。標準熱電偶實際的溫度量測方式,為量測兩金屬間產生電動勢,透過 NIST ITS-90 熱電偶資料庫所建構電動勢與溫度關係表格,以查表方式得到溫度,然而此數值為假設冷端是處於 °C 環境所量測之結果,僅能代表兩金屬 (工作端、冷端) 間之溫度差異,因此若要正確量測實際溫度,尚需透過另一環境溫度感測器去取得冷端溫度,稱之為冷點補償<sup>(20)</sup>。

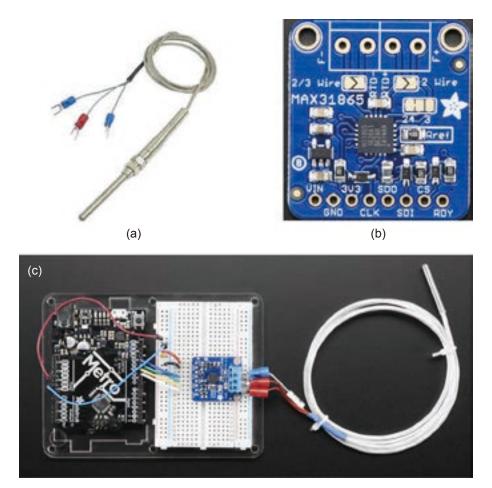


圖 8. 三線式 PT100 溫度量測系統: (a) 感測器; (b) 熱電阻電路; (c) 系統架設<sup>(14)</sup>。

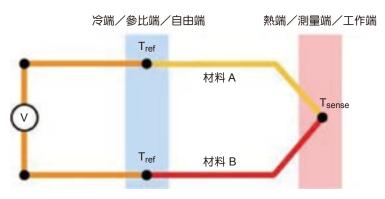


圖 9. 熱電偶感測原理。

相較於電阻式溫度感測器,熱電偶之優勢在於量測溫度範圍廣、靈敏度高、反應速度快,且無須額外提供激發電源,而其弱勢在於量測電動勢小,且容易受走線路徑周圍之電磁雜訊干擾,因此需搭配抑制雜訊與訊號放大之周邊電路,例如高解析度類比數位轉換器 (24 bit ADC)、訊號線遮蔽、50/60Hz 低通濾波器…等。

表 2. 熱電偶類別(19)。

熱電偶溫度計的 類別名稱 (type of thermocouple)	正極導線 (conducting wire of positive electrode)	正極導線 (conducting wire of negative electrode)
В	白金-30% 銠 (Pt-30%Rh)	白金-6% 銠 (Pt-6%Rh)
Е	鎳鉻合金 (Ni-Cr alloy)	鎳銅合金 (Ni-Cu alloy)
J	鐵 (Fe)	鎳銅合金 (Ni-Cu alloy)
K	鎳鉻合金 (Ni-Cr alloy)	鎳鋁合金 (Ni-Al alloy)
N	鎳鉻矽合金 (Ni-Cr-Si alloy)	鎳矽鎂合金 (Ni-Si-Mg alloy)
R	白金-13% 銠 (Pt-30%Rh)	白金 (Pt)
S	白金-10% 銠	白金
T	銅	鎳銅合金

圖 10 為進行熱電偶溫度量測時可搭配之感應晶片,兩款晶片均具備冷點補償功能,其中圖 10(a) 為 Maxim 所生產之 MAX6675 $^{(21)}$ ,可適用熱電偶類別為 K type,屬成本低廉之泛用型晶片;圖 10(b) 則為 MAX31856 $^{(22)}$ ,可適用 K, J, N, R, S, T, E, B 八種標準熱電偶,且解析度較高,但購置成本超過 MAX6675 約 10 倍以上。

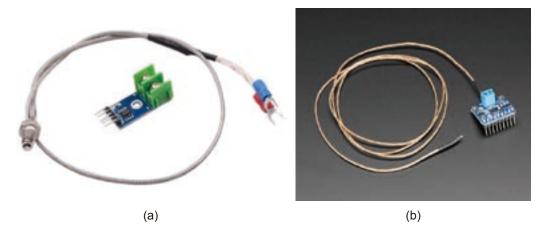


圖 10. 熱電偶溫度感測晶片: (a)MAX6675; (b)MAX31856。

#### 5.非接觸式溫度感測器

熱敏電阻、熱電阻或熱電偶為接觸形式之溫度感測器,必須將感測端貼附於待測物上,才能進行量測,而在遭遇以下情況時,則可考慮運用非接觸式溫度感測器,其優點如下:

- 待測物為移動物件,例如量產輸送帶上的產品;
- •量測點被遮蔽,例如供水、氣體管路;
- •極端環境,例如高電壓、高腐蝕或真空;
- 溫度變化迅速。

非接觸式溫度感測器之感測原理,是偵測物體所散發熱輻射,且藉由收集其中的紅外線能量,再轉換為溫度訊號<sup>(23)</sup>。一般應用可分為單點或範圍檢測,如圖 11(a) 為 FLUKE 561

單點式紅外線量測的溫度感測器;而範圍檢測則為量測一定空間之溫度分佈,又稱為熱顯像儀 (thermal imager),如圖 11(b),其可進一步作為熱源搜尋與溫度熱傳遞之相關分析。值得注意的是,量測溫度所收集的紅外線波長範圍,是屬於不可見光,因此在使用相關儀器時,其所發出的紅色光點,僅是為了方便使用者確認量測位置,溫度感測器本身純粹是接收器,用來吸收待測物本身所散發能量。圖 12 則為市售容易取得之非接觸式溫度感測器,分別為Melexis 的 MLX90614<sup>(26)</sup> 與 Panasonic Electronic Components 的 AMG8833<sup>(27)</sup>。



圖 11. 非接觸式溫度量測儀器:(a) 單點檢測<sup>(24)</sup>;(b) 範圍檢測<sup>(25)</sup>。

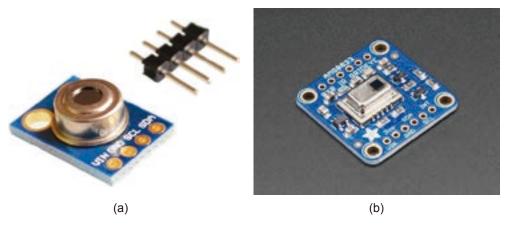


圖 12. 非接觸式溫度感測器:(a) 單點檢測;(b) 範圍檢測<sup>(28)</sup>。

論及紅外線感測器的缺點,由於感測原理為透過光傳遞來進行檢測,其與待測物會有一定距離間隔,因此容易受到環境介質干擾;且量測待測物的表面材質不同,會表現不同反射率,需仰賴修正係數來加以調整,因此整體量測精度比不上熱電偶等接觸式的溫度感測器,然而在一些應用情境下,非接觸式溫度感測器還是具備很大優勢與便利性。

#### 三、咸測器應用於工具機狀態監測

工具機是由多個元件所構成,結構部分有主軸、床身、立柱、工作平台,傳動部分則有進給軸馬達、滾珠導螺桿、線軌…等,且藉由控制器搭配驅動器進行加工操作。工具機台在長時間運作下,可能會由於一些原因,而造成加工精度下降,例如軸承、螺帽…等元件磨損或疲勞,使得工作平台定位精度變差,抑或致冷效果不足導致主軸溫升異常,以及進給軸因熱膨脹而超過預拉範圍,當狀況嚴重至需要強制停機來更換部件,勢必影響機台稼動率。工具機上之傳動元件會隨著操作過程而漸漸磨損,未能適時維護或更換,最終會導致破壞,因此若能透過溫度、振動、扭矩…等物理量的量測,且搭配訊號處理或統計方法,除可即時監測機台運作狀況,例如主軸溫升、馬達負載、軸承振動,同時可藉由建立傳動元件相關動態特徵之資料庫,觀察其歷程變化來進行預知保全之目的。

運用量測與機台狀態相關之物理量,且加以進行分析、診斷之方式,為判斷機械運作狀況為一較客觀之方法,圖 13 為機台狀態監測流程圖,包含感測器訊號蒐集、訊號處理、分析演算法,以及最終於控制器介面上顯示診斷結果。在機械長期運作時,定期量測與機械健康狀況相關之特定物理量,以作為監控目標,當其逾越門檻值時及時發出警訊,並判斷異常原因,再進行下一步之維護或部件更換,可有效維持機械運作狀況。在訊號量測部分,除可從控制器上所獲得資訊,例如進給軸進給速度、主軸轉速、驅動馬達負載…等,若要再從機台外部佈建感測器,以獲取更多與機台狀態相關之物理量,一般則以本文所介紹之加速規與溫度感測器為大宗。

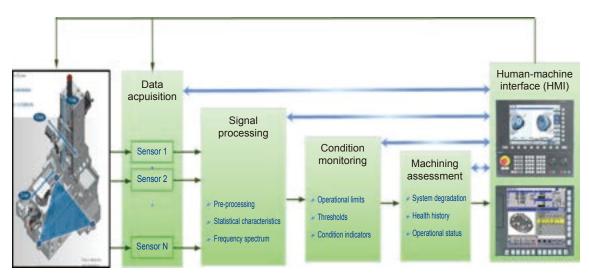


圖 13. 工具機狀態監測流程圖。

德馬吉森精機 (DMG MORI) 近幾年在工具機展上所展示之單機智慧化概念機台,稱之為機械 4.0 (Machine 4.0)<sup>(29)</sup>,如圖 14 所示,以超過 60 個以上之感測器來監測機台運作狀態,包含旋轉台磨潤、切削振動、軸承溫升、進給系統定位量測…等,可謂機台狀態監測的強化版,而在機台上佈建如此多的感測器中,即使量測物理量相同,例如振動、負載…等,也會因應用情境不同,而在感測器規格選用上會有所差異。以溫度感測器來說,會以量測準確性作為優點考量,一般工業應用上會使用熱電偶與 PT100,而比較兩種溫度感測器之特

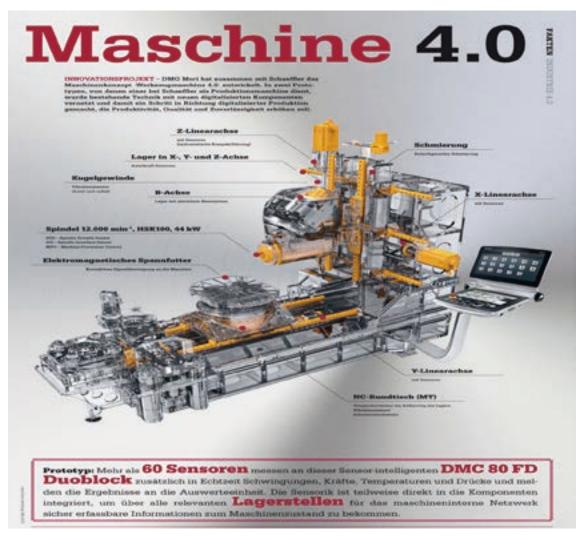


圖 14. DMG MORI 的 Machine 4.0 概念圖。

性,熱電偶對於即時溫度反應優於 PT100,但溫度精確度略差,且較易受現場環境干擾,因此在量測機台鑄件熱溫升變化時會使用 PT100,而若要監測溫度在短時間變化之狀況時,則採用熱電偶,例如進給系統之軸承內、外環。

就振動量測之加速規而言,則需同時考量可量測範圍、有效頻寬與雜訊抑制能力,若應用情境為機台加工之切削監測,會偵測到較大振動量(±20 g),因車、銑床加工之切削特徵頻率會小於 2000 Hz,一般常用壓電加速規即可適用,而在磨床研磨加工應用上,雖主軸轉速遠低於車、銑床,然其磨輪上的磨粒組成會激發高頻率特徵(大於 2000 Hz),因此在感測器選用上,就需將加速規有效頻寬納入評估;另外若應用於軸承健康狀態監測上,其所需加速規之性能更高,除軸承特徵頻率較高(大於 2000 Hz)之外,且軸承運轉之振動微弱,要能及早偵測異常,需要能夠量測到較低振動之感測器,換句話說,加速規須具備良好抗雜訊能力,以獲得量測較小量值之能力。雖然以加速規進行工具機狀態監測,在不同應用情境上所需加速規規格會有所差異,然就市售壓電式加速規而言,在不考慮採購成本、空間限制與環境影響下,例如極高溫、電磁干擾…等,在選用上相對簡易,例如單軸工業加速規 PCB 601A01<sup>(30)</sup>,其可量測範圍 50 g,有效頻寬 ±3 dB) 0.27 至 10000 Hz,可適用溫度範圍則為 -54 °C 至 121 °C…等,性能已能滿足絕大部分需求,因此在選上壓電式加速規時,通常會

Model number 601A01	INDUSTRIAL ICP®	
Performance	English	Si
Sensitivity (±20%)	100 mV/g	10.2 mV/(m/s <sup>2</sup> )
Measurement range	±50 g	±490 m/s <sup>2</sup>
Frequency range (±3 dB)	16 to 600000 cpm	0.27 to 10000 Hz
Resonant frequency	960 kcpm	16 kHz
Broadband resolution (1 to 10000 Hz)	$50~\mu\mathrm{g}$	491 $\mu$ m/s <sup>2</sup>
Non-linearity	±1%	±1%
Transverse sensitivity	≤7%	≤7%
Environmental		
Overload limit (shock)	5000 g pk	49050 m/s <sup>2</sup> pk
Temperature range	−65 to + 250 °F	−54 to + 121 °C
Enclosure rating	IP68	IP68

圖 15. PCB 601A01 加速規規格<sup>(30)</sup>。

在安裝空間大小、固定方式 (螺絲鎖附、磁座吸附、蜜蠟黏貼)、環境 (油氣冷卻、切削液噴 濺) 之評估下決定加速規型號,性能規格上則無需錙銖必較。然而,若因要考量到建置成 本,改選用 MEMS 製程加速規的話,相較於壓電式加速規而言,其先天在有效頻寬較低, 雜訊較高之特性下,於不同應用情境上應用時,則須多有琢磨,不可一體適用。

#### 參考資料

- 1. Please refer to the web site:
  - https://www.pcb.com/resources/product-literature/PCBTestMeasurementSensorsInstrumentationCatalog.
- 2. A. Manbachi and R. S. Cobbold., Ultrasound, 19 (4), 187 (2011).
- 3. National instruments,「加速規 (Accelerometer) 量測振動原理」, Please refer to the web site: http://www.ni.com/zh-tw/innovations/white-papers/06/measuring-vibration-with-accelerometers.html
- 4. 譜威電子報,「專題: 如何挑選合適的加速規」, Please refer to the web site: http://www.prowavegroup.com/edm\_43.html
- 5. 楊武智, 感測器與數位信號處理, 新北市: 全華圖書公司,(1999).
- 6. 曹永偉, 感測器技術入門, 新北市: 全華圖書公司, (2001).
- 7. 趙中興, 感測器與量測技術, 新北市: 全華圖書公司, (2002).
- 8. National instruments,「溫度感測器概述:量測原理、種類與規格、特性概述」, Please refer to the web site: http://www.ni.com/zh-tw/innovations/white-papers/06/overview-of-temperature-sensors.html
- 9. 新杭實業股份有限公司, NTC 熱敏電阻器是如何工作的 (工作原理), Please refer to the web site: http://www.shin-hang.com.tw/index.php?do=product&id=64
- 10. ResearchMFG,「使用負溫度係數電阻 NTC 來設計溫度量測線路」, Please refer to the web site: https://www.researchmfg.com/2017/05/ntc-circuit/
- 11. 電子產品世界,「NTC 熱敏電阻和 PTC 熱敏電阻」, Please refer to the web site: https://kknews.cc/tech/yajqen.html
- 12. 潮流汽車團,「在汽車上,NTC 用來做冷卻水溫度傳感器、進氣溫度傳感器」, Please refer to the web site: https://kknews.cc/zh-tw/news/a4mjvy6.html
- 13. Omega Engineering Inc, "What is the Difference Between a 2, 3, and 4 Wire RTD?", Please refer to the web site: https://www.omega.com/en-us/resources/rtd-2-3-4-wire-connections
- 14. National Instruments Corporation, "Connecting 2, 3, and 4 Wire RTDs to My Data Acquisition Card", Please refer to the web site: https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA00Z0000019LyiSAE&l=zh-TW
- 15. Lady ada, "Adafruit MAX31865 RTD PT100 or PT1000 Amplifier", Please refer to the web site: https://learn.adafruit.com/adafruit-max31865-rtd-pt100-amplifier/
- 16. Wikipedia, "Thermoelectric effect", Please refer to the web site: https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric effect

- 17. Gordon Lee,「熱電偶的基本原理與設計要點」, Please refer to the web site: https://www.eettaiwan.com/news/article/20161222TA31-Thermocouples-Basic-principles-and-design-essentials
- 18. Wikipedia, "Thermocouple", Please refer to the web site: https://en.wikipedia.org/wiki/Thermocouple
- 19. 戴明鳳、董俊良,「熱電偶式與熱敏式電子溫度器」, Please refer to the web site: www.phys.nthu.edu.tw/~gplab/file/thermocouple.pdf
- 20. Michelle Youn,「熱電偶應用中冷結點補償的實現」, Please refer to the web site: https://archive.eettaiwan.com/www.eettaiwan.com/ART\_8800402899\_617739\_TA\_3d99d5d9.HTM
- 21. Maxim Integrated, "MAX6675 datasheet", Please refer to the web site: https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX6675.pdf
- 22. Maxim Integrated, "MAX31856 datasheet.", Please refer to the web site: https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX31856.pdf
- 23. 熱映光電股份有限公司,「紅外線溫度儀量測原理」, Please refer to the web site: http://www.radiantek.com.tw/products/tn-infrared-c.htm
- 24. FLUKE, "56x infrared thermometers users manual", Please refer to the web site: https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/56x\_\_\_\_umeng0000.pdf
- 25. 百利世貿易有限公司,「PTI-RH1-01紅外線熱顯像儀」, Please refer to the web site: http://www.panrico.com.tw/cht/product.php?mode=show&pid=971
- 26. Melexis, "MLX90614 family datasheet single and dual zone infra red thermometer in TO-39", Please refer to the web site: https://www.melexis.com/-/media/files/documents/datasheets/mlx90614-datasheet-melexis.pdf
- Panasonic, "Infrared Array Sensor Grid-EYE (AMG88)", Please refer to the web site: https://industrial.panasonic.com/cdbs/www-data/pdf/ADI8000/ADI8000C66.pdf
   Deep Miller, "Adefruit AMG8833 8v8 Thermal Comerc Sensor", Please refer to the web.
- 28. Dean Miller, "Adafruit AMG8833 8x8 Thermal Camera Sensor", Please refer to the web site: https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-amg8833-8x8-thermal-camera-sensor.pdf
- 29. DMG MORI, "Machine Tool 4.0 as a milestone on the road to digital transformation", Please refer to the web site: https://us.dmgmori.com/news-and-media/technical-press-news/news/emo2015-machine-tool-4-0-
- 30. Please refer to the web site: https://www.pcb.com/products?m=601A01

#### 作者簡介

鄭志鈞先生為北卡羅萊納州立大學機械工程博士,現為國立中正大學機械工程學系教授。

Chih-Chun Cheng received his Ph.D. in Mechanical Engineering from North Carolina State University. He is currently a professor in Department of Mechanical Engineering at National Chung Cheng University.

程文男先生為國立中正大學機械工程博士,現為國立中正大學前瞻製造頂尖研究中心助理研究 員。

Wen-Nan Cheng received his Ph.D. in Mechanical Engineering from National Chung Cheng University. He is currently an associate researcher in Advanced Institute for Manufacturing with High-tech Innovations at National Chung Cheng University.

邱昱阩先生現為國立中正大學機械工程所博士生。

Yu-Sheng Chiu is currently a Ph.D. student in Department of Mechanical Engineering at National Chung Cheng University.

陳韋任先生為國立中正大學機械工程碩士,現為國立中正大學先進工具機中心專案助理。

Wei-Jen Cheng received his M.S. in Mechanical Engineering from National Chung Cheng University. He is currently a project assistant in Advanced Machine Tools Research Center at National Chung Cheng University.

# 工業 4.0 與智慧製造的關鍵技術:工業物聯網與人工智慧

# The Critical Technologies of Industry 4.0 and Smart Manufacturing: Industrial Internet of Things and Artificial Intelligence

洪哲倫、張志宏、林宛儒 Che-Lun Hung, Chih-Hung Chang, Wan-Ju Lin

工業 4.0 以及智慧製造已經是現代製造產業鏈的發展趨勢,然而這其中有兩個不可以或缺的技術-工業物聯網與大數據分析。經由工業物聯網技術收集在生產環境以及生產機具上各式感測器大量數據,透過人工智慧技術進行大數據分析,貼近生產環境以及生產機具的狀態,藉此可以提高生產效能、降低成本、以及提供更為安全的生產環境。工業物聯網結合人工智慧後所帶來的效益,將造成爆發性的成長。

Industry 4.0 and smart manufacturing have been the trend in development of contemporary industry chain. Two important technologies, Industrial Internet of Thing (IIOT) and Artificial Intelligence (AI), play as key roles in this trend. IIOT collects huge amount of data from a variety of sensors equipped in manufacturing environment and tools. AI is used to analyze these data to understand the status of manufacturing environment and tools to improve the production efficiency, reduce the production costs, and enhance manufacturing safety. Benefits of integrating IIOT and AI will increase dramatically.

工業 4.0 一詞亦稱為智慧製造,在 2011 年的漢諾威工業博覽會被提出後,對於全球的加工機具與製造業者產生莫大的影響,推動整個產業往智慧製造方向前進。工業 4.0 被視為第四次工業革命,第一次工業革命人類擺脫了人力與獸力的限制,採用水力及蒸汽作為生產製造與運輸的動力,而第二次工業革命因電力系統的發展,利用電力取代了水力與蒸氣成為生產動力來源,並且邁入利用機器進行生產製造的階段。第三次工業革命則是開始進入生產自動化與精準化時代,採用電子裝置及資訊技術來提高產能。在這個階段已經有資料蒐集與監控系統 (supervisory control and data acquisition, SCADA),負責蒐集各式感測器資料或是生產現場資料與監控現場生產狀況。在生產線或廠區中,SCADA 主要的工作是監控,所蒐集到的現場資料,都會傳遞到 SCADA 系統上。SCADA 可以依據以往的歷史紀錄,訂定正常

環境下的生產條件。因此當生產條件有所變動時,SCADA 會發出相關的警報訊息,而警報可以透過簡訊、通訊軟體及電子郵件方式通知管理者進行相對處理,並且記錄在記錄檔中。現階段的生產環境架構,其底層資料都是經由 SCADA 往上層傳遞,但是這樣的階層式架構,往往上傳的資料通常會比實際數據量少很多,對於後續要進行大數據分析或是人工智慧計算來說,資訊數量是嚴重不足的。因此工業 4.0 的革命則是串連物聯網 (internet of thing, IoT)、機聯網、雲端運算、大數據分析與人工智慧等技術達到高度自動化,能夠使生產環境具備自我感知、自我學習、自我決策、自我執行以及自我適應的能力。自我感知是蒐集自身機具以及環境的資訊,自我學習在製造過程中蒐集的資訊理解與分析,自我決策能夠規劃自身行為與故障診斷。自我執行能夠自行執行所規劃的行為,並能對執行故障排除與維護。自我適應則是能夠依據生產需求,自行整合生產環境中的元件組成最佳生產系統結構。智慧製造結構如圖 1 所示。

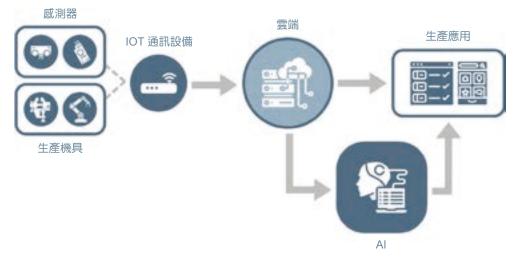


圖 1. 智慧製造架構。

然而影響智慧製造快速發展的主要原因大致有以下幾種:一為減少人為因素影響生產品質,如不專心、缺乏警覺心、疲勞、壓力大、工作超負荷等都是影響因素。其次是目前台灣面臨嚴重的少子化與人口日漸老化的社會問題,年輕人投入生產端工作的意願不高,使得生產工廠人手短缺,必須使用機器來取代人力,且面臨更短的產品生命週期與交貨時程,也必須提升生產效率。而市場趨勢有少量多樣化需求以及成本與價格的考量。

在工業 4.0 之前,製造業已經發展了成熟的製造執行系統 (manufacturing execution system, MES),利用物聯網技術可以在生產期間安排、管理和跟踪每個步驟的操作,提供管理基礎。然而相較於一般物聯網,工業生產的物聯網更著重於工業應用的擴展和使用。在工業 4.0 的影響,全球工業物聯網的發展在經過一段摸索期之後,其成果已逐漸顯現。工業物聯網更專注於機器對機器通訊、蒐集生產過程的大數據以及最後透過機器學習技術分析,期 室讓生產運作有更高的效率和可靠性。

根據通用電氣 (GE) 對工業物聯網所提出的定義,工業物聯網就是透過感測網、網際網路、巨量資料收集及分析等技術整合,進而有效提高現有產業的生產效率並創造新商機。由

於智慧製造的目標是建構出一個具有自我感知意識的生產環境,因此工業物聯網是網路實體系統和生產流程整合中不可或缺的部分。物聯網能夠即時收集自各式感應器和生產機具所產生的數據,經過人工智慧分析可以協助工業生產設備和基礎設施進行決策,預測即時精準生產或調度現有資源提升效率,並且可以減少多餘成本提升利潤,可以進一步地改善並自動化先前工業革命無法處理的任務。

在工業物聯網所架構的環境中,透過機器至機器 (machine to machine, M2M) 的通訊,機器可以與其他機器、物件和基礎設施等進行互動和通訊,結果將產生龐大數據,如何將這些數據經過處理和分析後運用於工廠管理和控制的最佳化,進一步解決全球製造業面臨升級的問題,是工業4.0以及智慧製造成敗的核心關鍵。工業物聯網架構如圖2所示。

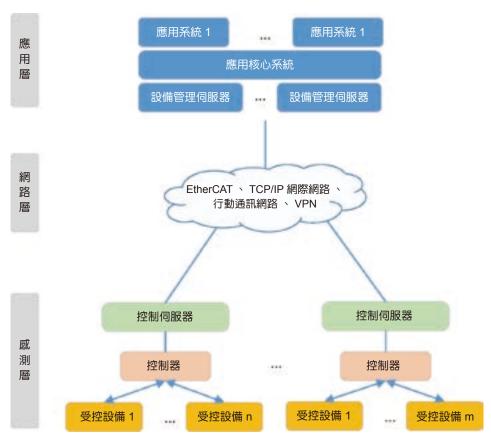


圖 2. 工業物聯網架構。

工業機械因為作業環境關係,經常會受到的衝擊振動,加上零件和材質老化、損耗,影響機械的精確度,進而造成故障或產品精確度誤差。以往僅在個別機械或工具機上安裝資料 擷取模組來蒐集上述檢測計所檢測出來的數值,一旦機械發生問題時,作業員需以掌上型的振動檢測器到現場,針對可能的問題逐一進行診斷,相當費時費力,發現並矯正問題的時間也往往不夠即時。透過工業物聯網,便可以快速的將現場監測資料即時傳送到伺服器,讓管理人員得以透過遠端的電腦系統,監控機械運行的健康狀況,大幅提升機械故障預測及診斷的精確度與效率,並提升經濟效益。

物聯網顧名思義是個物物相連的網際網路,透過各種無線和有線通訊網路可以將感測器或設備數據傳送到各個地點甚至跨越國際,亦可讓設備之間互相通訊。然而能夠達到這個目的,最為重要的是物聯網的通訊環境與通訊協定標準。目前常見的物聯網通訊環境有乙太網路 (ethernet)、Wi-Fi、3G、4G、Bluetooth、ZigBee、RFID、NFC等。過去長久以來工業乙太網路使用的通訊協定,大致上取決於傳統控制系統的大廠,如三菱電機 (Mitsubishi) 採用 CC-Link IE、洛克威爾自動化 (Rockwell Automation) 採用 EtherNet/IP、西門子 (Siemens) 採用 Profinet 等。但是近些年來,工業界已經越來越多廠商開始支援開放工業通訊標準,打破由傳統大廠壟斷把持的市場。開放式工業通訊標準能夠更容易讓各種控制器、感測器及其他裝置具備聯網通訊能力。目前已經發展成熟的開放工業通訊協定標準的有,CoAP (constrained application protocol)、MQTT (message queuing telemetry transport)、DDS (data distribution service for real-time systems)、以及 OPC UA (open platform communications unified architecture)、AMQP (advanced message queuing protocol)等。這些通訊都有各自合適的應用情境,如 AMQP 適用於乙太網路,CoAP 協定則適用於資源受限設備,MQTT 和 DDS 的兼容性相對於其他協定較高。

CoAP 為一 6LoWPAN 無線感測網路的應用層協定,具備較小的封包標頭,並建立在 UDP 協定之上,因此適合於感測節點進行網路傳輸。CoAP 協定支持非同步通訊,感測節點 可以具備休眠/喚醒機制,只有需要工作時才喚醒以節省能源消耗。

MQTT 是專為受限於設備和低頻寬、高延遲或不可靠的網絡而設計的輕量級通訊協定。其設計目的適用於處理器資源需求低及網路頻寬有限的物聯網裝置,並確保傳輸過程具有一定程度可靠性。也由於 MQTT 的低頻寬與耗電量小特性,因此成為連接設備,如機器對機器或物聯網應用中非常重要的理想選擇。AMQP 是一個主要用於生產管理系統,如產品生命周期管理 (product lifecycle management, PLM),企業資源計劃 (enterprise resource planning, ERP),製造執行系統等,相互交換資料的開放網路通訊協定。DDS 為適用於即時系統的資料分佈服務,適用於分散式的環境。DDS 支援裝置之間的資料分發和裝置控制,以及裝置和雲端環境的資料傳輸。由於 DDS 資料分發的即時效率非常高,因此能夠在數秒內同時分發超過百萬條訊息到分散的多個裝置上。目前 DDS 已經廣泛應用於國防軍事、民航、工業控制等領域。

這些通訊協定定義了裝置/設備的資料傳輸格式與運作方式,但是需要一個能夠整合各個不同裝置與通訊協定下,能夠互相通訊與控制的標準。因此 OPC 基金會提倡其所提出的 OPC 統一架構 (OPC unified architecture, OPC UA) 通訊標準,用以規範資料交換的安全性、可信賴的多廠品牌機器設備、跨多種平台與感測器等相關通訊標準。由於 OPC UA 的彈性非常高,它能夠搭配各種傳輸協定以符合生產現場應用。如在子網路與區域網路環境中,OPC UA 傳輸層偏好搭配 UDP (user datagram protocol)。在雲端環境或廣域網路,則搭配 AMQP 或 MQTT 可以達到最佳效果。透過 OPC UA 可以整合現場端數據到雲端環境中。

除此之外,另一個重要的開放式架構是乙太網控制自動化技術 (EtherCAT)。EtherCAT 是一個以工業乙太網路為基礎的高性能且低成本的現場總線系統,目的是透過乙太網路可以實作出高效致動器技術或感測器的控制系統。目前 EtherCAT 已經被應用在包裝機、射出成形機、快速壓床、電腦數值控制 (CNC) 加工中心機、機器人和液壓調節等控制系統中。由於 EtherCAT 可以提供機械生產設備與現場管理系統穩定且即時的通訊效率,在工業 4.0 中已經逐步取代了傳統自動化控制現場匯流排系統。

然而工業物聯網的普及也讓各式工業物連網感測器與設備成為駭客攻擊目標,由於製造業儀器設備環境很少現代化、具備獨特的生產網路以及鮮少更新且缺乏防護能力的通訊協定,加上工廠採用越來越多的 IIoT (industrial internet of things) 設備和系統,增加了工業控制系統與工業基礎架構駭客入侵關鍵流程的威脅。例如 2018 年 8 月 3 日台積電全臺產線大當機事件,便是一個明顯的例子。

隨著物聯網的廣泛應用,這些威脅現在已經升高到另一個新的層次。原本純粹虛擬世界的威脅,現在很可能對真實世界造成影響,尤其是資訊技術與營運技術逐漸匯聚的工業物聯網領域。結合了實體與虛擬系統的智慧工廠,雖然帶來了互通性與即時互動的可能性,但也意味著讓歹徒的攻擊面更加寬廣。

由於智慧工廠讓歹徒的攻擊面因而擴大,因此,如何偵測及防範網路攻擊,將是製造業的一大挑戰。讓 IT 和 OT 部門分享彼此的知識和經驗,並且提升全企業員工的資安意識,皆有助於應付來自網路的攻擊。

因消費端在市場不斷快速推陳出新之需求下,以致生產端面臨產品生命週期短、高精度的要求、少量多樣之高客製化、缺乏人力資源等挑戰。為了因應複雜的市場需求,促使製造業者需要具有能夠適應多元及多變之環境能力,因此製造系統相較於過去更為複雜化。隨著新技術不斷的進步,現今製造業可藉由物聯網、人工智慧演算法、先進的感測技術、大數據分析等技術,將系統可控性及資料可視化,促使製造產業進一步邁入工業 4.0 智慧製造之發展。人工智慧技術之所以成為智慧製造的核心技術在於可以從大量原始數據中,自動提取關鍵特徵及製造業中規律性的模式,進而學習過往曾經發生過的錯誤,以提前作預測及預警,藉此不僅可降低停機時間、提升製程效率,也可適時的根據產線作調整。人工智慧是指人類製造出來的機器所表現出來的智慧,其討論研究範圍廣,包含:自然語言處理、規劃與學習及推理和解決問題等。人工智慧依照機器 (電腦) 能夠處理與判斷的能力可區分以下等級:

- 第一級人工智慧:自動控制可透過各種感測器經由控制程式自動作出相對應反應,但機器(電腦)只能依據考慮過的情境作出相對反應。
- 2. 第二級人工智慧:探索推論、運用知識透過演算法將輸入及輸出產生各種排列組合,屬於基本典型的人工智慧。
- 3. 第三級人工智慧:機器學習可透過學習如何將輸入輸出產生關聯性,根據過往經驗進行推 論結果。
- 4. 第四級人工智慧:深度學習由機器學習發展出來,已可自行依據過往經驗學習及推論,相對於機器學習不同地方為,深度學習處理資料的特徵時,機器(電腦)可自行不斷學習。

人工智慧種類又分為監督式學習 (supervised learning)、非監督式學習 (un-supervised learning)、半監督式學習 (semi-supervised learning) 及增強式學習 (reinforcement learning),以下列點說明各種類代表意義:

- 1. 監督式學習 (supervised learning):所有資料皆有標準答案,模型便可學習資料集的特徵作 為預測及分類依據,而模型輸出結果可透過標準答案算出誤差值。
- 2. 非監督式學習 (un-supervised learning): 所有資料沒有標準答案,機器 (電腦) 必須自行尋找答案,此種方法不必人工分類,對於人類較為簡單,但對於預測結果較為不準。
- 3. 半監督式學習 (semi-supervised learning): 少部分有標準答案,大部分資料沒有標準答案, 等於結合監督式與非監督式的優點,此種方法只需少量人工分類,又可讓預測較為準確。

4. 增強式學習 (reinforcement learning):機器自己嘗試錯誤並尋找最佳解,遇到必須連續作決策時,需進一步修正答案與決策。常見的應用如自駕車、AlphaGo 圍棋競賽。

而在人工智慧學習與推論流程階段分為獲取數據、數據前處理、建立模型及預測未來 (分類或數值預測):

- 1. 獲取數據:透過溫度、濕度、camera 等感測器大量收集所需的資料。
- 2. 數據前處理: 數據的好壞會影響模型學習的效果,若學習到具有雜訊數據勢必會影響預測結果,因此需先對數據進行前處理,將所收集到數據處理為乾淨的數據。
- 3. 建立模型:人工智慧模型是由神經元 (neural) 所組成的,模仿生物神經網路結構和功能產生數學模型,用於函式進行評估與運算。模型結構可分為輸入層 (input layer)、隱藏層 (hidden layer) 及輸出層 (output layer),層與層之間每個神經元互相連接,並透過權重 (weight) 決定神經元之間聯繫的重要程度,而神經的運算則透過激勵函數 (active function),其目的引入非線性函數,避免輸入與輸出脫離不了線性關係。
- 4. 預測:透過模型不斷特徵擷取之後,可將未曾看過的資料進行數值預測或是分類,通常 預測階段相較訓練階段快很多。

基於虛實整合的基礎,智慧製造之應用層面相當廣泛多元。舉凡大規模的智慧工廠、智慧生產至機械手臂、自動物流車、智慧倉儲等皆為智能技術之應用案例。Osaro 舊金山創企專門開發人工智慧機器人之解決方案,以專有軟體使工業機器人能在各式環境中執行各種任務。Osaro 透過強化學習以訓練機器學習演算法,將混亂的產品、不正確的擺放位置及變動性高的燈光照明,有效的進行識別、分類及組裝產品。此外,Osaro 可將配送中心的分揀站自動化,其不僅可部署至未開發的環境中,也可改造工業自動化之轉型。現行工具機產業也積極導入 AI 技術。刀具在工具機產業中屬於生產消耗品,為了確保加工產品的品質,必須在刀具磨損前更換新的刀具,過去業者通常藉由具有豐富經驗的師傅以判別刀具更換的時間點。然而以現況而言,每一次刀具更換的時間點並非符合最佳的經濟效益,若要更換刀具需要先停機並將刀具取出作進一步的檢查,而停機檢查引起產線停擺降低生產量,進而造成重大損失。導入 AI 技術的優勢在於可達到預防性及預測性的維護。凱柏精密機械與施耐德電機公司 (Schneider Electric) 將機器學習技術應用於預測刀具磨耗,其系統將巨量資料做分析並學習此資料特性,以修正預測維護刀具之時機點,進而提升產品良率及效能。全球最大夾爪製造德商雄克 (SCHUNK) 在刀具上嵌入感測器,並在加工過程中即時記錄及控制加工參數,以監控刀具壽命,進而延長刀具壽命及掌握刀具加工狀態,以降低加工成本。

近年來工業物聯網技術的發展迅速,透過工業物聯網收集與分析生產環境相關數據,進而依據數據分析後的結果改善生產線運作方式。如透過收集在生產設備上所安裝之感測器的數據,可得知機器即時運轉狀況,便可以監測或預測機器何時需要保養,避免損壞導致停工造成的損失。其中通訊技術是工業物聯網非常重要的一環,目前許多廠商與組織大力推展工業物聯網相關通訊標準規範,以期能夠有容易建置、成本低以及可以通用的技術,將生產器具以及新舊機台可以整合且互相通訊。這目前最為重要的課題。然而工業物聯網所收集的數據,必須透過分析才能變成有用的生產知識。因此人工智慧在工業物聯網應用方面扮演著舉足輕重的重要角色,也是未來智慧製造應用的必要元素。隨著人工智慧技術越來越成熟,工業物聯網結合人工智慧後所帶來的效益,將造成爆發性的成長。無論是工業 4.0 或是智慧製造,都強調人工智慧與物聯網為主體的人機協作場域與智慧生產模式。德、美、日、韓等國都積極地提出相關因應策略,全力打造智慧化生產環境,以提升在新工業革命競賽的競爭

力。台灣製造產業在這方面的起步較晚,因此在許多關鍵技術上與這些國家有所落差。串連 人工智慧與物聯網的虛實整合已經是智慧製造的根基,積極投入這些技術的研發才能在智慧 製造與工業 4.0 的國際舞台上有一席之地。

#### 作者簡介

洪哲倫先生為國立清華大學資訊工程博士,現為長庚大學資訊工程學系教授。

Che-Lun Hung received his Ph.D. in Computer Science from National Tsing Hua University. He is currently a professor in Department of Computer Science and Information Engineering at Chang Gung University.

張志宏先生為逢甲大學資訊工程博士,現為靜宜大學資訊傳播工程學系副教授。

Chih-Hung Chang received his Ph.D. in Computer Science and Information Engineering from Feng Chia University. He is currently an associate professor in Department of Computer Science and Communication Engineering at Providence University.

林宛儒小姐現為國立台灣大學機械工程所博士生。

Wan-Ju Lin is currently a Ph.D. student in Department of Mechanical Engineering at National Taiwan University.

### 機械工廠內之異質機臺連網整合 與應用

## Integration of Heterogeneous Machines and Its Applications in a Machining Factory

李維楨、鍾俊輝、劉孟昆、郭重顯、項天瑞、楊朝龍、羅乃維 Wei-chen Lee, Chunhui Chung, Meng-Kun Liu, Chung-Hsien Kuo, Tien-Ruey Hsiang, Chao-Lung Yang, Nai-Wei Lo

在工業 4.0 的推動下,智慧製造及智慧工廠的概念遍植於臺灣的工業界。大家期待智慧工廠對環境的改變能夠自動回應,並收集工廠中生成的大量資訊以進行資料分析。為了實現這一點,如何在工廠內連接各式機臺是當務之急。在本研究中,我們使用了各種通訊的方法來連接各式機臺,並在生產過程中監控機臺,以收集機臺資訊,並將其上傳到雲端伺服器。在應用的部份,本研究中將機臺進行線上量測所取得的量測資料用來進行誤差補償,可降低標準差達 30%以上。

With the advocate of Industry 4.0, the wave of smart manufacturing and the smart factory has swept through the industry in Taiwan. It is expected that the smart factories can automatically respond to the change of the environment, and collect massive information generated in the factories for data analytics. To achieve this, how to connect various machines in a machine shop is a top priority. In this research, we used various communication methods to connect the machines on the shop floor, monitored them during the production process, collected their information, and then uploaded to the cloud server. Regarding the application of the data collected, we used the online measurement data for error compensation. The experimental results showed that the proposed method reduced the standard deviation by at least 30%.

#### 一、前言

本研究將工業 4.0 之重要元素導入臺科大機械系實習工廠,以提供研究與教學所需。本研究主要實現了異質機臺 (即工廠內不同廠牌或不同年代的機臺) 連網並建構可應用之網實整合系統,亦藉此完成 AR 協作、生產管理、刀具管理與預防性維護等應用,研究架構如圖 1 所示。我們首先整合了新舊機臺,並建構完備的 IoT 系統架構,將資訊透過各種通訊標準傳至 SCADA 伺服器上的資料庫,再上傳至雲端伺服器所建構的資料庫。實際生產過程中,將透過本研究所開發之製造執行系統 (manufacturing execution system, MES) 作為流程控制中

心,並下接 SCADA 伺服器進行現場資訊之監視與控制。現場人員可透過擴增實境技術從資料庫中取出資訊並即時顯示於手機或智慧眼鏡中輔助操作。



圖 1. 異質機臺網實系統架構。

#### 二、IoT系統架構

目前主流的加工機臺通訊協定包含 OPC UA、MTConnect 與 Modbus 等,而部分機臺則僅支援其所開放之軟體開發套件 (software development kit, SDK) 進行通訊。為進行異質機臺之 IoT 系統建構,必須先了解各家廠商設備所適合之通訊協定,進一步採用針對其所開發之Adapter 進行連網。本研究已建構了一個異質機臺連網之 IoT 系統架構,所支援之通訊協定與其示範設備如表 1 所示。連網的設備包含 HEIDENHAIN 控制器、FANUC 控制器、寶元控制器、SIEMENS 控制器、新代控制器、OMAX 水刀切割機、三菱可程式控制器以及台達可程式控制器。不可直接連線之傳統機臺則可以透過 PLC 作為媒介,以將傳統機臺上外加的感測器資訊送至 SCADA 伺服器。本研究採用研華科技的 WebAccess 做為 SCADA 伺服器之監控軟體,以進行各種設備資訊接收與監控中心,並實現各種設備的資訊可視化。此架構之優勢在於可擴展性,僅需增加 PLC 設備之類比與數位輸入模組,即可擴增現場之感測器數目。此外,可透過 PLC 於 Edge 端進行邊緣計算,減少 SCADA 不必要的數據接收,亦可經由 SCADA 中心遠端控制現場,達到網實整合系統資訊監視與控制之目的。

#### 三、製造執行系統

完整建構 IoT 之系統後,系統 SCADA Server 即可監控現場之製造資訊,然而還需要一個管控生產流程之製造執行系統,才能促使生產過程之有效管理。本研究所開發之製造執行系統分為兩個部分,人機介面以及後端製造執行系統。人機介面採用網頁方式呈現,使用 Laravel 框架建立。後端製造執行系統使用 Python 做為程式語言。兩者透過 TCP/IP 中的

表 1. 本研究已連線之設備與其連線方式。

Controllers/Machine	Communication
HEIDENHAIN	RemoTool SDK
FANUC	FANUC FOCAS
SIEMENS	OPC UA
LNC	Modbus
SYNTEC	OPC UA
DynaPath	MTConnect
OMAX Waterjet	MTConnect
SIEMENS PLC	Modbus
MITSUBISHI PLC	Modbus
DELTA PLC	Modbus
FATEK PLC	Modbus

HTTP 協定來溝通,並以 SQL server 作為儲存資料的工具。後端製造執行方面則使用 socket 和 Modbus 來與安裝 NX CAM 軟體以生成加工路徑的電腦以及工廠的倉儲系統和 AGV 溝通。在 NX CAM 方面是使用 socket 搭配 JSON 格式與其溝通,socket 的優點在於簡單以及快速,且容易嵌入其他應用程式中。在倉儲以及 AGV 方面則採用 Modbus 來做為溝通的格式,會採用 Modbus 是因為倉儲及 AGV 皆是由 PLC 做為控制單元,而 Modbus 在 PLC 上的應用成熟且穩定。整體架構設計透過將不同工站切割為互不干擾之小區塊,並由同一系統做觸發的判斷,來簡化發生錯誤修正的複雜度以及增加修改的彈性。透過此製造執行系統可以執行現場之自動化流程,並與系統之 SCADA server 連線溝通,透過 SCADA 取得現場之製造資訊,以執行接下來的製造流程。若需與現場配合,則可透過下指令的方式給 SCADA,由前述所建構之 IoT 系統與現場邊緣端之控制器進行溝通,藉此即時監控現場之生產流程。舉例來說,本系統可與現場之 AGV 與倉儲系統溝通,確認前站生產流程完成後,即可透過 IoT 系統通知 AGV 由第一個倉儲取料,並運送至第二個倉儲進行下一個生產流程。

#### 四、IoT系統架構實務應用與後台分析

本研究之資料流架構如圖 2 所示,我們收集的資料來源分別為機臺控制器、可程式化邏輯控制器 (PLC) 以及音訊擷取設備,加工資料經由 PLC 以及研華科技所開發的 WebAccess/SCADA (supervisory control and data acquisition) 軟體架構存放於 SCADA 伺服器,並定期備份至後端伺服器儲存,儲存前將資料篩選,過濾出較具參考價值或分析價值之資料,再存入MS SQL 伺服器。此外,考慮未來工廠規模的擴展,將可能產生非結構化之資料,因此我們將切削音訊透過 LabVIEW 儲存至 MongoDB 伺服器 (資料量大時),以因應未來資料儲存可能會面臨的挑戰。隨著未來工廠的規模日漸擴大,資料量亦有增無減,為了滿足未來資料分析所需的運算能力,本研究設計出兩種資料分析的方式,分別為單台伺服器分析運算與分散式分析運算平台。當資料量較大時即採用分散式分析運算平台,透過 Hadoop 平台可將數台電腦整合,並採用分散式檔案系統 (hadoop distributed file system, HDFS) 來儲存資料。此外,還使用 MapReduce 平行運算架構,該架構類似於演算法中的個別擊破 (divide and

conquer),也就是將問題分成各個小部分之後再作整合。反之,若資料量較小,則使用單台 伺服器分析運算即可滿足其運算需求。最後,分析運算的結果將會透過資料視覺化呈現至資 料分析暨資源整合平台。

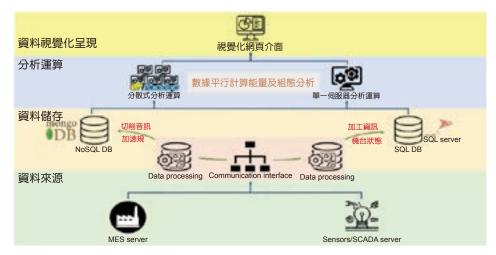


圖 2. 資料流架構。

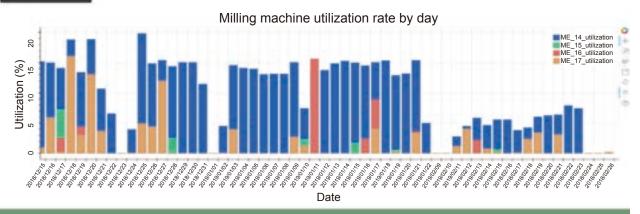
根據前述之連網架構,實際在傳統工廠 (即臺科大機械系實習工廠) 進行架設及驗證。 感測層部分運用紅外線感測器及智慧電錶以接收傳統車床及銑床之主軸轉速以及機臺電力相 關資訊;接收層部分選擇三菱可程式控制器收集感測層中所獲得的資訊,經過初步運算後透 過網路連線功能與監控軟體相互溝通。監控層部分藉由研華的監控軟體 WebAccess / SCADA 進行監控頁面顯示。驗證結果可實際透過 SCADA 進行數據監控,其中機臺電力資訊除了電 壓、電流、功率外,也包括每小時的耗電量等資訊,這些資訊最終可以蒐集起來進行如稼動 率等分析。圖 3 所示為於實習工廠之 4 部銑床在二個月內之稼動率,由圖 3 可知使用最多的 銑床為標號 ME\_14 的這部銑床,且大部份時間僅一部或二部銑床有運作。

#### 五、智動刀具路徑規劃、線上量測與誤差補償系統

應用上述所開發之 IoT 與 MES 系統,本研究開發了智動刀具路徑規劃及線上量測與誤差補償系統,其架構如圖 4 所示,MES 將可透過前述之系統架構與 FTP server、API server 與 CNC 控制器進行溝通,藉此達到路徑規劃、線上量測與誤差補償等實務應用。當 MES 系統接收到產品製造下單後,即會與後台之 API server 溝通,將相關之零件檔由 FTP server 下載至 API server 開啟。此時 API server 即可透過本研究所開發之二次開發程式,於 Siemens NX CAM 軟體中自動化生成刀具路徑與量測路徑,並可考量現場之刀具管理進行路徑生成匹配。完成後則經由 MES 下達指令傳輸相關執行 NC 檔至現場控制器,並經由 IoT系統下達加工執行指令,即可完成最基本的自動化加工。然而此自動化加工並無法控制現場之加工品質,因此本研究亦開發了線上量測與誤差補償系統。現場機臺會透過線上量測系統量測工件各個尺寸並儲存量測資訊於控制器中,透過 MES 溝通以 API server 下載量測資訊,即可透過所開發之二次開發程式,以量測資訊為基礎產生對應的誤差補償之刀具路徑,



#### 傳統機台電能分析



藉由裝設智慧電錶於傳統銑床上,收集其電能使用狀況,依照電能的變化可以得知機台的操作狀況、 使用頻率及稼動率,此資訊可供人員進行機台作業分配,以期達產能最大化。

圖 3. 實習工廠之四部銑床之稼動率分析。



圖 4. 智動刀具路徑規劃、線上量測與誤差補償系統架構。

而後即可再次執行此誤差補償刀具路徑並進行最後的尺寸量測。

在網實系統中,一項重要的概念是操作軟體的自動化,這是和過去以硬體自動化為主的工業 3.0 最大的不同。本研究中自動化刀具路徑規劃系統運作流程如圖 5 所示,首先在零件 CAD 模型匯入 NX 軟體後,使用特徵辨識功能找出 Z 軸單位向量為負方向的平面特徵,系統會判斷其為零件的底部基準面,並將底部基準面以及與此特徵相鄰的面全部抓取,得出剩

餘的面為待加工部位,並且使用不同的顏色區分加工區域與非加工區域,其中加工區域的顏色指定為藍色。接著將這些面特徵區分為兩大類:平面與曲面,藉由向量再將所有平面細部化分為底面、壁面及斜面特徵,曲面則劃分為圓角、球面、圓錐面及造型曲面,並將細部劃分的面結果各存成不同面組。系統可自動分辨特徵是屬於開放或是封閉型態,亦針對曲面特徵區分凹型或凸型,並依此分別產生對應之刀具路徑。經過工法演算法判斷後,可以判斷適合的粗加工方式,例如型腔銑的跟隨零件方式適合開放型的零件凸島特徵。而針對曲面特徵系統將會自動計算曲率半徑,藉此尋找適合大小之刀具,同樣也會選擇適合之精加工方式,例如環繞方式加工適合凸型的圓球曲面。透過建立許多不同的演算法,系統可自動匹配現場之刀具管理資料庫,根據所辨識之特徵自動規畫適合的刀具路徑。

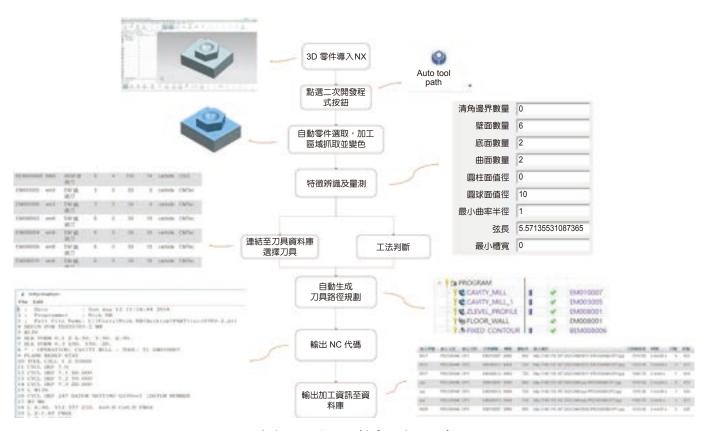


圖 5. 自動刀具路徑規劃系統流程示意圖。

利用前述之 MES 系統與自動化刀具路徑規劃系統可於 CNC 工作站配合,進行自動化線上量測與加工誤差補償之作業,整個自動化加工流程如圖 6 所示。於粗加工及中加工後,機臺將自動以接觸式探針進行曲面檢測,每次檢測點數據將自動寫入控制器內部之量測檔中,包含理想量測點與實際量測點之 X、Y、Z 座標值,以及兩點偏差值。量測結束後,SCADA 將會擷取到控制器中的特定 PLC 暫存器的值,並將此值傳給 MES 系統,以告知 MES 系統量測工作結束,可進行下一步流程。

對機械加工業來說,工業 4.0 最常見的問題是機臺連網得到機臺數據後要做什麼?本研究開發了利用線上量測數據的自動誤差補償程式,可節省每次規劃補償路徑的工時達1小時

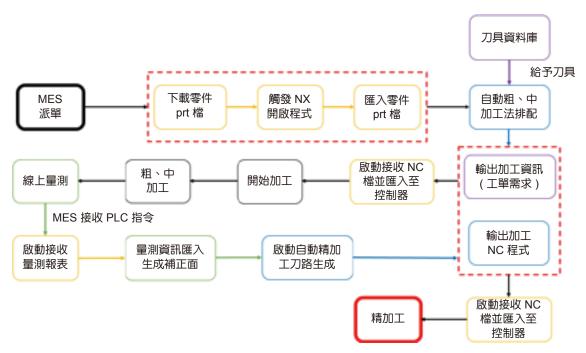


圖 6. 自動化線上量測與加工誤差補償流程。

以上並避免人為錯誤,其做法大略如下:MES系統會通知本機端的API server至控制器下載量測數據檔案,並啟動本研究所開發之自動補償二次開發程式,以進行補償之精加工路徑生成。此自動補償二次開發程式是將數據點之X、Y、Z座標值以點的型態建立於NX模型上,先將數據點投影至曲面上,而後再進行鏡射補償方法以取得補償點。取得補償點之後,根據曲面方向建立擬合曲線,再以NURBS理論進行曲面擬合。最後自動重建曲面模型,以生成補償精加工路徑及精加工量測工法。實際驗證結果如圖7所示,其藍點為曲面中加工之量測偏差結果,左圖中紅點為使用傳統半徑補償之精加工量測結果,右圖中紅點為使用本研究之鏡射補償之精加工量測結果,由左右兩圖可知,標準差可改善30%以上。由此可知中加工後,曲面偏差值變化不均匀,除了有尺寸偏離零點之問題,亦有尺寸歪斜問題。但透過本研究之自動補償系統,可將整體尺寸偏移至零點,亦可修正尺寸歪斜問題。

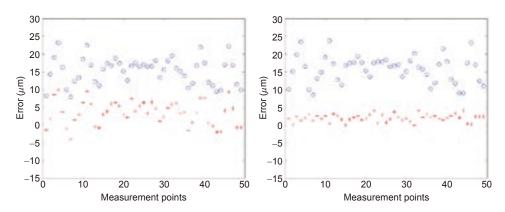


圖 7. 中加工 (藍色) 後與精加工 (紅色) 後之曲面誤差量測結果,左圖精加工為單純使用半徑補償,右圖精加工為使用本研究之自動補償方式。

#### 六、結論

本研究架構了一個整合異質機臺之 IoT 系統,可以透過各種通訊標準或方法連接各種加工機臺,傳統無連網功能之機臺則是以感測器配合 PLC 連接,所有資訊皆會傳輸至 SCADA 伺服器,並上傳 SQL 伺服器紀錄以備後續分析。此外,為了日趨複雜且龐大的資料,亦設計兩種資料儲存形式,包含一般的 SQL 伺服器與 Mongo DB 伺服器。為了滿足龐大數據資料分析所需之運算能力,亦設計出兩種資料分析方式,分別為單台伺服器與分散式分析運算平台。透過 Hadoop 平台可將數台電腦整合應用運算提升效能,並採用分散式檔案系統儲存資料。分析運算的結果將會透過資料視覺化呈現至本研究所開發的資料分析暨資源整合平台。

運用前述所架構之 IoT 系統於臺科大機械系工廠,本研究已成功進行機臺連網,其中感測層部分包含了各種感測器,舉例來說可透過紅外線感測器及智慧電錶以接收主軸轉速以及機臺電力相關資訊。再透過接收層的 PLC 收集感測器之資訊,將初步運算之重要資訊傳至 SCADA 伺服器。最後資料可透過資料分析平台進行稼動率及用電量等分析,提供網實整合系統更為準確的判斷以提升加工效率並減少能源損耗。

本研究亦開發了一 MES 製造執行系統,可下接 SCADA 伺服器取得現場資訊,進行廠房之生產流程控制。以無人車與倉儲系統為例,工件上方會有 QR code 紀錄其生產履歷,人員掃描此 QR code 以後將工件入庫,MES 即可透過倉儲系統之 PLC 知道目前之儲物狀況。接著若 MES 系統之生產流程需前往下一站,可自動呼叫無人車至該倉儲取料,並運送至下一個工站之倉儲。此 MES 系統成功地透過 SCADA 與異質機臺溝通,除了可達到自動化生產流程控制之目的,亦可藉由現場生產資訊監控並彈性化執行生產流程,達到真正的智慧製造。

本研究亦成功以 CNC 自動路徑規劃、量測與誤差補償展示了智慧自動化之應用。整個智動化流程是以 MES 系統為中控中心,接收產品下單後即開始製造流程,MES 系統會與API 伺服器溝通進行 CAM 軟體開啟與零件匯入。接著所開發之自動刀具路徑規劃系統即會針對此零件進行分析,經過特徵辨識後,根據現場刀具管理資料庫匹配切削刀具,並以適當的路徑參數計算粗、中與精加工。除此之外,亦將排配該加工零件之線上量測路徑,此路徑將會於加工完成後,自動以線上量測探針進行特徵的尺寸與點座標量測。量測完畢後,API 伺服器會自動下載量測檔案,並匯入誤差補償之程式。此程式將會以鏡射補償方法取得補償點,接著則是以最佳階數演算法來擬合曲線,再擬合出最適之補償曲面,最後則是以此補償曲面重新計算精加工並生成加工路徑。補償後標準差可下降達 30% 以上,驗證可透過此自動誤差補償系統修正業界無法解決之尺寸誤差問題。

本研究之研究成果充分運用了機臺連線取得的數據,進行加工誤差補償、加工條件修正等自動化,實現了具實用價值的工業 4.0 網實整合系統。

#### 作者簡介

李維楨先生為美國加州大學柏克萊分校機械工程博士,曾於鴻海精密公司服務八年多,現為國立 臺灣科技大學機械系副教授兼全校不分系主任。

Wei-chen Lee received his Ph.D. in Mechanical Engineering from University of California at Berkeley. He worked in Hon Hai Precision (Foxconn) for more than eight years. He is currently an associate professor

in Department of Mechanical Engineering and chairman of the Inter-Disciplinary Bachelor's Program at National Taiwan University of Science and Technology.

鍾俊輝先生為美國紐約州立大學石溪分校機械工程博士,現為國立成功大學機械系副教授。

Chunhui Chung received his Ph.D. in Mechanical Engineering from Stony Brook University. He is currently an associate professor in Department of Mechanical Engineering at National Cheng Kung University.

劉孟昆先生為美國德州農工大學機械工程博士,現為國立臺灣科技大學機械系助理教授。

Meng-Kun Liu received his Ph.D. in Mechanical Engineering from Texas A&M University. He is currently an assistant professor in Department of Mechanical Engineering at National Taiwan University of Science and Technology.

郭重顯先生為國立臺灣大學機械工程博士,現為國立臺灣科技大學電機系教授兼主任。

Chung-Hsien Kuo received his Ph.D. in Mechanical Engineering from National Taiwan University. He is currently a professor and chairman in Department of Electrical Engineering at National Taiwan University of Science and Technology.

項天瑞先生為美國紐約州立大學石溪分校應用數學博士,現為國立臺灣科技大學資工系副教授。 Tien-Ruey Hsiang received his Ph.D. in Applied Mathematics from Stony Brook University. He is currently an associate professor in Department of Computer Science and Information Engineering at National Taiwan University of Science and Technology.

楊朝龍先生為美國普渡大學工業工程博士,現為國立臺灣科技大學工管系副教授。

Chao-Lung Yang received his Ph.D. in Industrial Engineering from Purdue University. He is currently an associate professor in Department of Industrial Management at National Taiwan University of Science and Technology.

羅乃維先生為美國紐約州立大學石溪分校電機工程博士,現為國立臺灣科技大學資管系教授兼主任。

Nai-Wei Lo received his Ph.D. in Electrical Engineering from Stony Brook University. He is currently a professor and chairman in Department of Information Management at National Taiwan University of Science and Technology.

# 強化學習應用於深孔機加工參數 優化

# Optimization of Machining Parameters of EDM Using Reinforcement Learning

陳國榕、張晉蒝、李慶鴻 Guo-Rong Chen, Chin-Yuan Chang, Ching-Hung Lee

加工產品的製程中,加工參數對於產品成品的加工品質有相當大的影響,通常需要選擇一組適合的參數來達到指定的加工品質。這樣的工作往往需要仰賴少數有經驗的老師傅或一份鉅細靡遺的加工操作手冊才能進行,要不然就只能透過反覆的試誤來試出希望的組合。隨著人工智慧時代的來臨,本文介紹透過強化學習 (reinforcement learning) 實現了自動加工參數調整的方法來找到需求的加工品質。此外,本文也採用多目標演算法提供了一個針對多性能指標的性能偏好選擇方式,並將結果實際在深孔放電加工 (hole drilling electric discharge machining, HEDM) 機台上驗證。

During the process to machining a product, machining parameters have huge impacts on the quality of the product. We need to adjust to a proper parameter set to obtain a desired quality. This parameter tuning task often relying on a few experienced engineers or an elaborate operating manual. Otherwise, it is only possible to find the desired parameter set through try-and-error experiments. With the advent of the artificial intelligent (AI) era, we have implement an automatic parameter tuning method with reinforcement learning to obtain a desired machining quality. The method also offers a way to choose the quality preferences under multiple performance indexes, and the result is validated on a hole drilling electric discharge machining machine.

# 一、背景介紹

航太產業所需的零組件均有特殊的要求與特性,如外型和內部結構複雜、特殊材料、厚度輕薄,但對成品品質的要求則採用極高標準,以致加工的難度極高,目前加工型態主要為大量鋁合金的切削和移除、複合材料加工等,所使用的工具機以五軸以上精密加工、精密放電加工為主。隨著航太零件在追求輕量化與高剛性前提下,過去航太零組件加工主要是以切削功能的精密工具機為主,現在利用放電加工具機進行精密雕模與貫孔的加工需求,有越來越多的趨勢,因此,放電加工具機未來在航空產業的應用顯得愈來愈形重要。

深孔放電加工機將欲鑽孔工件放在介電液中或者以介電液不斷沖刷,以電極透過火花放電使介電液電離,陽離子與電子撞擊正負極(電極與工件)後動能轉成熱能,產生高熱進而熔融工件,由於高熱使介電液汽化膨脹,進而達到排除熔融的工件殘渣,從而能夠進行鑽孔加工。

放電加工的性能結果隨著不同的加工參數會有所不同,若要能使加工性能結果滿足期待,研究參數與性能結果間的關係就變得十分重要,本文應用機台為慶鴻 H32C 深孔放電加工機,其機台上可設置的參數有:

- 放電持續時間  $T_{on}$ : 放電持續時間為介電液絕緣狀態破壞,電極與工件形成通路後放電的時間,又稱為脈衝時間。
- 放電休止時間  $T_{off}$ : 放電休止間為放電持續時間結束後至下次放電的間隔時間,此段時間 提供介電液恢復絕緣狀態,以及介電液沖刷排出加工殘渣,需要適當的休止時間來幫助 放電加工。
- ・放電電流 La: 放電加工形成通路時,機台設置的最大的峰值電流,是影響加工結果的重要參數。
- 電容 *CF*: 由於放電加工時須控制電路高頻的開關,目前多透過電容實現,參數值為電容大小。
- · 放電間隙 *Gap*: 放電間隙為電極與工件間打穿介電液形成通路的間距,不確定此數值是控制短路後後退的距離還是放電時前進的速度。
- · 高壓 Hv: 加工時引弧電壓的設定。
- · 低壓 Lv:加工時引弧電壓的設定。
- · 進給 Servo:影響伺服進給速度。

在放電加工中,加工穩定度為重要觀察指標,本文以真圓度 (circularity) 和加工時間兩種加工性能指標為討論標的。真圓度透過雷射顯微鏡量測鑽孔的同心最小外切圓與最大內切圓的直徑差即為真圓度的數值,數值小則越接近理想圓,如圖 1。加工時間則計算時間從電極在工件上開始放電至破孔現象出現,越長則代表加工速度越慢。



圖 1. 真圓度量測。

### 二、常用的加工參數優化

參數優化常見透過實驗設計或使用機器學習的方法,設計實驗並從中找尋最適參數的手 法大致上有試誤法、全因子實驗、正交實驗、均匀法實驗幾種。

- 1. 試誤法 (trial and error):此方法是在生活當中常使用的方法,不需要任何資料的分析,亦無系統性的方法,主要依靠個人的直覺與經驗,一再反覆嘗試並且觀察是否與預期的結果相符,如果結果與預期的結果不符便更換一組新的想法與組合,直到結果符合預期,此種方法雖然較為簡單,但卻是一種較沒有效率的方法,過程中會浪費許多時間與成本,因此在工程上較少使用此種方法進行解決問題與改善。
- 2. 全因子實驗 (full factorial design):此方法將所有因子的所有水準全部組合都至少進行一次實驗,估計所有因子的主效應和交互效應,缺點是需進行的實驗次數較多,當因子與水準多時,缺點十分明顯。
- 3. 正交實驗 (orthogonal experimental design):此方法根據正交性從全因子試驗中挑選出部分有代表性的點進行實驗,這些點具備均勻散齊整可比的特點,透過正交表安排實驗,可大大的減少實驗次數。
- 4. 均匀法實驗 (uniform design):此方法只考慮試驗點在試驗範圍內均匀散佈,挑選試驗代表點的想法是均匀分散而不考慮整齊,使每個實驗點更具代表性,創造一種適合用於多因子多水準的實驗設計。

透過以上實驗後,可以根據需求性能從已獲得的參數中找尋最適合參數。也可根據實驗 後的加工結果,透過機器學習建立最適合參數對應加工品質的估計模型,再利用適當的最佳 化演算法由目標品質找到最適合的加工參數。以下是幾種常用的機器學習建模方式。

- 1. 多元線性回歸 (multiple linear regression)。研究多個自變量與一個應變量間存在的線性關係,並用多元線性回歸方程式來表達這種關係,可透過多元線性回歸建構參數與加工性能的虛擬系統<sup>(1)</sup>。
- 2. 倒傳遞類神經 (back propagation neural network, BPNN)。神經網路透過基於數學統計類型的學習方法來近似參數與加工性能間的關係,是一種非線性統計性資料建模的工具,若參數過多時,可先透過降維或特徵選取來提高倒傳遞類神經的準確度<sup>(2)</sup>。
- 3. 模糊邏輯 (fuzzy system)。模糊邏輯系統能將語意推論,轉為數值運算後,得到結果,可 將取得的數據根據主效應的分析結果轉化為模糊規則,或透過全因子實驗數據建立以數 據驅動的模糊系統<sup>(3)</sup>。
- 4. 模糊類神經 (fuzzy-neural system, FNS)。模糊類神經為模糊系統與倒傳遞類神經的結合,可將主效應的分析結果轉為模糊規則,並透過倒傳遞類神經修改模糊邏輯前件部 (precondition part) 或後件部 (consequent part) 使系統更近似真實系統<sup>(4-6)</sup>。

# 三、使用強化學習的方法

強化學習是一般認為最接近通用人工智慧 (artificial general intelligence) 的一種學習方法 <sup>(7)</sup>,基本策略是透過不斷地與環境互動來獲得反饋,以及累積過去嘗試過的經驗來幫助決策。就如同剛出生懵懂無知的小嬰兒,即使沒有明確的教導,仍然可以透過視覺、觸覺、味覺等感知能力,學習到如何辨識物體、移動手腳、抓取玩具等動作。毫無疑問的,這樣的互動的方式是人類終其一生認識環境的主要知識來源,而強化學習正是基於這種探索的概念,

利用演算法從環境互動中學習的方法。

強化學習基本上可以看成如圖 2 的馬可夫決策過程 (Markov decision process) 的模型,決策過程的結構中包含代理人 (agent) 和環境 (environment) 兩個主要的互動角色,一個學習的代理人必須要能夠某種程度感知 (sensation) 環境的狀態 (state),而且能夠反應影響環境狀態的行為 (action)。代理人也要設定一個本身或與環境相關的目標 (goal),對於有利或不利於目標的行為給予適當的獎勵或懲罰 (reward),而最簡單的馬可夫決策過程就建立在感知、行為、和目標三個層面上。

- 感知:能夠得知環境的狀態,以及行為對於環境狀態的改變。
- 策略與行為:為了達成目標,因應不同環境的狀態會採取不同的策略 (policy),而不同的策略又會相對影響不同的行為反應。
- •目標:學習的目的為何,根據狀態的改變,強化有利於達成目標的行動給予獎勵,對於不 利的行動給予懲罰。
- 模型 (model):用來學習及預測環境狀態與不同行為間的獎勵與懲罰值,使得策略運用在 適合的反應行為上。

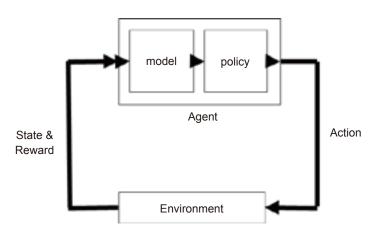


圖 2. 強化學習流程示意圖。

強化學習所在的環境,同樣會對代理人的行為做出反應,並將反應後的新狀態反饋給代理人。代理人根據目前環境的狀態透過模型預測獎懲,策略根據獎懲決定新的行為,新的行為影響環境產生新的狀態,代理人收到狀態及獎懲後將歷史的狀態、行為及獎懲儲存用以訓練模型,然後繼續以模型預測獎懲,策略根據獎懲選擇新的行為,如此不斷反複。

強化學習的流程根據不同的模型與策略的建構方式,目前主要分為三類:value based,policy based 和前兩者混合的 actor critic。而 value based 根據策略可分為 on-policy 的 Sarsa 與 off-policy 的 Q-learning 與衍伸的 DQN,policy based 則為 Policy Gradient 與衍伸的 Actor Critic。

#### · Q-Learning

以一表格紀錄狀態 S、動作 A 與獎勵 R,當代理人處於  $S_0$  採取  $A_0$  獲得獎勵  $R_1$  並處於  $S_1$ ,且在  $S_1$  採取  $A_1$  獲得了獎勵  $R_2$  並處於  $S_2$ ,且在  $S_2$  採取  $A_2$  獲得了獎勵  $R_3$  並處於  $S_3$  則表格如下,此表稱為 Q 表:

表1. 儲存狀態、動作與獎勵的 Q表。

S	A	R
$S_0$	$A_0$	$R_1$
$S_1$	$A_1$	$R_2$
$S_2$	$A_2$	$R_3$
$S_3$	$A_3$	$R_4$

當狀態與動作組合是有限的時候,在理想狀態下,完成訓練後我們會獲得一個包含所有狀態與動作的完美 Q 表,Q 值與當下的獎勵及未來動作的獎勵有關,根據當前狀態 S 尋找該狀態最大的 Q 值即可在每個狀態間獲得最大效益,而 Q 值與的更新公式如下:

$$Q(S, A) = (1 - \alpha)Q(S, A) + \alpha[R(S, a) + \gamma \max Q(S', a)]$$

其中  $\alpha$  學習率  $(0 < \alpha \le 1)$ , $\gamma$  為衰減細數  $(0 \le \gamma \le 1)$ 。根據公式可以看出,學習率  $\alpha$  愈大, $\gamma$  數值愈大時,愈重視未來行動獲得的獎勵, $\gamma$  愈小時,愈在乎目前可獲得的獎勵,Q-learning 透過 Epsilon greedy 進行動作的決策,舉例來說:epsilon = 0.9 意味著,即使知道下一步行動最大的 Q 值為  $A_1$ ,他有 90%的機率會按照 Q 表最優值選擇行為,有 10%的機率會隨機選擇行為,雖然可能會繞遠路,但較能保證找到全域最優解。

#### Deep Q Network (DQN)

用 Q 表訓練類神經網路,並以經驗池將其 Q 表儲存,一般有兩種形式的類神經:輸入 S 輸出每個 A 的 Q 值及輸入 S 與 A 輸出 Q,並透過一個 Q 估計來實現網路的更新,目前的 強化學習發展為透過一個未更新的類神經做為 Q 估計<sup>(8)</sup>。

#### · Sarsa

與 Q learning 類似,使用 Q 表紀錄狀態 S 動作 A 與獎勵 R,與 Q-learning 不同點在於只會依照當前的 Q 最佳值進行下一步動作。

#### · Policy Gradient

目標為使獎勵最大,透過設定目標函數並訓練他,得到一個參數化的策略函數:  $\pi_{\theta}(s,a) = P[a|s,\theta]$ ,透過獎懲將有利的行動概率提高,不利的行動概率調低,因此仍需計算 Q 值做為標籤的功能,最後獲得一個對於某狀態的行動概率網路,對於連續動作的問題中十分有用,通常使用高斯策略。

#### Actor Critic

Actor 由 Policy Gradient 演化而來,透過獎懲來調整不同狀態下採取動作的概率而傳統的 Policy Gradient 中學習速率很慢,需要花很長的時間,而 Critic 由 Q-learning 演化而來,可以計算每一步的獎懲值,為了能夠在連續動作中選取合適動作,Actor 來選擇動作,Critic 來告訴 Actor 該動作是否合適,在兩者不斷的疊代下完善。

#### 1. 在實境中使用強化學習優化參數

目前使用 DQN 的方式在尋找最佳參數,加工一次的加工數據在經驗池中添加一筆,輸入類神經網路為狀態 (參數) 與動作 (調整參數) 目標則為加工性能轉換的獎懲,以經驗池數據訓練網路後,透過 eplison-policy 的方式選擇最佳動作,期待強化學習能有效的在實際加工中透過少量的加工次數找到需求性能的加工參數。由於無法直接在深孔放電加工機上量測後取得數據,透過先前對深孔放電加工機進行的 4 因子 (放電持續時間、放電電流、電容和放電間隙) 3 水準全因子實驗 81 筆數據做為虛擬系統,81 筆數據為 4 因子中每因子 3 水準的所有組合,可粗略代表著所有參數組合的範圍,若強化學習能以少量次數將參數調整至最適參數也許能代表強化學習確實能在少量次數中學習到調整參數的方法,在虛擬系統中,一次加工則從中取一筆,試驗強化學習的可行性,我們的強化學習流程如下圖 3。

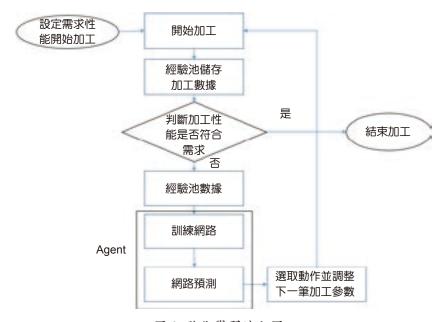


圖 3. 強化學習流程圖。

## 2. 透過柏拉圖最適 (Pareto-optimality) 提供多性能選擇

柏拉圖最適是指資源分配的一種理想狀態。給定固有的一群人和可分配的資源,如果從一種分配狀態到另一種狀態的變化中,在沒有使任何人境況變壞的前提下,使得至少一個人變得更好,這就是柏拉圖改善。柏拉圖最適的狀態就是不可能再有更多的柏拉圖改善的狀態;換句話說,不可能在不使任何其他人不受損的情況下再改善某些人的境況。在本研究中,欲使用柏拉圖進行多目標優化最適提供使用者性能權重的偏好的對應參數,下圖 4、5舉例說明柏拉圖最適,圖 4、5均為 81 筆加工參數對應的加工性能,橫軸代表加工時間,縱軸代表真圓度,最靠近 XY 軸的藍色曲線 rank1 即為找到的柏拉圖最適參數點,該條線上的任一點均滿足:加工時間比該點短的範圍內,該點必為真圓度最小值,且真圓度比該點小的範圍內,該點必為加工時間最短值。

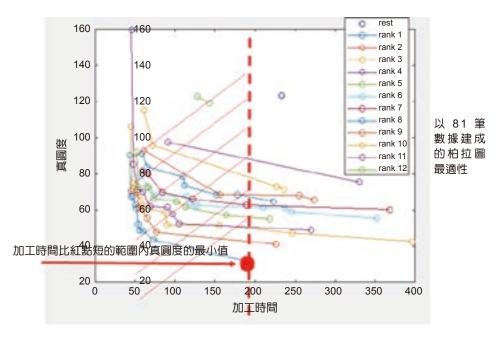


圖 4. 柏拉圖最適示意圖。

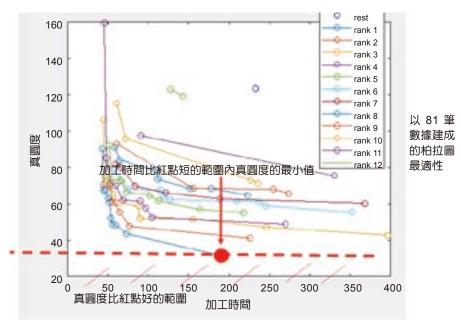


圖 5. 柏拉圖最適示意圖。

# 四、結果

#### 1. 強化學習結果

次數為記錄找到滿足需求性能的參數時所花費的次數,在 200 次測試中的結果如表 2 強化學習在 81 筆數據中重複測試 200 次的平均、最大次數與標準差的表格表格 2 所示,不論是單一性能要求或雙性能要求,均能在極短的加工次數取得有效參數,設定尋找 81 筆參數

中的加工時間最小值時在 200 次測試內的平均花費的次數為 22 次,最大次數也只有 36 次,而尋找真圓度的最小值時平均次數為 16.735 次,最大次數則為 46 次,這可能代表強化學習確實能在現實系統中以有效率的方式找到最適參數。

& 2. 蚀化字首在 61 丰製豚牛里俊冽訊 200 人的干均、取入人製與儒字左的农作	表	. 2.	強化學	習在	81	筆數據	中重複測試	は200 次的平均	1、最大2	欠數與	標準差的	勺表格
---	---	------	-----	----	----	-----	-------	-----------	-------	-----	------	-----

需求性能	平均次數	最大次數	標準差
加工時間少於 75	2.1250	11	1.8727
加工時間少於 60	3.32	13	2.7045
加工時間少於 45	9.2	25	5.2877
加工時間少於 44 (數據最低值)	17.7	37	7.4374
真圓度少於 65	2.06	16	1.6644
真圓度少於 55	5.325	24	4.6936
真圓度少於 45	8.77	38	7.1091
真圓度少於 32 (數據最低值)	13.9050	45	7.6877
加工時間少於 60 且真圓度少於 60	11.74	35	7.2785

#### 2. 柏拉圖最適

下圖 6 為以 81 筆數據透過柏拉圖最適找到的最適參數,最靠近 X 與 Y 軸的 rank1 曲線即為可供加工性能偏好選擇的參數點,越往右下代表真圓度偏好越多,越往左上代表加工時間篇好越多 (愈多代表愈小)。而下圖 7 為透過 81 參數建模後預測的柏拉圖最適,可由最外圍的紅色曲線上找尋性能偏好的參數。

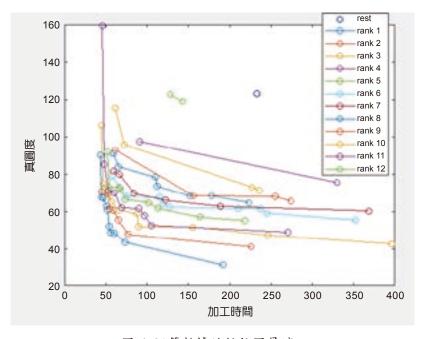


圖 6.81筆數據的柏拉圖最適。

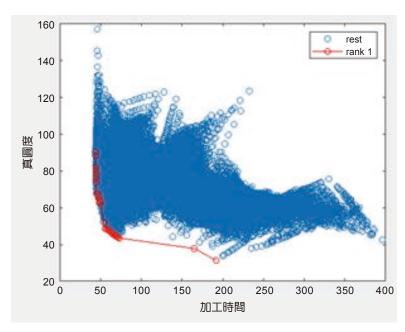


圖 7.81 筆數據建模後預測的柏拉圖最適。

柏拉圖最適也可提供三總加工性能時使用,下圖 8 為 81 筆數據對應的三個加工性能:加工時間、真圓度、電極削耗計算後繪製的柏拉圖最適,紅色點即為柏拉圖最適的參數點可供加工性能偏好的選擇。

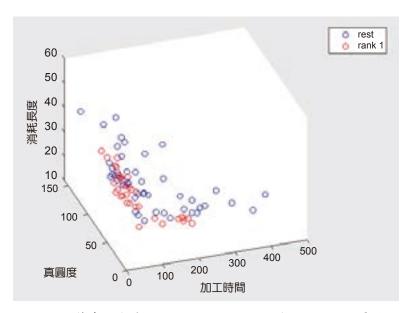


圖 8.81 筆參數對應的三個加工性能的立體圖的柏拉圖最適。

# 五、結論

與傳統的實驗找到最佳參數或透過實驗取得數據後建模預測最佳參數不同,強化學習透 過實際加工中找尋最適參數,且已在虛擬的 81 筆參數中得到證實確實能有效率的以平均約 18 次的次數中找到 81 筆中的最佳解,期待能在虛擬系統或實際加工中以有效率的方式獲得 最佳解達到參數優化的效果,我們仍在為此努力,並嘗試不同的強化學習架構。同時提供一 個多目標性能的選擇方式,能在最優的加工性能中,提供性能偏好的選擇。

#### 參考文獻

- 1. S. Debnath, R. N. Rai, and G. R. K. Sastry, Materials Today: Proceedings, 5 (2), 5195 (2018).
- 2. P. Vishnu, N. S. Kumar, and M. Manohar, Materials Today: Proceedings, 5 (2), 3770 (2018).
- 3. N. Nagaraju, S. Venkatesu, and N. G. Ujwal, Materials Today: Proceedings, 5 (2), 7420 (2018).
- 4. H. W. Chiu and C. H. Lee, Advances in Engineering Software, 114, 246 (2017).
- 5. C. H. Lee, Y. H. Lee, and C. M. Lin, International Journal of Fuzzy Systems, 19 (2), 470 (2017).
- 6. C. H. Lee and W. C. Wang, Robust Adaptive Position and Force Controller Design of Robot Manipulator Using Fuzzy Neural Networks, *Nonlinear Dynamics* (2016)
- 7. R. S. Sutton and A. G. Barto. Reinforcement Learning: An Introduction. 2nd ed., MIT press (2018).
- 8. V. Hasselt, Hado, Arthur Guez, and David Silver, Deep reinforcement learning with double Q-learning, *Thirtieth AAAI Conference on Artificial Intelligence* (2016).

#### 作者簡介

陳國榕先生現為國立中與大學機械工程所碩士生。

Guo-Rong Chen is currently a M.S. student in Department of Mechanical Engineering at National Chung Hsing University.

張晉蒝先生為東海大學資訊工程所碩士,現為國立中與大學機械工程學系專任研究員。

Chin-Yuan Chang received his M.S. in Computer Science from Tunghai University. He is currently a researcher fellow in Department of Mechanical Engineering at National Chung Hsing University.

李慶鴻先生為國立交通大學電機與控制工程博士,現為國立中與大學機械工程學系特聘教授。

Ching-Hung Lee received his Ph.D. in Electrical and Control Engineering from National Chiao Tung University. He is currently a distinguished professor in Department of Mechanical Engineering at National Chung Hsing University.

# 工業用機器人控制技術簡介

# Introduction to Industrial Robot Control Technology

游鴻修、蕭欽奇 Hung-Hsiu Yu, Chin-Chi Hsiao

機器人控制器是機器人的大腦,其功能為發布和傳遞動作指令,其核心為控制演算法及應用軟體開發。因此,機器人控制器的發展扮演關鍵核心技術的角色。在本文中,將針對國際上最新的機器人相關資訊與趨勢進行介紹,並且整理工業用機器人控制器之重要功能與相關規格,以及面臨智慧製造發展下,機器人技術的發展趨勢做說明,讓有興趣開發或使用工業機器人控制系統之讀者,可以有一概略性之了解,提供國內相關單位在機器人研發上參考。

The robot controller is the brain of the robot. Its function is to issue and transmit action instructions. Its core is control algorithm and application software development. Therefore, the robot controller, which is the heart of the robot system, should require more attention. In this article, introduction to the latest international robotic news and important specifications of a robot controller is addressed. This provides an overall review of the development of industrial robots for readers who are interested in this filed.

## 一、前言

工業用機器人一直是全球製造業的重點導入設備,尤其是近年來亞洲人力成本逐漸高昂,缺工狀況日益嚴重,再加上智慧化已成為製造業的既定趨勢,這兩項因素讓機器手臂的市場不斷增溫,在商機持續擴大的態勢下,各工業大國也開始加速機器市場的布局。從需求面來看,2016、2017兩年,機器手臂的出貨量已急遽上揚。根據國際機器人聯合會(international federation of robotics, IFR) 發表全球工業機器人的初步統計,2018年全球出貨量創歷史新高 38.4 萬套,圖 1 所示為全球工業機器人歷年銷售量(1)。

機器人控制器是機器人的大腦,包含硬體及軟體兩部分。其功能為發布和傳遞動作指令,其核心為控制演算法及應用軟體開發(上下料、焊接、研磨、抛光…)。目前國外主流機器人廠商的控制器均為在通用的多軸運動控制器平台基礎上進行自主研發,各品牌機器人均有自己的控制系統與之匹配。除了全球四大機器人大廠自行研發控制器外,EPSON、

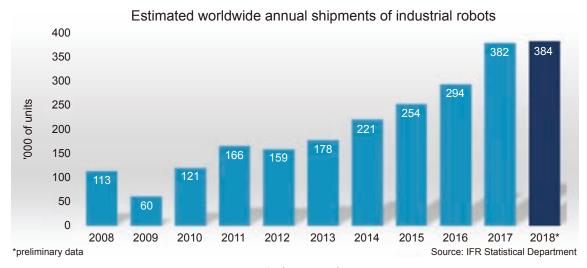


圖 1. 全球工業機器人歷年銷售量。

DENSO、TOSHIBA 亦深耕控制器領域,生產自有品牌的機器人。而在台灣,諸如工研院、研華寶元、新漢等廠商,近幾年在全球控制器市場也有不錯的成績。

為了清楚國際大廠之控制器產品差異,以下針對 4 大家族之手臂控制器作概略性介紹<sup>(2)</sup>

- ABB: IRC5 控制器是 ABB 研發的工業機器人控制器,由一個控制模組和一個驅動模組組成,可選配一個過程模組以容納客制化設備和介面,如點焊、弧焊和膠合等。配備這三種模組的控制器可控制一台 6 軸工業機器人及外部軸或類似設備。如需增加工業機器人的數量,只需為每台新增工業機器人增裝一個驅動模組,最多可控制四台工業機器人。
- KUKA: KRC4 是 KUKA 開發的一個全新控制器,這個系統架構集成的所有安全控制、工業機器人控制、運動控制、邏輯控制及程序控制等,並可進行智慧化使用和分享。使系統具有最高性能、可升級性和靈活性。
- Fanuc: RobotR-30iA 是發那科研發的新一代工業機器人控制器,具有性能高,回應快,安全性能強等特點。同時,該控制器亦整合視覺功能,可節省生產所需的周邊設備成本。基於 FANUC 自身軟體平臺研發的各種功能強大的點焊、塗膠、搬運等專用軟體,使工業機器人的操作變得更加簡單。
- Yaskawa:基於 PC 開發的具有開放式結構、網路功能的工業機器人控制器。在 2016 年, Yaskawa 還推出了配備人工智慧的機器人控制器,可自動設定焊接條件,高精度預測機器 人主體的壽命等,可縮短機械障礙時的停止時間做出貢獻。

# 二、工業用機器人控制器MIO

因應工業用機器人發展趨勢與產業應用技術需求,工研院機械所特別針對工業用機器人,以及產業應用上之特殊控制架構做深入研究,開發工業用機器人控制器 MIO (motion intelligence orchestration, MIO),如圖 2 所示。工研院開發之 MIO 機器人控制器採用模組化設計,提供使用者充分之調整空間。產品大致分為幾類,如圖 3 所示,相關說明如下:

- MIO 機器人控制器 經濟型
  - ■機器人專用 RCL 運動函式庫。

- ■奇異點速度調變、3D空間防撞、速度軌跡恆定等特殊功能。
- ■計算運動軌跡是否超出限制空間,以及可 on-line 監控並阻止機器手臂進入限制區域。
- ■系統事件偵測與監控,可透過 I/O直接輸出或接收,包括機器手臂末端到位信號 (InPosition)輸出、循跡誤差過大輸出、急停 (ESTOP)輸入。
- MIO 機器人控制器 豪華型
  - ■具備 MIO 經濟型功能。
  - ■支援速度控制、扭矩控制。
  - ■具備無感測器順應教導lead-through功能。
- eMIO 機器人控制器-網路型
  - 支援 EtherCAT 網路通訊,國際化通訊標準協定。
  - ■具備 MIO 經濟型、 MIO 豪華型功能。
- •以全數位即時網路串聯,彈性化電控配線,支援 Industry 4.0 自我診斷能力。

另外,MIO 機器人控制器亦整合機器人控制相關軟硬體,如 RCL (robot control library) 軟體 函式庫、EtherCAT 通訊標準、機器視覺 (含手眼協調)、周邊 I/O 擴充等,如圖 4 所示,提供國內業者具國際競爭技術優勢之機器人控制器系統的軟硬體平台<sup>(3)</sup>。針對控制器相關軟體功能,說明如下:

- •機器人手眼協調技術:視覺與機器人的整合是大部分系統整合業者所需要的功能,但市面上大部分的應用情形都是系統整合業者自行購買機器人系統與視覺系統,由工程師撰寫程式來分別整合視覺與機器人運動。有鑑於視覺與機器人之應用相當普遍,如能開發具備有手眼協調之機器人系統,將會對使用者有很大的幫助。這樣手眼協調的控制器可以提供如視覺/手臂空間座標轉換、視覺自動校正程序、或者自動視覺與運動教導之流程,減少使用者使用上的困難度,也符合 IFR 所倡導的「Easy to use robots」這樣的主題,也是未來重要的發展方向。
- 機器人控制器軟體技術:國內廠商原本就擁有不錯的運動控制能力,國產之運動控制器 或工具機控制器也發展相當成熟。這些廠商如果想要轉型成機器人控制相關供應商,軟





圖 2. 工研院開發之 MIO 機器人控制器。



圖 3. 工業用機器人控制器 MIO 產品系列。

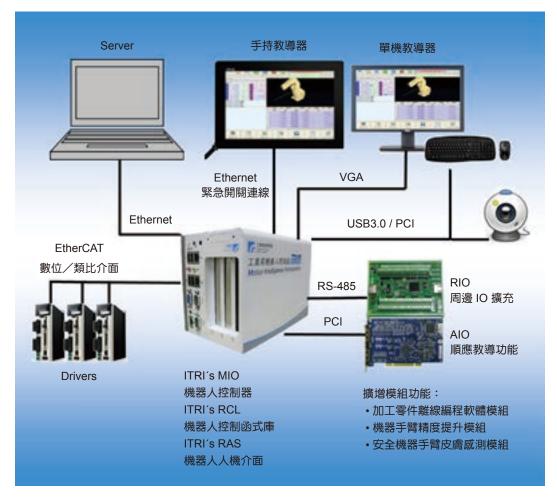


圖 4. 工研院工業用機器人控制器 MIO 系統架構圖。

體技術之提升是重要且值得投入的方向。Industry4.0 的 Software Engineering 4.0 中也針對軟體有一些描述,例如:software analytics framework (SAF) 就是一個例子,在這個軟體平台內,整合包括:視覺化元件 (visualization)、功能化元件 (modularization) 與管理元件 (management) 等,更完整的規範未來軟體系統所需要擁有的各個部份。

•產業用機器人控制器需要較多的數學運算資源,求解正逆向運動學。除了底層控制架構外,還包括對其他週邊設備的通訊介面等。例如,是否支援 10/100Mbit 之 Ethernet 網路,或者是一般產業界常用的 RS232/RS485 等序列傳輸介面。以擴充能力來說,組合的彈性可以讓使用者因應不同需求的應用組合,模組化與富有彈性的軟硬體搭配選擇,也是控制器所能提供的另一項優點。其他相關功能也會決定一個機器人控制器之優劣。例如對於不同座標系統的支援程度,包括:軸座標、世界座標、工具座標甚至使用者自訂座標等,不同座標系統的支援,提供使用者更多方便的使用彈性。程式撰寫也需要控制器可以支援不同專案檔案之間相互呼叫。一般程式寫成主程式與副程式之搭配,可讓一個大的程式較系統化,因此不同的 MACRO 支援也很重要。以目前最新的順應教導功能也可透過對應之模組擴充來支援。至於使用工作空間之保護,包括區域監控與 3D 模擬等,將來也都可能成為工業機器人控制器所必須支援的必要項目。其他應用包括視覺模組與物體追蹤、網路功能支援與否、文件輸出與多機器人的擴充支援功能,機器人控制器的功能將會更多元。

## 三、工業機器人控制器重要指標-快、穩、準

在產業用機器人自動化應用中,未來機器人控制器可透過產業用機器人模型建置/參數鑑別技術,鑑別複雜動態效應,以及透過振動抑制補償技術,用於快速穩定的自動化應用,讓工業用機器人能具備快、穩、準的運動控制性能,並具有最佳化運動軌跡。

#### 1. 機器手臂運動控制技術一快

循環週期時間 (cycle time) 是一種評估機器手臂之運動速度的性能指標,圖 5 所示為 25 mm-300 mm-25 mm 的口字型軌跡,用以測試機器手臂性能。機器手臂將參考此軌跡快速的從端點 A 至端點 B 往返,其所需時間即為循環週期時間。上述的行為是模擬機器手臂兩個位置點快速搬移的行為,循環週期時間越短,表示著機器手臂具有良好的運動速度控制表現。經測試,MIO 控制器搭配工研院機器手臂,其循環週期是 0.391-0.396 秒之間,與國外機器手臂性能相當。

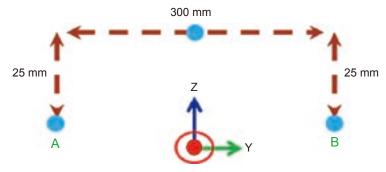


圖 5. 口字型示意圖 (25 mm-300 mm-25 mm)。

欲提升機器手臂運動性能 (降低循環週期時間),手臂運動軌跡的設計與分析是相當重要的一環,過程中需確認軌跡規劃之型別設定、參數分析等。以下將針對步驟進行展開及說明:

- •確認 Robot 可正常執行口字型運動軌跡 (口字型軌跡坐落在機器手臂的正前方並在 workspace 範圍內;不會碰觸的周圍環境)。
- 規畫卡式合成速度軌跡:針對手臂末端移動時,欲達成之目標速度、加速時間、減速時間,作出適當的規劃。
- 控制器 Blending 功能啟用: 軌跡規劃過程中,常常為了綜合調整控制變因,軌跡線段可能需要多段串接。然而,軌跡多段串接容易造成運動速度中斷的困擾,意即不斷地加速/減速,進而造成循環週期時間的增加。為此,Blending的功用便是使運動速度連續且平滑化。當啟用 Blending 功能,運動將平滑處理,若將其關閉,運動將不進行平滑處理,兩者差別如圖 6 所示。

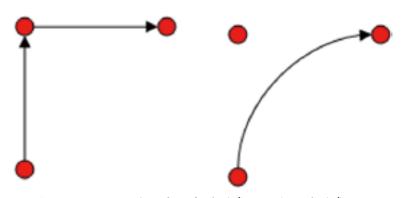


圖 6. Blending 功能:左:無平滑處理;右:平滑處理。

另外,機器人應用於多短直線逼近曲線的加工路徑時 (如鞋模塗膠),MIO 控制器的 Blending 功用可不受各線段過短的影響,可將速度最佳化並且提昇效率。圖 7 所示為鞋模塗膠應用改善的前後差異。

- 改善前:一般運動軌跡規劃,設定速度因各路徑過短而無法到達。
- 改善後: 最佳化運動軌跡規劃設定速度不受各路徑過短的影響。



圖 7. 鞋模塗膠應用改善的前後差異。

#### 2. 機器手臂運動控制技術 - 穩

當機器手臂之加工路徑確認後,運動控制器需要負責路徑執行。機器手臂運動路徑追蹤控制的好壞將會影響執行規劃之結果,一般市售的機器手臂控制器並未針對不同速度下的運動軌跡控制特別處理,導致以不同速度執行規劃路徑時,會有誤差的發生。例如,當執行兩段運動命令的混合動作時(以兩直線運動為例,如圖 8(a)所示),速度愈快,開始混合的位置(如圖 8(a)紅點所示)就距離轉角愈遠,從速度圖可得知原因,在加減速度時間(如圖 8(b)的 Time 所示)固定的情況下,當速度提高時,規畫的速度曲線開始降速到降速為零之間所圍成的三角形(如圖 8(b)所示)面積就愈大,面積等於開始混合的位置到轉角的距離。

因此,MIO 控制器特別在機器手臂運動控制部分開發進階運動功能。針對抛光研磨應用而言,機器手臂執行加工軌跡時,如果可以控制不同的進給速度下保持加工軌跡的固定,就可以解確保加工品質的一致性。所以,預計開發的軌跡恆定的功能,是要在不論速度多少都是行走同一軌跡。將底層運動程式增加以下兩個條件,預計可以達到軌跡恆定的目的。

- 速度規畫時,固定降速時的距離 (如圖 8 的黃色三角形)。
- 維持時間比例 (負加速度時間 Ta:等加速度時間 Tb:正加速度時間 Tc),如圖 9 所示。

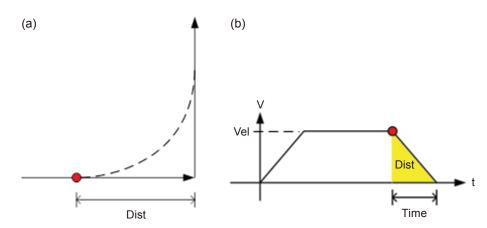


圖 8. 混合動作示意圖。

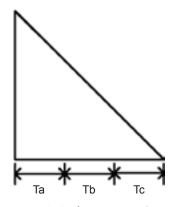
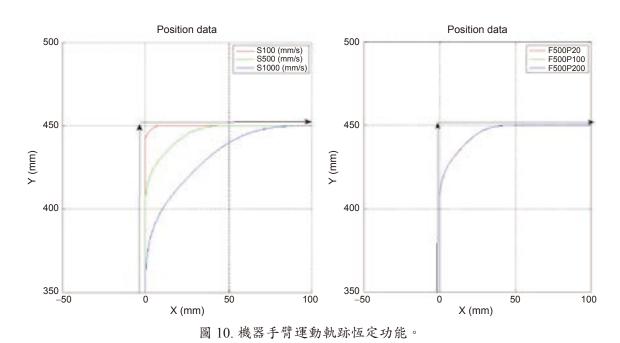


圖 9. 降速度時間比例示意圖。

因此,藉由機器手臂之進階運動控制,達到加工路徑執行時之運動軌跡恆定功能,預計可提升抛光/研磨加工之品質,如圖 10 所示。此加工軌跡恆定之功能,可以定義使用額定速度之 50% 與 200% 來運行該軌跡。軌跡轉角之空間最大位置誤差小於 0.1 mm。



#### 3. 機器手臂運動控制技術 - 準

依據 IFR 的趨勢分析,機器人應用將從傳統一般的 pick-and-place 取放應用,漸漸擴展到抛光、研磨、繞切、鑽孔等更需要精密追蹤控制之應用領域。這些應用都需要機器人系統有較高的絕對精度要求。一般機器人系統規格標示的是重現性 (repeatability)。這樣的特性讓預先教點的取放動作可以實現,因為只要事先將機器人帶到所需要的位置上,機器人將可以重複到達所設定的點,所以只要重複精度夠高的機器人即可執行此類任務。另一方面,如果機器人的動作不是靠事先教導的位置來決定,而是靠預先設定的座標點 (如 CAD 資訊) 的話,那就需要看機器人整體的絕對精度 (accuracy) 有沒有辦法達到所需的範圍。

- 重現性 (repeatability): 重複返回相同位置的能力。位置的平均值和最遠達到位置之間的距離。
- 絕對精度 (accuracy):移動到空間中指定位置的能力。機器手臂從不同初始位置,多次移動到指定位置時,指定位置和實際位置的平均值之差。

當前的工業機器人已具有相當好的重現性,從 ±0.02 至 ±0.3 mm (視手臂大小而定)。但就機器人的精度 (accuracy) 而言,機器人製造商通常不提供精度規格。一般而言,機器人精度大致落在 10 毫米到幾毫米之間<sup>(4)</sup>。不幸的是,在機器人加工應用上,如鑽孔、繞切、研磨、抛光等,機器人絕對精度是必要的。至於為什麼機器人精度很差,主要原因是機器人結構上的特性,具有較差的絕對精度。加上組裝過程中,施加的力和負載引起的機器人結構撓曲,會進一步地降低機器人絕對精度,導致末端效應器 (end-effector) 有顯著的誤差。機器人在路徑軌跡生成時,是利用運動學的幾何關係並從關節位置推斷末端效應器位置。為了

可計算性,機器人控制器使用的運動學模型並假設其參數是固定不變的,例如,各節手臂的長度和接頭軸線之間的垂直度或平行度。但實務上,這些運動學模型參數經過製造或組裝程序後,皆存在一定的誤差。除此之外,關節位置感測器由於位於伺服電動機的後端,傳動零件中的任何誤差,如順應性和間隙,因未被考慮導致位置感測器也具有誤差。這些誤差通常很小,但因機器人結構屬於串聯式,導致誤差被放大並最終在機器人末端點產生顯著的誤差。一般來說,機器人末端點精度受到機器人剛性、負載、刀具磨損、機械間隙以及熱效應等多種因素影響,誤差可以分為:

- 幾何誤差 (geometric errors):運動參數中的誤差,例如關節位置的偏移、連桿長度和角度的尺寸和角度變化,這是由於製造不精確造成的,它們是通常是固定的。
- 非幾何誤差 (non-geometric errors):包括齒輪傳動中的順應性、反向間隙、偏心和磨損以及熱膨脹等,從而降低機器人的精度。它們是可變的但有些可預測的<sup>(5,6)</sup>。

一般而言,臂長 2-3 米的機器人,其幾何誤差可能導致 TCP 誤差約為 2-4 mm。至於非幾何誤差部分,受限於機器人固有的剛度不足,關節輸出軸偏轉及手臂支臂的彈性變形是誤差的主要來源。在某些情況下,誤差甚至可能高達 3 mm 或更大。例如,當機器人進行鑽孔加工時,其精度在接觸力的作用下會進一步降低。表 1 總結了機器人精度性能下降的來源。

誤差來源	形式	說明	TCP error	
關節偏移	级信記辛	固定、永遠存在	2 4	
製造公差	幾何誤差	回 <b>止、</b> 水 <b>运</b> 仔住	2-4 mm	
關節及支臂的彈性	非幾何誤差		3 mm	
熱效益		非固定、存在和大小取決於機器人機械結構和工作環境的屬性和狀態	1	
背隙、磨耗等		恢 例 和 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日	1 mm	

表 1. 工業機器人誤差來源分析。

為了解決上述問題,MIO 控制器具備,機器手臂靜態定點精度提升技術及動態精度補償技術,用以改善靜態定點精度及動態運動下之末端路徑偏移誤差。機器手臂定點精度提升技術是透過最佳化手臂幾何參數鑑別技術,克服手臂製造/組裝誤差現象,在不同臂長機器手臂,獲得良好精度提升。如表 2 所示,針對 3 款不同臂長之手臂 (650、1500、2000 mm),其定點精度分別有 7.67 倍、2.8 倍及 12.30 倍的提昇效果。至於機器手臂動態精度補償部分,可改善快速、高負載運動下之末端路徑偏移誤差,在手臂末端線速度 200mm/sec的條件下,末端直線路徑精度路徑誤差由 0.44 mm下降至 0.22 mm,如圖 11 所示。

表 2. 機器 于 臂 静態	(足點精度提升結果
	ムーマ / ク 小夫 / テ

臂長	校正前精度 (RMS error)	校正後精度 (RMS error)	驗證範圍 (XYZ) 單位:mm³
650 mm	0.69 mm	0.09 mm	$100 \times 300 \times 400$
1500 mm	0.28 mm	0.1 mm	$2200 \times 500 \times 600$
2000 mm	4.55 mm	0.37 mm	$2500 \times 1500 \times 1500$

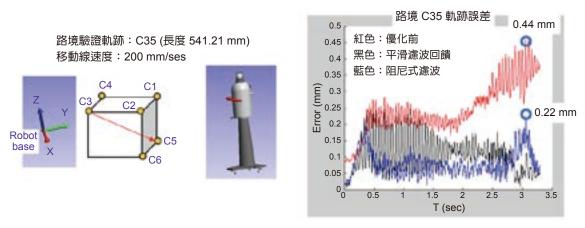


圖 11. 機器手臂動態精度補償提升結果。

#### 四、結論

全世界大部分的工業機器人應用在汽車產業,在此領域具競爭力的機器人廠商集中於日本及歐洲。然而四大家族 (YASKAWA、KUKA、FANUC、ABB) 以外的日本、歐洲的工業機器人廠商,也已意識到隨著汽車及機電、電子產業的機器人應用逐漸趨於飽和,未來的應用會以智慧製造需求來發展。

如圖 12 所示,機器人在智慧製造未來技術發展趨勢有以下三大技術重點:

- 人與機器人協同工作。
- 機器人學習技巧性任務工作。
- •機器人之間、與設備之間可預測診斷,生產資訊互相連結、彼此適應溝通協調處理。

在人機協作部分,目前各大廠已經紛紛投入相關協作式機器人的開發與解決方案,在機器人本體與控制器都需要因應人機協作來發展;其次是任務技巧性工作的學習,因為傳統機器人的應用,仍以自動化搬運、自動化上下料佔絕大部分的應用比例,未來將朝向研磨抛光

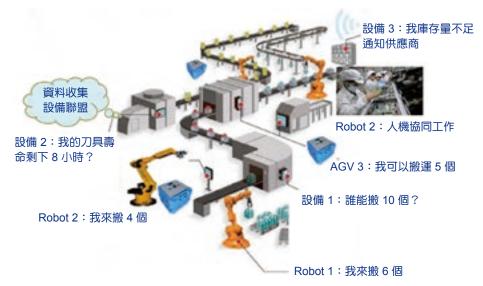


圖 12. 機器人於智慧製造應用情境。

加工應用等有技巧性的任務工作來應用,以金屬加工相關為例,製造業的機器人應用密度仍低。對於這些機器人製造商而言,發展可以應用於加工的機器人是未來的一大商機;最後是機器人彼此之間互相連結、彼此溝通協調處理,發展成為一種 social machine 的境界,這部分就需要有通訊技術、溝通協調的技術與人工智慧技術等技術來整合應用。

機器人在智慧製造未來技術發展,不論在人機協作上、技巧性任務工作上、以及 social machine 發展上,控制器必須扮演一個吃重的角色,基本上它需具備動態控制與精度提升功能,使機器人展現快穩準與最佳化運動軌跡性能,另整合視覺、力量感測、通訊、人工智慧等技術,以增加製造生產線彈性化,讓智慧機器人在智慧製造上扮演重要智慧機械設備的角色之一。

#### 誌謝

感謝經濟部技術處科技專案-關鍵製造業製程高值化拔尖計畫的支持,使本文所述機器 人技術得以進行相關研發,特此致上感謝之意。

#### 參考文獻

- 1. Please refer to the web site: http://www.ifr.org/
- 2. Please refer to the web site:

國內外工業機器人控制器品牌盤點, https://zhuanlan.zhihu.com/p/33519082

- 3. Please refer to the web site:
  - https://www.youtube.com/watch?v=a7LMHp6-USs
- 4. Siciliano, B., Khatib, O., Handbook of Robotics, Springer, 2008.
- 5. Renders, J., Rossignol, E., Becquet, M., Hanus, R., IEEE J. Robotics Automation, 7 (6), 721 (1991).
- 6. Karan, B., Vukobratovic, M., Mechanism and Machine Theory, 29 (3), 479 (1994).

#### 作者簡介

游鴻修先生為日本名古屋大學工學博士,現為工業技術研究院機械與機電系統研究所正工程師。 Hung-Hsiu Yu received his Ph.D. in from Nagoya University in Japan. He is currently a principal engineer in the Mechanical and Mechatronics Systems Research Laboratories at Industrial Technology Research Institute.

蕭欽奇先生為國立交通大學機械所博士,現為工業技術研究院機械與機電系統研究所研究員。

Chin-Chi Hsiao received his Ph.D. in Mechanical Engineering from National Chiao Tung University. He is currently a researcher in the Mechanical and Mechatronics Systems Research Laboratories at Industrial Technology Research Institute.

# 工具機主軸熱變位預測技術

# Thermal Displacement Prediction Technology of Machine Tool Spindle

盧亦軒、劉德葳、洪茂棋、蔡孟勳 Yi-Synan Lu, Te-Wei Liu, Mao-Qi Hong, Meng-Shiun Tsai

一般而言,CNC 工具機以達到高速高精度為目標,影響加工精度方面原因很多,其中熱變位的影響約佔了整體誤差的 50% 以上。因此,預測熱變位以及進行補償就成為工具機達到高精度的重要因素之一。本文首先量測在不同主軸轉速工況下,各鑄件的溫度變化趨勢以及刀尖點與平台之間相對位移量,接著建立一套溫度計的排序與篩選機制,找出關鍵的溫度量測點,最後透過類神經網路建立機台主軸的熱變位補償模型,用於驗證本文建立之溫度計排序與篩選機制,並能提高熱變位補償模型的預測精度。

In general, CNC machine tools aim at achieving high speed and high precision. There are many factors in affecting machining accuracy and the influence of thermal displacement accounts for more than 50% of the overall errors. Therefore, predicting thermal displacement with compensation algorithm becomes one of the important factors for high precision of machine tools. This paper first measures the temperature changes of each casting components and the relative displacement between the tool tip point and the platform under different spindle speed conditions. Then a sorting and screening mechanism of the thermometer is established to determine the key temperature measurement points. Finally, the thermal displacement compensation model of the machine spindle is developed by using the neural network. It is used to verify the thermometer sequencing and screening mechanism established in this paper, and it is proved that the mechanism can improve the prediction accuracy of the thermal displacement compensation model.

# 一、前言

由於機台各部件的發熱會造成鑄件甚至機台整體結構產生變形因而影響刀尖點的定位,如何降低熱變位誤差或如何補償一直是工具機追求高精度加工急欲解決的問題,在產業界上目前熱溫補技術仍以日本 OKUMA 為代表,其他廠商仍是以結構設計、熱隔離或是加強冷卻系統等主動式抑制為主,而在文獻<sup>(20)</sup> 之中,則可以了解工具機熱變位的眾多主動式補償方式,以及不同補償方法結果的比較。

而學界方面 Li 等人 $^{(2)}$  的回顧論文中做了詳盡的整理以及分析,從早期透過多元線性迴歸模型 (multiple regression model) $^{(25)}$  到後來使用有限元素法或是有限差分法來分析 $^{(23,24)}$ ,但

仍因為在邊界條件的建立、熱傳參數的鑑別以及材料特性的設定都有其不確定性存在,以至於近年來學者們廣泛的應用類神經網路進行建模,Ali<sup>(4)</sup> 與 Huang<sup>(16)</sup> 則分別使用灰色神經網路 (grey neural network, GNN)、人工神經網路 (artificial neural network, ANN)、倒傳遞類神經網路 (back propagation neural network, BPNN) 與長短期記憶網路 (long short term memory network, LSTM) 針對主軸與滾珠導螺桿的熱變位進行分析與預測。

而不管建立什麼模型,在進行模型訓練前都必須透過一連串的數據前處理與特徵萃取,避免模型產生過度擬合現象並提升有效地模型的訓練速度與提高預測精度,其中,在文獻(15)對資料前處理一書中,提到若像熱變位補償中溫度與位移量為不同維度以及不同單位的資料,在建立模型前必須先對資料做正規化 (normalization)處理。而 Li 等人(9)則透過對輸入模型的溫度資料,先做了主成分分析 (principal component analysis, PCA)處理,使模型預測更加精準。Liu 等人(6)透過計算各溫度量測點與熱變位的相關度,將相關度較低的量測點視為與熱變位較無關聯並將之去除,來達到溫度計篩選的目的。Zhou 等人(7)則是經由群聚計算將溫度量測點進行分群,並作為模型輸入源。Cheng 等人(8)則是使用皮爾森相關係數(pearson correlation)計算溫度量測點與熱變位間的相關度,在根據其相關度使用群聚計算來做篩選。

而相較於上述眾多文獻,本文提出了兩階段的溫度篩選機制,首先第一階段主要為透過斯皮爾曼相關係數 (Spearman correlation),分別計算出溫度量測點與位移資訊之間的線性相關程度,以及各溫度點彼此間的關聯性,將重複性過高的溫度點淘汰,完成初步的溫度篩選與排序。第二階段則為抽取部分數據做為 AI 模型的校驗集,將上述排序後的溫度資訊逐一導入模型中,進行遞增建模,並以預測的均方根誤差為基準,消除導致使預測誤差增加的溫度點,最後將篩選後的溫度點,作為 AI 模型的輸入源,驗證此排序與篩選制度能有效提高模型的預測精度。

# 二、主軸熱變位量測實驗

為了能模擬機台在不同主軸轉速下各元件的溫度變化與各軸向熱變位的關係,本文設計了一系列的主軸運轉實驗的工況條件,如圖 1 所示。本實驗機台的主軸最高轉速為 15,000 RPM,為了因應實際加工情形,轉速比例由 25%、50%、75、90% 與 100%,隨機分布在工況上,並且在運轉後依據轉速的高低,規劃從半小時到四個小時不等的冷卻停止時間,整體實驗總共進行了 63 小時。

本文主要使用國產的三軸銑床作為實驗載具,溫度量測部分,主要使用 OMEGA TT-E-36-SLE 熱電偶在機台上佈置 16 個溫度點,並搭配 NI-9174 CompactDAQ USB 機箱與 NI-9213 熱電偶擷取卡來量測機台各部位的溫度變化,而量測點佈置的位置如下圖 2 所示,而其所布置的位置表,如表 1 所示。

接著為了測量平台的相對位移和主軸末端效應,透過特製的測量棒與設計了一特殊的夾具固定 KEYENCE 非接觸式渦電流位移感測器的搭配進行同步量測,取得在不同主軸轉速工況下,各鑄件的溫度變化趨勢以及刀尖點與平台之間的 X、Y 和 Z 方向的相對位移量,如圖 3 所示。總共五個位移傳感器固定在夾具上,其中兩個安裝在 X 軸上方向,兩個在 Y 方向,一個在 Z 方向。

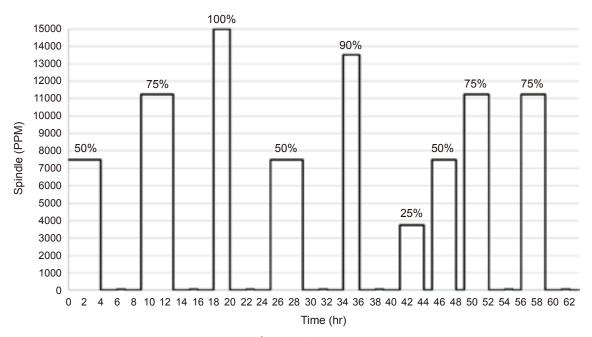


圖 1. 實驗轉速工況圖。

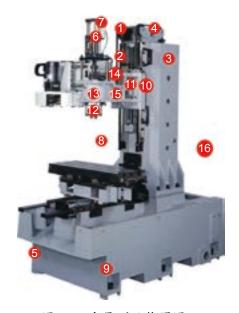


圖 2. 溫度量測點佈置圖。

# 三、溫度計分析與排序

在建立熱變位預測模型前,必須先確立模型所需使用的輸入以及輸出訊號,而主軸的熱變位,可以將其視為單一軸向的熱變位,由一維線性熱膨脹方程式可得式1。

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T \tag{1}$$

其中, $\Delta L$  為溫升所造成的主軸熱變位量, $\alpha$  為線性熱膨脹係數, $L_0$  為主軸的初始長度, $\Delta T$ 

表 1. 溫度量測點編號及所在位置。

感測器編號	佈點位置	感測器編號	佈點位置
1	立柱頂部 (左)	9	底床 (右)
2	立柱左側	10	主軸鑄件(後)
3	立柱右側	11	主軸鑄件(中)
4	立柱頂部 (右)	12	主軸(下)
5	底床 (左)	13	主軸 (上)
6	主軸馬達	14	主軸鑄件(前)(上)
7	主軸馬達 (近冷卻管)	15	主軸鑄件(前)(下)
8	腔室內溫	16	環溫

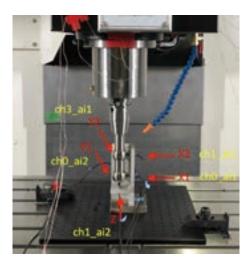


圖 3. 位移計架設方式。

則是主軸本身及周遭所產生溫度變化,因此根據上式可得知,主軸的熱變位與溫升變化成正 比的關係,因此熱變位模型的輸入訊號應為各溫度量測點的溫升,而輸出則為各軸向的熱變 位量。而在大多數的文獻中,機台皆在恆溫室進行量測實驗,因此能將環境溫度當成溫升的 基準,而本次實驗並未對環境溫度多做限制,環境溫度是隨著時間不斷在變化的,因此無 法成為基準。然而若從 16 個溫度量測點,將每個溫度量測點的初始溫度當作是個別的基準 點,則整個預測模型將產生 16 個不同的溫度基礎點,使得溫度基礎點不一致。為解決上述 的問題本實驗從 16 個溫度點中,找出一溫度變化趨勢最小的量測點,當作溫升基準點。

在建立溫度與位移的關係後,而 Li<sup>(2)</sup> 等人曾提及,在建立熱變位預測模型時,可以將一些非溫升的實驗數據,例如主軸轉速與馬達電流等,也納入預測模型的輸入數據,增加模型的預測能力。從圖 1 與圖 4 中可看出,在進行不同轉速時時,位移變化是非常明顯且即時的,相較之下溫度變化是較為緩慢的。因此,選擇將主軸轉速整合輸入數據之中,希望其能夠幫助預測不同轉速時的位移變化量。但主軸轉速以及溫升數據的單位以及維度皆不相同,在訓練過程中會造成熱變位預測模型無法收斂,因此需針對輸入資料做正規化<sup>(17)</sup> 處理,消除其單位及維度不相同的影響。

式(2)的矩陣,I 為模型的輸入矩陣,其中m 為資料的樣本數,n 為資料的特徵數。

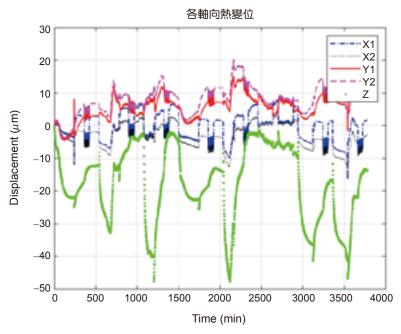


圖 4. 各軸向位移變化圖。

$$I_{m \times n} = \begin{bmatrix} i_{11} & i_{12} & \cdots & i_{1n} \\ i_{21} & i_{22} & \cdots & i_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ i_{m1} & \cdots & \cdots & i_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n}$$
(2)

首先分別計算出原始數據I的平均值 $U_j$ 與標準差 $S_j$ 

$$U_j = \sum_{k=1}^m \frac{i_{kj}}{m} \; ; j = 1, 2, ..., n$$
 (3)

$$S_{j} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^{m} (i_{kj} - U_{j})^{2}} \quad ; j = 1, 2, ..., n$$
 (4)

最後即可將輸入矩陣做正規化運算,得到一新矩陣。

$$\bar{i}_{kj} = \frac{i_{kj} - U_j}{S_j} \quad ; j = 1, 2, ..., n; \quad k = 1, 2, ..., m$$
(5)

$$\vec{I}_{m \times n} = \begin{bmatrix} \vec{i}_{11} & \vec{i}_{12} & \cdots & \vec{i}_{1n} \\ \vec{i}_{21} & \vec{i}_{22} & \cdots & \vec{i}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vec{i}_{m1} & \cdots & \cdots & \vec{i}_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n}$$
(6)

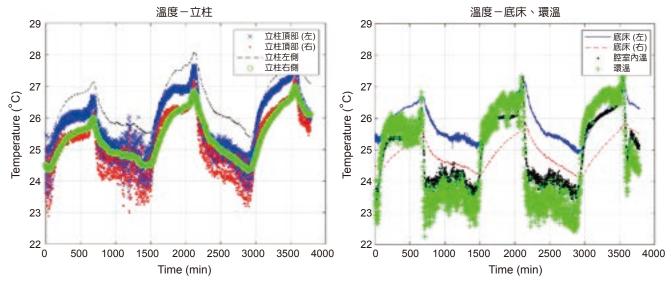


圖 5. 機台立柱與主軸的溫度變化圖。

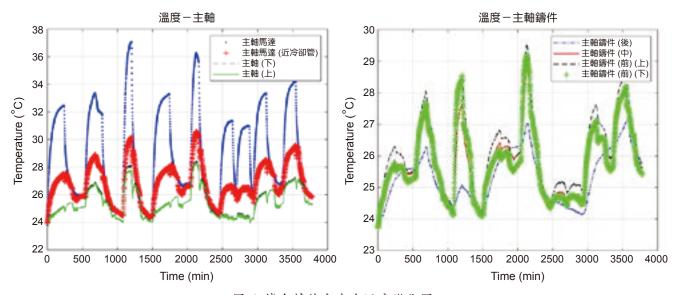


圖 6. 機台鑄件與底床溫度變化圖。

在完成數據前處理後,必須建立一套溫度計的排序與篩選機制,找出關鍵的溫度量測點,當作適當的模型輸入源,此舉不僅能防止感測器的過度安裝且能在減少模型訓練時間的同時,有效地提升模型的預測精度。

本文所使用的篩選方法主要為透過斯皮爾曼相關係數 (Spearman correlation),而斯皮爾曼相關係數,通常用於呈現兩組變數之間的關聯性,計算兩組變數之間的非線性相關度。與一般常見的皮爾森相關係數 (Pearson correlation) 相比,比較不受離群值的影響,也不需要滿足數據必須要是常態分佈的先決條件,計算所得的相關係數值會落在 ±1 之間,而數值越接近0代表相關度越小。

首先通過計算溫度點互相的關係數來獲得兩個溫度訊號的相關性。當相關係數大於 0.99 時,則將其中一溫度點刪除。此舉會將原始的 16 個溫度點減少至 11 個溫度點,接著對其餘

表 2. Z 軸初步篩選結果。

相關度值	量測點位置	量測點編號
0.904	主軸鑄件(前)(下)	15
0.898	主軸鑄件(前)(上)	14
0.881	0.881 主軸 (上)	
0.879	主軸馬達 (近冷卻管)	7
0.774	主軸馬達	6
0.756	腔室內溫	8
0.695	立柱頂部 (左)	1
0.694	主軸鑄件(後)	10
0.691	環溫	16
0.655	立柱右側	3
0.586	底床(左)	5

11 個溫度點進行排序。排序規則基於溫度點和 Z 方向上的熱變位之間的相關係數。如果相關係數較高,則代表溫度訊號與位移訊號非常相似。相關係數的計算結果和順序,如表 2 所示。

最後找尋不適合訓練模型的溫度點,即為如果將此溫度點添加到訓練集中,則可能導致預測的誤差增加。首先將其中的 168 筆,約為全部數據 10% 當作校驗集,透過逐漸增加建模中溫度點的數量,來消除導致預測誤差增加的溫度點,結果如圖 7 所示。圖中 X 軸表示溫度點的數量,Y 軸表示模型預測的均方根誤差 (root mean square error, RMSE)。第一個長條數據僅使用表 2 中的第一個溫度點主軸鑄件的前端下方。RMSE 誤差約為  $8.3~\mu m$ 。第二個長條則表示使用表 2 中前兩個溫度點的結果。從圖 7 中可以看出,添加表 2 中的第三、第四、第五和第十一溫度點可能會導致預測 RMSE 誤差增加,故消除了以上溫度點。

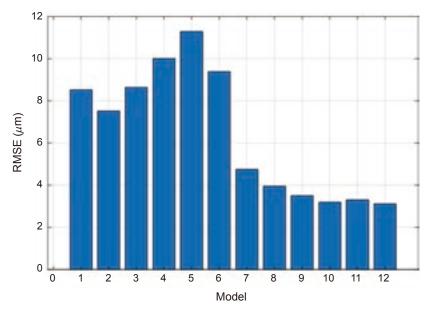


圖 7. 溫度校驗集的 Z 軸預測誤差。

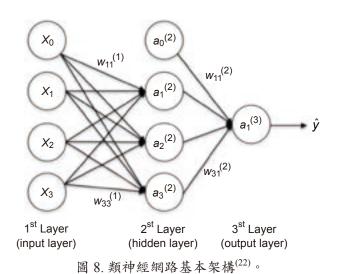
### 四、類神經網路預測模型

在對主軸的熱變位做補償前,首先必須先建立一個熱變位預測模型。而當今在熱變位預測模型當中,大致上可分為三個種類:多元線性迴歸分析、最小平方法分析以及類神經網路預測模型。在以上三者之中,多元線性迴歸分析算是其中使用最為普遍的。然而多變數回歸分析雖然建模速度快,不過卻無法完整模擬熱變位之非線性特性。而類神經網路,不僅能夠建構非線性的模型,並且與多變數回歸分析相比,能夠有較佳的預測精度。因此,本研究選擇使用類神經網路模型建立熱變位預測模型。

人工類神經網路 (artificial neural network, ANN),是一個可以模擬人類思考、運算、學習的數學模型,它由許多的神經元所組成,並將其之間做相連,來模仿生物神經網路的能力。而類神經網路的優點,則是它可以充分的逼近任意複雜的非線性問題,並且也有較高的強健性以及容錯性,而在本章將會介紹類神經網路的基本理論,以及本文所用來建立熱變位預測模型的兩種類神經網路。

人工神經元 (artificial neuron),是組成類神經網路的基本元素,也是其中最小的處理單元。每一個神經元的輸出值,將成為其他許多神經元的輸入,類神經網路的架構,基本上可以分成三個層次,分別是輸入層、隱藏層及輸出層。由一些相同作用的神經元能構成「層」,而將這些擁有不同作用的層則組成了網路,類神經網路架構圖,如圖8所示。

- 輸入層 (input layer): 從外界接收訊號,並將此訊號導入類神經網路之中,以進行訊號處理。
- 隱藏層 (hidden layer):接受輸入層的訊號,對訊號進行處理,每一層的神經元皆有和相鄰層的神經元連結。
- 輸出層 (output layer):接收網路處理後的訊號,並把結果輸出到外界。



#### 1. 一般迴歸神經網路

一般迴歸神經網路 (general regression neural network, GRNN),屬於監督式學習網路的一種,其是由機率神經網路 (probabilistic neural network, PNN) 所發展而來。GRNN 改善了機率神經網路只能處理分類方面的問題,增加了能夠處理連續變數的能力,使模型能處理線性及非線性的迴歸問題,而其模型的特性皆為建立熱變位預測模型所希望具備。

在一般迴歸問題裡,假設因變數 Y 代表系統的輸出值,自變數 X 代表系統的輸入值。 而 f(x,y) 為一個已知向量隨機變數 X 和隨機變數 Y 的聯合機率密度函數,令 x 為隨機變數 X 中的一個特殊觀測值,則 Y 在 X=x 上的條件期望值可以用式 (7) 表示:

$$E(Y/x) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} y \cdot f(x, y) dy}{\int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dy}$$
(7)

但若 f(x,y) 為未知,則必須從變數 X 與 Y 中的樣本觀測值進行估算,而 Specht<sup>(11)</sup> 等人則透過 Parzen window 的方法來估測 f(x,y),其中  $\hat{f}(x,y)$  即為以樣本值  $x^j$  以及  $y^j$  來估計出的機率函數,而 n 為樣本數,p 為向量變數 x 的維度。

$$\widehat{f}(x,y) = \frac{1}{(2\pi)^{(p+1)/2}} \frac{1}{\sigma^{(p+1)}} \sum_{i=1}^{n} e^{\frac{-(x-x^i)^T (x-x^i)}{2\sigma^2}} e^{\frac{-(y-y^i)^2}{2\sigma^2}}$$
(8)

將上式 (7) 以及 (8) 合併並整理後,可得下式 (9):

$$\widehat{E}(Y/x) = \widehat{Y}(x) = \frac{\sum_{i=1}^{n} e^{-\frac{(x-x^{i})^{T}(x-x^{i})}{2\sigma^{2}}} \int_{-\infty}^{\infty} y e^{-\frac{(y-y^{i})^{2}}{2\sigma^{2}}} dy}{\sum_{i=1}^{n} e^{-\frac{(x-x^{i})^{T}(x-x^{i})}{2\sigma^{2}}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{(y-y^{i})^{2}}{2\sigma^{2}}} dy}$$
(9)

其中  $\sigma$  為平滑參數 (smoothing parameter),為一個大於 0 的常數,也是 GRNN 唯一需要用學 習方式決定的參數。而式 (9) 可再簡化為式 (10):

$$\widehat{Y}(x) = \frac{\sum_{i=1}^{n} y^{i} e^{-\frac{D_{i}^{2}}{2\sigma^{2}}}}{\sum_{i=1}^{n} e^{-\frac{D_{i}^{2}}{2\sigma^{2}}}}, \quad D = (x - x^{i})^{T} (x - x^{i})$$
(10)

GRNN 的架構如圖 9 所示,其中輸入單元 (input units) 為分配的單元,它的作用是把所有 x 的數值分配給第二層的型態單元 (pattern unit),每一個型態單元代表一個訓練範例,當有一個新的 x 向量進入網路後,此向量減去訓練範例的向量,兩者差的平方值會被加總並輸入到非線性的作用函數。

#### 2. 長短期記憶

機台的溫度訊號及位移訊號,皆屬於有時間序列關係的資料,若使用傳統的類神經網路架構則無法完美的擷取到前後時間資料的關聯性,而遞迴神經網路 (recurrent neural network, RNN)則解決了這個問題,其能夠處理有時間序列關係的資料。

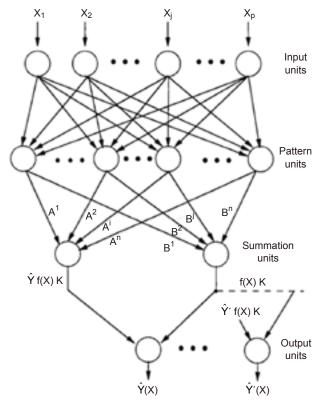


圖 9. GRNN 模型架構<sup>(11)</sup>。

遞迴神經網路相較於過去的類神經網路模型,捨棄了傳統的前饋神經網路 (feedforward neural network) 架構,使用了回饋式結構,使輸入隱藏層的資料,不僅包含當前輸入層的數據狀態,也包含了過去時間點的輸出結果,使其利於表達跟時間相關的動態行為。

根據圖 10 中,X 代表為輸入層、S 為隱藏層、O 為輸出層,U 及 V 為權重,W 為隱藏層中,將權重值從前一個時間點傳遞至下一個時間點,不過隨著時間推演,較為早期的輸入資料,在資料不斷傳遞的過程當中,影響力是不斷在衰減的,導致模型難以學習長時間資料的關係,此現象稱做梯度爆炸。

為解決梯度爆炸的問題,長短期記憶 (long short-term memory, LSTM) 的架構因此被提出,其對 RNN 隱藏層的架構進行改善,引入了記憶細胞 (memory cell) 以及閘門 (gate) 的概

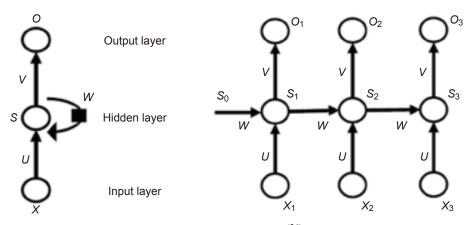


圖 10. RNN 基本架構<sup>(26)</sup>。

念,它具有三種階段:包括忘記階段、選擇記憶階段和輸出階段。通過以上三階段的運算, LSTM 可以處理長時間序列的迴歸問題,在忘記階段,它將輸入乘以忘記函數,從而減少了 不重要的輸入功能的影響;相反的,在選擇記憶階段則將重要功能傳送至輸出階段。

圖 11 為一簡單的 LSTM 模型架構圖,其中  $z^f$ 、 $z^i$  與  $z^o$  分別代表為忘記閘門 (forget gate)、輸入閘門 (input gate) 以及輸出閘門 (output gate)。 $z^f$ 、 $z^i$  與  $z^o$  向量乘以相對應的矩陣 之後,將透過一 sigmoid 激活函數將數值轉換為 0 到 1 之間,來做為閘門的狀態。而 z 則是 利用一 tanh 激活函數,將其轉換成  $\pm 1$  之間的值,作為輸入數據。

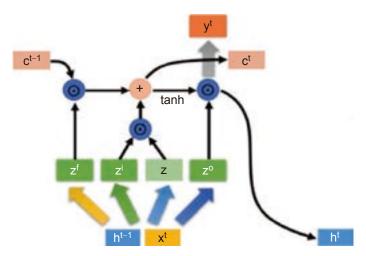


圖 11. LSTM 模型架構<sup>(23)</sup>。

$$z^{f} = \sigma(W_{f}x^{t} + U_{f}h_{t-1} + b_{f})$$
(11)

$$z^{i} = \sigma(W_{i}x^{t} + U_{i}h_{t-1} + b_{i})$$

$$\tag{12}$$

$$z^{o} = \sigma(W_{o}x^{t} + U_{o}h_{t-1} + b_{o})$$
(13)

$$z = \tanh(Wx^t + Uh_{t-1} + b) \tag{14}$$

- 忘記階段:利用忘記閘門  $z^f$ ,將上一個時間點所傳進的輸入  $c^{t-1}$  進行選擇性忘記,留下對模型重要的資訊。
- 選擇記憶階段:利用輸入閘門  $z^i$ ,對這個階段的輸入資訊  $x^i$ ,有選擇性的記憶。而當前輸入內容,由式 (13) 計算得到的 z 表示。再將此兩個階段的結果相加,即可以傳遞給下一個狀態的  $c^i$

$$c^{t} = z^{f} \odot c^{t-1} + z^{i} \odot z \tag{15}$$

• 輸出階段:最後此階段主要通過輸出閘門 z<sup>o</sup> 進行輸出資訊控制。

$$h^t = z^o \odot \tanh(c^t) \tag{16}$$

$$y^t = \sigma(Wh^t) \tag{17}$$

### 五、熱變位預測結果

首先為了訓練和評估模型的正確性,將 1680 筆數據分為兩個部分:第一部分為占 75%數據量的 1260 筆數據作為訓練集,而剩餘 25%的 420 筆數據作為測試集。輸入數據為 16個溫度資訊和主軸轉速,總共有 17個訊號,輸出訊號是渦流位移感測器在 Z 方向上測得的平台和刀尖的相對位移量。並使用上章節介紹的兩種類神經網路模型建立熱變位預測模型,期望能根據比較各模型的預測結果來挑選出適當的熱變位預測模型。

圖 12 分別為使用 LSTM 預測模型所得到的 Z 軸真實與預估熱變位量以及補償前後的比較圖。

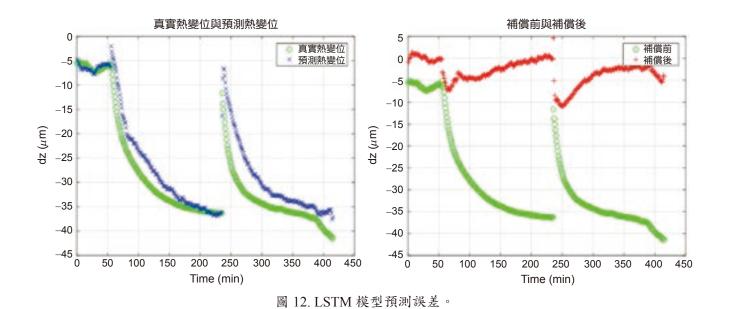


圖 13 分別為使用 GRNN 預測模型所得到的 Z 軸真實與預估熱變位量以及補償前後的比較圖。

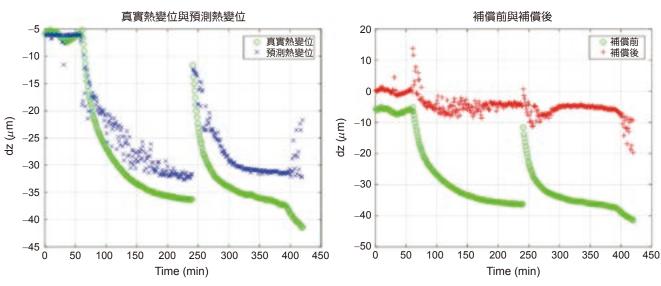


圖 13. GRNN 模型預測誤差。

表 3 為 LSTM 以及 GRNN 模型所得到的預測結果比較,可以看出不管是整體的趨勢、 測誤差連誤差範圍 LSTM 模型都是優於 GRNN,故在後續建立熱變位預測模型時,將選擇 使用 LSTM 類神經網路模型。

表 3. LSTM 與 GRNN 模型預測比較。
--------------------------

模型種類	誤差範圍 (μm)	RMSE (μm)	溫度計數量
LSTM	-11 - 4.4	4.12	16
GRNN	-20 - 14.2	5.64	16

根據上述篩選所得的溫度量測點與轉速當作是模型之輸入數據,導入至 LSTM 訓練模型中,利用占 75% 數據量的 1260 筆數據作為訓練集,建立 Z 軸方向熱變位預測模型,最後扣除用來篩選的 10% 校驗集資料,將剩下 15% 的 252 筆數據設定為測試集資料來驗證模型。

從圖 14、圖 15 與表 4 中可以看出,溫度點的數量從 16 個減少到 7 個,而預測 RMSE 也從  $4.29\,\mu\mathrm{m}$  減少到  $1.57\,\mu\mathrm{m}$ 。

# 六、結論

本文採用兩種不同的類神經模型來預測熱位移,相較之下 LSTM 模型在預測中比起 GRNN 不管在誤差範圍或 RMSE 方面都擁有較佳的預測結果。而為了減小溫度訊號的數量並提升模型運算效率,本文提出了一個溫度點排序與篩選的機制,首先透過計算溫度點和熱位移之間的相關係數,消除相似的溫度點,進而避免產生過度擬合現象,接著逐一增加訓練模型的溫度點數量,可以觀察出不適合訓練模型的溫度點會使預測誤差增加,因此也將其移除。通過以上的篩選機制,溫度點可以從 16 個減少到 7 個,進而使 LSTM 模型的訓練時間減少 56.9%,且與使用所有溫度點的預測模型相比,RMSE 從 4.29  $\mu$ m 減少到 1.57  $\mu$ m。

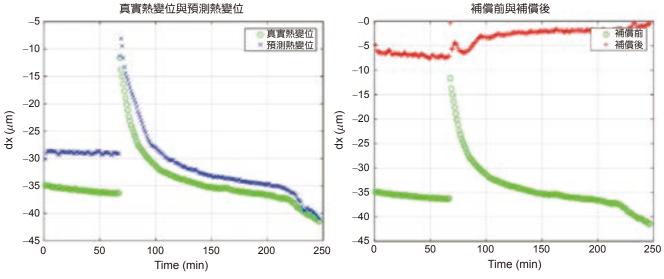


圖 14. 溫度篩選前 Z 軸預測熱變位及預測誤差。

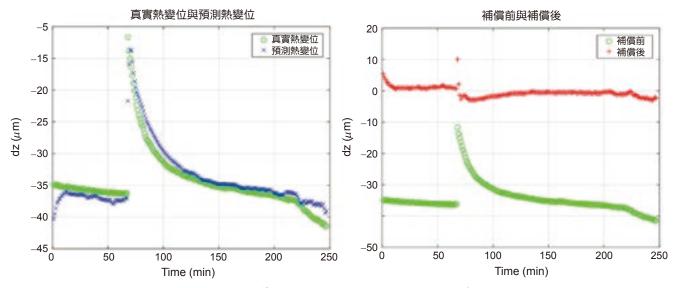


圖 15. 溫度篩選後 Z 軸預測熱變位及預測誤差。

表 4. Z 軸向篩選前及篩選後預測比較。

	誤差範圍 (μm)	RMSE (μm)	溫度計數量
篩選前模型	-7.6 - 0	4.29	16
篩選後模型	-2.8 - 10	1.57	7

#### 參考文獻

- 1. R. Ramesh, M.A. Mannan, A.N. Poo, Int. J. Mach Tools Manuf, 40, 1257 (2000).
- 2. Yang Li, Wanhua Zhao, Shuhuai Lan, Jun Ni, Wenwu Wu, Bingheng Lu, Int. J. Mach Tools Manuf, 95, 20 (2015).
- 3. Michael Gebhardt, Josef Mayr, Nils Furrer, Tobias Widmer, Sascha Weikert, Wolfgang Knapp, *Manuf Technol*, **63**, 509 (2014).
- 4. Ali M. abdulshahed, Andrew P. Longstaff, Simon Fletcher, Akshay Potdar, J. Manuf Sys, 41, 130 (2016)
- 5. Enming Miao, Yi Liu, Hui Lui, Zenghan Gao, Wei Li, Int. J. Mach Tools Manuf, 97, 50 (2015).
- 6. Quan Liu, Yuting Chen, Ping Lou, Junwei Yan, Jiwei Hu, Angran Xiao, J Adv Mech Design Sys Manuf, 12, (2018).
- 7. Zude Zhou, Jianmin Hu, Quan Liu, Ping Lou, Junwei Yan, Jiwei Hu, Lin Gui, Adv in Mech Eng, 11, (2019).
- 8. Cheng Chen, Chenyang Zhang, Hong Chen, ICEMI, 220 (2011).
- 9. Yang Li, Wenming Wei, Dongxu Su, Wanhua Zhao, Jun Zhang, Wenwu Wu, Int J. Adv Manuf Technol, 99, 1341 (2018)
- 10. Fengchun Li, Tiemin Li, Haitong Wang, Yao Jiang, Appl Sciences, 7, 82 (2017).
- 11. Donanld F. Specht, IEEE T Neural Networ, 2, 568 (1991).
- 12. Isabelle Guyon, Andre Elisseeff, JMLR, 2, 1157 (2003).
- 13. Kuo Liu, Yu Liu, Mingjia Sun, Xiaolei Li, Yuliang Wu, Int. J. Mach Manuf Technol, 87, 2285 (2016).
- 14. 張斐章, 張麗秋, 類神經網路導論:原理與應用, 二版, 台中: 滄海, (2010)。
- 15. 涌井良幸, 涌井貞美, 圖解多變量分析: 透視資料本質的科學分析工具, 初版, 台北: 鼎茂, (2009)
- 16. 黃子峻, 深度神經網路應用於雙軸平台之熱誤差估測, 國立中正大學機械工程研究所碩士論文(2018)。
- 17. 鄭志鈞, 蔡秉均, 陳韋任, 王信鈊, 蘇紹榕, 機械新刊, 28, 48 (2019)。
- 18. Zhengchun Du, Siyu Yao, Jianguo Yang, Int. J. Precision Eng and Manuf, 16, 1571 (2015).
- 19. Qianjian Guo, Rufeng Xu, Xiaoni Qi, The Open Mech Eng J, 9, 678 (2015).
- 20. Please refer to the web site:
  - http://dmlab.nchu.edu.tw/IMT/

- 21. Please refer to the web site:
  - https://www.youtube.com/playlist?list=PLJV
- 22. Please refer to the web site:
  - https://www.quora.com
- 23. Mian N, Fletcher S, Longstaff AP, Myers A. Precision Eng, 37 372 (2013).
- 24. Bossmanns B, Tu JF, Int. J. Mach Tools Manuf, 39, 1345 (1999).
- 25. Chen J, Yuan J, Ni J, Int. J. Mach Manuf Technol, 12, 266 (1996).
- 26. 強振平, 何麗波, 陳旭, 徐丹, 中國圖像學報, 24, 447 (2019)
- 27. 盧亦軒, 應用長短期記憶網路於工具機主軸熱變位預測, 國立中正大學機械工程研究所碩士論文 (2019).

#### 作者簡介

洪茂棋先生現為國立台灣大學機械工程所博士生。

Mao-Qi Hong is currently a Ph.D. student in Department of Mechanical Engineering at National Taiwan University.

盧亦軒小姐為國立中正大學機械碩士。

Yi-Synan Lu received her M.S. in Mechanical Engineering from National Chung Cheng University.

蔡孟勳先生為美國賓州大學機械博士,現為國立台灣大學機械系教授。

Meng-Shiun Tsai received his Ph.D. in Mechanical Engineering from The Pennsylvania State University. He is currently an associate professor in Department of Mechanical Engineering at National Taiwan University.

劉德葳先生為國立虎尾科技大學機械碩士,現為國立中正大學專任助理。

Te-Wei Liu received his M.S. in Mechanical Engineering from The National Formosa University. He is currently a project assistant in Department of Mechanical Engineering at National Chung Cheng University.

# 航太零件難削材之智慧製造技術

# Techniques of Intelligent Manufacturing for Difficult-to-cut Material Applied in Components of Aerospace Industry

李政男、謝旻璋 Jeng-Nan Lee, Min-Jhang Shie

航空產業向來具備嚴格品質系統認證及高複雜之整合技術,世界各國均以航空產業作為國家產業技術能力指標。依航空器零件組成成本而言,發動機約佔其中 27%,僅低於機身的 38%。波音 757 的發動機以鈦合金 (titanium) 38% 與鎳基合金 (nickel) 37% 為主要材料製成。如無這些材料,噴射引擎將無法操作在所需要的條件。然而,鈦合金、鎳基合金等材料,在高溫時有良好的機械性質,使得該材料在切削加工時,切削力大,散熱速度慢、導致高的刀具溫度、以及材料加工硬化,因而難以有效率的進行切削加工,特別是在具有複雜扭轉曲面且薄板特徵的超合金葉輪,其技術難度更深,因此相關航太業者對其切削製程技術有迫切的需求。基於此,本文以難削材製程技術為主軸,介紹傳統切削加工與非傳統加工之發展,並探討智慧製造技術於航太產業之應用。

Titanium alloys and nickel-base super alloys are widely in the manufacture of components for aircraft turbine engines because of their ability to retain high strength at elevated temperatures. Because of its high strength, poor thermal diffusion and work hardening, the cutting of these alloys results in the life of tools and efficiency of works for the worse. So the encountered great difficulties in machining difficult-to-cut materials must be solved. To development and application of key technologies be quickly, and create new cutting technology, so as to meet the demand of aerospace industry. The paper will use the development and manufacture of aerospace components with difficult-to-cut material as examples to introduce five-axis machining, hybrid process, rotary ultrasonic-assisted machining process, and on-line measurement basic technique. The research and development of the intelligent manufacturing technologies for aerospace industry also be discussion.

## 一、背景介紹

航空產業向來具備嚴格品質系統認證及高複雜之整合技術,世界各國均以航空產業作為國家產業技術能力指標。依據 Boeing 公司之市場預測報告(Commercial Market Outlook),未來 20 年 (2018-2037) 航空運輸平均年成長率為 4.7%,衍生航空製造業商機。因此,估計未

來二十年全球新客機需求約 42,000 架,市場價值高達美金 6.3 兆,其中亞太地區的新機需求最為旺盛。在經濟部相關單位的推動與輔導下,我國航空產業已建構相關民用航空產品之供應鏈體系,與波音、空中巴士、龐巴迪、奇異、普惠、史奈克瑪等世界知名航太大廠建立合作夥伴關係。我國航空產業總產值,2018 年度為新臺幣 1,207.25 億元,較前一年成長約11.27% (圖 1)。因業者接單幾乎都是中長期,產業變動性不大,又自 2016 年起,政府推動國機國造,自製高級教練機,以及後續軍用航空器等計畫,使得航空產業成為發展亮點。航空產業近期景氣欣欣向榮,業界求才若渴,近 2 年該產業將開出上千名職缺,成為極具競爭力之產業(1.2)。

#### 新臺幣億元



經濟部針對國內航空產業的狀況及未來發展趨勢,已將航空產業列為推動產業高值化的 重點項目,規劃「提升國際供應鏈位階」、「開發利基型航空系統件」、「開拓亞太市場及 布局全球」及「運用航空技術開發高附加價值產品及應用服務」四大策略。未來將持續引進 航空級技術,進一步推動國內傳統產業轉型投入航空產業,擴大產業規模,促進航空產業高 值化,成為穩定國家出口收益的核心產業。

依航空器零件組成成本而言,發動機約佔其中 27%,僅低於機身的 38%,全球目前能完全自主研發先進航空發動機的國家僅限於美、英、法、俄等國。以驅動原理區分,航空發動機有三大類型:渦扇 (turbofan)、渦槳 (turbopro)、渦軸 (turboshaft),分別應用於噴射機、螺旋槳、及直昇機等機型。渦扇發動機因具備高效率、低噪音、小體積、高可靠度設計等特性,目前居飛機市場之大宗。波音 757 的渦扇發動機包括如下非鐵金屬及合金:鈦合金 (titanium) 38%、鎳基合金 (nickel) 37%、鉻 (chromium) 12%、鈷 (cobalt) 6%、鋁合金 (aluminum) 5%、鈮 (niobium) 1%、鉭 (tantalum) 0.02%。如無這些材料,噴射引擎將無法操作在所需要的條件與動能 (如圖 2 所示)。

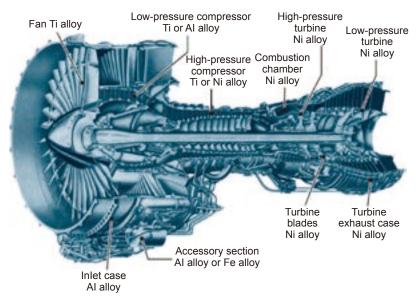


圖 2. 航空發動機之之元件與合金材料 (Jet engine PW2037)。

鈦合金 ( $^{\alpha}$ -type、 $^{\alpha+\beta}$ -type、 $^{\beta}$ -type) 具備極佳的強度密度比與耐蝕性,也因其質量輕、耐腐蝕、耐高溫、疲勞強度大、熱膨脹係數小、非磁性、以及非毒性之金屬材料,且可藉由陽極處理產生多重色彩,因此廣泛應用於航太工業與日常生活中。然而,因為鈦合金本身的物理性質,例如高強度、難以切削、易產生切削顫振、熱傳導率低及熱膨脹係數小而導致切削溫度高、以及加工時產生的高溫,會使化學反應性強的鈦合金與刀具材料產生化學反應,導致刀具磨耗、破損,而影響刀具壽命 (高化學親和性) 等<sup>(3)</sup> (圖 3(a))。

鈦合金除了應用在航太工業、車輛、與運動器材等產業,近些年來新興醫療產業的發展迅速,如醫療植入物骨釘與骨板的加工生產、人工牙根的生產製造,其使用的材料皆以不鏽鋼(SUS316LVM)與鈦合金(Ti-6Al-4V ELI And Pure Ti)為大宗,主要在於其材料與人體的親和度良好,不易產生化學變化。尤以目前對鈦合金的發展趨勢逐日提升,因為該材質被定義屬於難切削材,故對其切削加工參數有迫切的需求,期望找出符合該切削加工之最佳條件因子與水準。對鈦和鈦合金進行銑削時,應採用順銑,宜用直徑小、齒數多的銑刀,這樣可以減少振動,通常銑削鈦的銑刀刀齒的後角比普通銑刀大 30-50%,如果崩刀,後角可取小些。前角一般選用正前角,若加工有困難,前角應減少0度或為負角。對於銑削來說,正確選擇潤滑冷卻液十分重要,一般宜用易溶於水的潤滑冷卻液,添加方式以噴霧狀噴射為好。

高溫合金可分為鐵基、鐵鎳基、鎳基、鈷基四種,其中鎳基超合金的含鎳量在 50% 以上,工作溫度可達 1000°C,通過固溶、時效方法強化,可得到較理想強度與抗熱變性能,因此廣泛地應用於航空發動機中。鐵基高溫合金以鐵為基底,適用於工作溫度較低的零件。鐵鎳基高溫合金含鎳量在 30%-40%,此類合金具備比鎳基、鈷基更高的抗拉強度,適用於比鐵基合金稍高的工作溫度環境。鈷基高溫合金以鈷為基底,約佔 45%-60%,加入 Cr、Ni、C、W、Mo、Fe 等以提高耐熱強度。

Inconel 718 鎳基超合金 (鎳量在 50%-55%) 由於在高溫 (700°C) 下仍有良好的機械強度、疲勞限、以及高溫耐蝕性,故廣泛應用於高溫、高負荷、以及需耐腐蝕的環境<sup>(3)</sup> (圖 3(b))。然而由於 Inconel 718 鎳基超合金的熱傳導係數與比熱值均很小,且在高溫時有良好的機械性質,使得該材料在切削加工時,切削力大,散熱速度慢、導致高的刀具溫度。切屑

與刀具的積屑刀口 (Build-up edge) 現象,容易在切削鎳基超合金時發生。除此之外,Inconel 718 鎳基超合金具有沃斯田鐵型的基地,其中 Nb 的含量又較其他合金高,容易析出堅硬的 $\gamma''$ (Ni<sub>3</sub>Nb) 二次相,造成切削時的加工硬化。使得刀具迅速磨損。

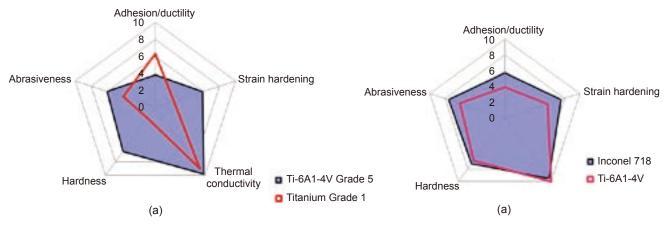


圖 3. 難削材 (鎳基合金、鈦合金) 特性分析。

航太零件難削材之應用以葉輪為例,它是現代航空發動機重要且新穎的元件之一,最早是應用在直昇機的小引擎上。在 1980 年代,則被使用在軍事飛機發動機上,且快速地被商用渦輪風扇與渦輪螺旋槳式飛機採用。它的優勢包括:(1) 輕量化 (一般可減重 20-30%):由於使用較少的葉片。(2) 葉片根部與碟盤一體式。(3) 較高的空氣動力學效率。(4) 提升使用壽命,不會因接和部位的腐蝕影響其疲勞強度。然而,BLISK 亦有其缺點,主要是在其製造與修復時,難以加工 (複雜扭轉曲面與難削材) 與價格昂貴。且為了確保其可靠度,嚴格地品質控制是必要的製程。一般飛機引擎與工業用氣體渦輪機其壓縮器葉輪的結構,是以獨立的葉片以銲接或鎖固式的方式定位在碟片上。而 BLISK 是 blade 與 disk 首字母的縮寫(BLaded 與 dISK),BLISKs 也被稱為整合式葉片轉子 (integrated bladed rotors, IBR),意旨葉片根部幾何與定位槽不再需要,其碟盤轉子與葉片是一體式設計,(如圖 4 所示)<sup>(4)</sup>。Martin Busmann, Dr. Erwin Bayer<sup>(5)</sup>,說明現今引擎結構中一體式葉輪壓縮器與 BLISK 製造科技發展現狀,以及未來在 BLISK 製造上科技的應用與滿足功能、品質與成本的挑戰。文中亦介紹為達成減重需求的兩種重要的設計製造方式,一是將個別的 BLISK 銲接成多級的 BLISK Drum;另一是中空風扇葉片技術。為了應用在高應力的渦輪段中,雙材料 BLISK 的製造可行性正在進行研發。另外在 BLISK 的設計方面,需顧及將未來修復的科技與方式。

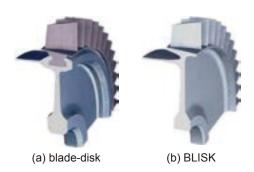


圖 4. Mechanical attachment blade-disk and of a BLISK。

#### 二、五軸加工技術於航太元件製程開發

自由曲面 (free-form surface) 又稱為雕刻曲面 (sculptured surface),已廣泛的應用於現代工程設計中以取代放樣曲面 (lofting surface) 的技術,例如汽車板金模具、射出成型模具、渦輪葉片、船舶螺旋槳以及航太零組件等。基於性能的考量,這些產品特徵均是複雜三維曲面,如以傳統的三軸工具機進行加工,除了原有效率、精度不佳的缺點須要克服外,亦須考慮重複定位所產生的誤差以及夾治具設計與製造的成本。這些因工具機自由度與選用刀具的限制,若採用五軸加工將可以克服。

理論上多軸加工遠比傳統的三軸加工在製造上具有更多的優勢,其中包括較高的生產力與較佳的加工品質<sup>(6)</sup>。然而,在實務上多軸加工也存在許多缺點,這些缺點大部分是有關於多軸工具機中刀具同動的複雜性、刀具與曲面的干涉 (interference)、碰撞 (collision) 等問題<sup>(7)</sup>。由於增加了兩個旋轉自由度,多軸工具機不僅提供加工上的彈性,亦衍生一些新的問題,這些問題包括傳統的 CAD/CAM 系統無法充分支援;在刀具與相鄰的曲面間的過切與碰撞檢測演算法相當困難<sup>(8)</sup>;由於多軸工具機複雜的結構,因此工具機的動態精度須要更為嚴謹<sup>(9)</sup>;對於多軸 NC 資料的處理,工具機的控制器設計須更為複雜,如此刀具路徑經插值器處理後才能確保加工的精度<sup>(10)</sup>。

目前具有多軸加工功能的商用 CAD/CAM 軟體仍然相當昂貴,且在複雜曲面加工時,指定刀具方位與刀具路徑分佈方面相當缺乏彈性,一般須嘗試多次才能成功<sup>(11)</sup>。傳統上刀具的方位在加工的過程中通常保持定值,例如在刀具運動的過程中,刀具方位偏離曲面法向量一定的角度,範圍大約從。雖然此方法比三軸球形銑刀的加工更有效率,但是過切的問題仍然存在,且留在曲面的餘料須要以人工的方式研磨去除。而這些問題在曲面更複雜時將會愈嚴重。

#### 1.切削工序製程規劃

現今產品曲面的設計漸趨複雜,多軸工具機所提供的自由度,具有避免干涉、減少重複定位誤差與降低夾治具成本之優勢,以其進行曲面之加工時,可使得產品的製程更具彈性且自動化,符合當前製造業面臨競爭環境的要求。對於難削材(鈦合金、鎳基超合金)之加工需求,基於精密零組件之複雜曲面與幾何特徵,建立其製造程序(定位加工與多軸同動加工模式),考慮切削顫振與加工模式,規劃設計相應之夾治具、工具機。經線上切削力分析之輔助,規劃等切削力之刀具路徑。以離心葉輪(impeller)為例,葉面粗加工使用次擺線加工,此方式的優點在於等量切削延長刀具壽命,並且可藉由較大切深來減少粗加工時間。葉輪曲面精加工模式,包括點接觸切削加工以及側刃切削技術,其選用準則在於曲面扭轉程度與曲面公差。如曲面曲率變化較為平順,則基於切削效率考量,側刃切削技術遠優於點接觸切削加工,但若曲面嚴重扭曲時,側刃切削所導致過切與過餘將不容忽視。圖 5 為航太超合金葉輪之五軸數控加工程式設計流程圖。圖 6 所示為以鈦合金葉輪為範例之製程系統流程分析。

#### 2.五軸工具機後處理程式開發技術

後處理是加工程式設計與製造間的重要界面,一般而言,後處理程式將刀具位置資料轉換成加工操作所需要的資料,如程式原點設定、機械原點設定、主軸轉速、刀具進給、刀具座標控制點,如此 CNC 工具機接受這些資料碼後,就能進行數控加工。由於工具機控制器

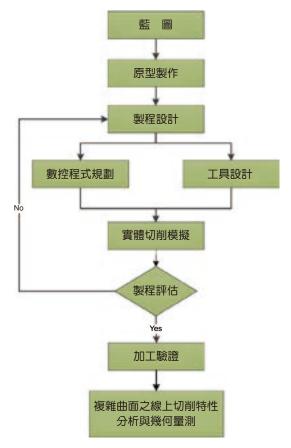


圖 5. 航太超合金葉輪之五軸數控加工程式設計流程圖。



圖 6. 鈦合金葉輪五軸車銑複合數控加工程式設計系統流程分析。

製造廠家,往往未能遵循國際標準定義控制碼,造成後處理轉換必須根據各類型控制器定義相關的控制碼,而如果工廠有多部不同控制器的工具機時,就必須準備不同的後處理來轉換,因此後處理就顯得更加重要<sup>(12)</sup>。

由於工具機結構是由各個連桿接頭組合而成的運動鏈 (kinematics chain),其接頭不外乎是滑動對或旋轉對。所以由運動學上的運動鏈關係,有效地描述工具機刀具在空間中的運動軌跡,導出工具機能提供切削刀具的幾何運動範圍,如此即決定工具機的主要功能,此即Reshetov及Portman<sup>(13)</sup>提出的工具機形狀創成函數觀念。後處理程式的推導乃藉由這個觀念求得五軸工具機的形狀創成函數矩陣,進而藉由反向運動學,解出控制工具機的各軸參數方程式。因此多軸工具機接頭限制與後處理程式之推導,乃基於前向運動學及反向運動學之原理。應用齊次座標轉換矩陣,描述多軸工具機各軸間以及刀具之相對位置關係(前向運動學),再令此矩陣與所規劃之刀具位置矩陣相等,即可解出多軸工具機所需之各軸運動參數方程式(反向運動學)(如圖7-圖8所示)。

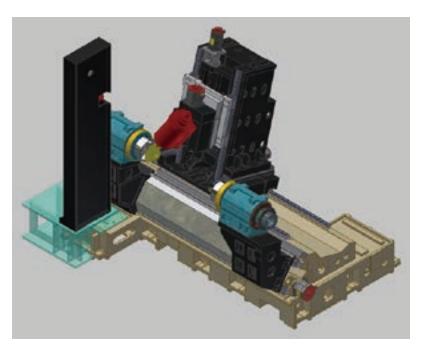


圖 7. 主軸傾斜型五軸工具機構形示意圖 CK: Swivel head and a rotary table type。

#### 3.實體切削驗證與虛擬誤差分析

為了避免五軸刀具路徑與曲面會有所干涉,必須經由實體切削模擬加以驗證,而在一般 CAM 軟體中進行的模擬都是以讀取刀具位置檔為主,無法得知是否有所干涉碰撞。另,所建立的五軸刀具路徑是否能滿足加工的公差要求,亦必須透過 NC 程式切削模擬才能準確判斷。因此本文在切削模擬軟體中建立實際切削測試相同的五軸虛擬工具機,機台構型為傾斜旋轉工作檯與搖擺頭旋轉工作檯,控制器方面,一部 BK Type (MDV-551) 是 FANUC 系統,另一部 CK Type (TMS-2500S) 則是採用 SIEMENS 系統,其控制器、軸向、原點、刀具數、刀具參數,都與實際使用之工具機相同。

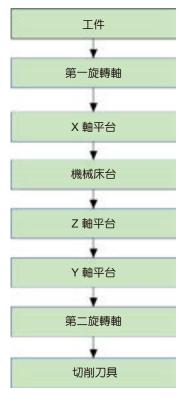


圖 8. 五軸工具機機構鏈流程圖。

本文以鈦合金離心葉輪為例,透過實體切削模擬軟體之輔助,進行虛擬製造與誤差分析,一方面確認刀具路徑是否正確,以避免刀具、工件、治具、與機台之碰撞,如圖9至圖10所示。另一方面基於公差需求,須驗證所規劃的加工製程、與產生刀具路徑所設定的弦差與間距是否滿足要求。如圖11至圖12所示。藉由誤差比對分析,可進一步調整刀具路徑設定條件。

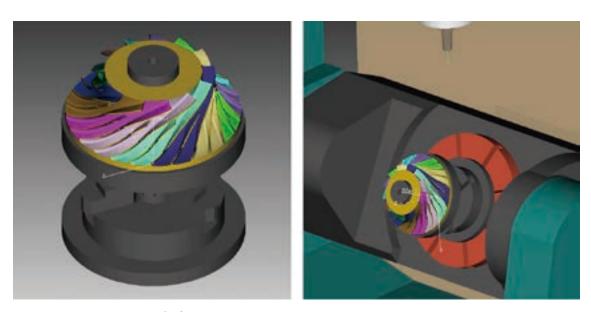


圖 9. 離心式葉輪精銑加工 BK Type (MDV-551-FANUC 控制器)。

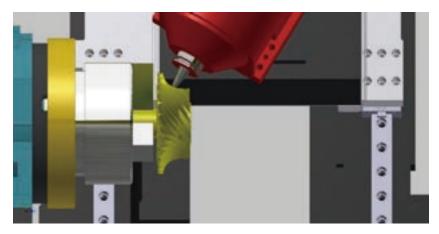


圖 10. 離心式葉輪精銑加工 CK Type (TMS-2500S-SIEMENS 控制器)。

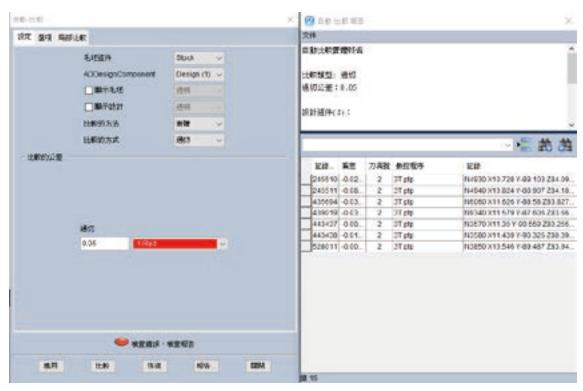


圖 11. VERICUT<sup>TM</sup> 過切分析比對。

## 三、多軸加減法複合製程技術 (CNC+3D printing)

再製 (remanufacturing) 亦被稱為損換失效元件再利用 (ultimate form),此製程的能源消耗、成本以及所需材料,僅是新品的一部份。一般機械元件的再製,必須仰賴技術純熟的技師與一連串勞力密集的作業,且常需要再製造商與外包商之間往返。而此再製形式,對於需嚴格品質管制及生產時效考量的高值化元件 (渦輪葉片、BLISK) 而言相當困難。在修復的製程,利用高速金屬移除製程 (切削或磨削)、線上掃描及檢測技術、雷射熔覆與銲接(cladding/welding),已有自動化的設備基礎,但尚未整合至商品化可用階段。目前一般葉

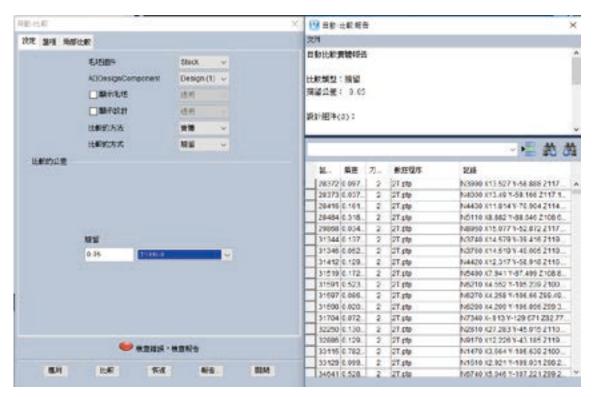


圖 12. VERICUTTM 殘餘分析比對。

輪的修復方法,許多製程仍然仰賴人力,隨這 CNC 設備的發展,熔覆前的研磨、熔覆、銑削、研磨與拋光等,逐漸由工具機取代人力。目前最新的技術發展包括:(1) 將相關製程與檢測安排於同一製造單元,並透過機械手臂進行串連;(2) 將這些製程整合於一工具機中,形成具智能化且複合化的數控工具機 (milling + inspection + laser cladding + inspection + laser heat treatment),例如 Huffman Corp, TRUMPF Laser GmbH, HAMUEL Maschinenbau GmbH & Co. KG,東台精機等。

於 2008 年以英國為基礎的 8 個單位所組成的聯合團隊<sup>(14)</sup> (包括:Delcam、Renishaw、Electrox、TWI、Precision Engineering Technologies、Cummins Turbo Technologies、Airfoils Technology International、De Montfort University) 基於成本、快速且可靠的再製應用,已經開發出一完全整合地生產系統與軟體,在最少人為的干預下針對高值化元件進行修復。此計畫簡稱為 RECLAIM (REmanufacture of high value products using a Combined LAser cladding, Inspection and Machining system),此計畫將使得英國於再製方面的科技領先其他國家。此單一平台包括:(1) 高速掃描模組;(2) 快速電射熔覆;(3) 高效率加工;(4) 適應性 CAD/CAM系統;(5) 系統自動化;(6) 工作流管理。此新系統聚焦在損壞元件的修復、新金屬元件的製造、淘汰零件的更新、更新標準零件。Jason Jones 等人<sup>(15)</sup>,探討 RECLAIM 的研究與開發。以航太渦輪葉片的修復為例,包括元件對位、缺陷辨識、缺陷移除、缺陷修復、以及精加工,此系統本質是以最大彈性以面對再製環境中所存在的最多變數。對於渦輪葉片、BLISK等高值化元件,在新品製造與修復的製程,利用電射熔覆 (AM/cladding) 加減法複合製程技術,可節省時間與成本,如圖 13 多軸加減法複合製程的優勢,圖 14 為雷射熔覆 (AM/cladding) 製程技術示意圖,圖 15 所示為新穎葉片修復 (repairing) 技術。

#### Hybrid: The Best of Both

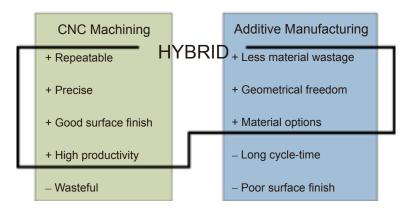


圖 13. 多軸加減法複合製程的優勢。

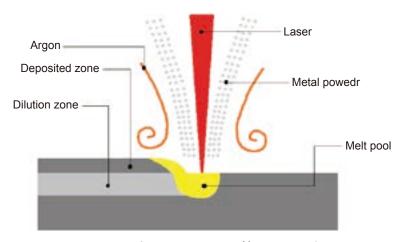


圖 14. 雷射熔覆 (AM/cladding) 製程技術示意圖。

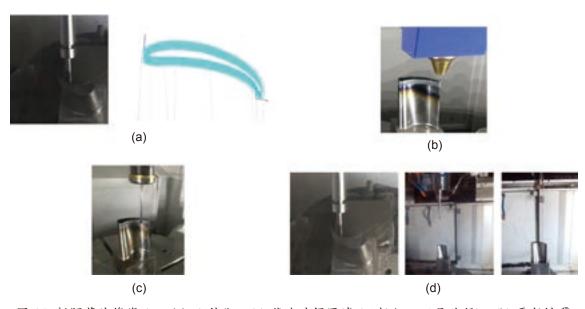


圖 15. 新穎葉片修復 (repairing) 技術。(a) 移除破損區域 (五軸加工刀具路徑),(b) 雷射熔覆 積層製造 (五軸熔覆路徑),(c) 線上量測與幾何分析,(d) 分層進行五軸切削加工。

#### 四、旋轉超音波輔助切削加工技術

脆硬材料 (陶瓷、氧化鋯、藍寶石、玻璃、矽晶圓) 與複合材料等先進材料,分別有其優越的性質,因此工程應用方面 (半導體、光電、航太、醫療器材、能源、電動車、3C 電子、精密機械) 日趨廣泛。然而,要成形或加工此類硬韌和耐高溫的先進材料至正確的尺寸與幾何相當困難,以目前的科技與技術需要較高的加工成本與時間,在應用上受到限制。因此,針對這些先進材料發展一可靠且具成本效益的製程是相當重要的。迴轉式超音波 (rotary ultrasonic machining, RUM) 相對於目前非傳統加工製程而言,成本相對低廉,較環保且適合於傳統加工環境的地基要求。

迴轉式超音波加工是一複合加工製程 (非傳統加工製程),其結合鑽石工具的材料移除機制,以及超音波加工 (ultrasonic machining, USM) 製程,在軸向刀具的高頻率振動及高速迴轉等雙重運動下,形成一種結合研磨以及衝擊破壞材料加工技術,可輕易加工高硬度以及脆性材料,同時也可降低 30-70% 刀具/磨棒接觸材料時所產生的切削應力 (依據材質而有所不同),因而提昇刀具壽命和表面品質,且具有比鑽石研磨與超音波加工更優越的材料移除率 (material removal rate, MRR)。在旋轉超音波輔助切削應用方面,包括鑽孔、銑削、與拋光製程,加工效率、刀具磨耗壽命及表面粗糙度為主要的考量。微鑽孔之技術應用主要在於高分子材料、複合材料、金屬、非金屬 (玻璃、藍寶石),鑽削延性材料時會伴隨毛邊產生,然而鑽削脆性材料、複合材料時會造成材料邊緣崩裂、破損的現象,實驗證實利用超音波振動可改善鑽孔中毛邊產生(16,17);於旋轉超音波輔助銑削方面,在於陶瓷、藍寶石脆硬材料之曲面加工,研究重點在於材料移除率與製程參數間的關係,參數包括振幅、靜態力、轉速、磨粒數目、與磨粒直徑(18);拋光技術部分,主要在於藍寶石脆硬材料之表面加工。圖16 所示是本系的旋轉超音波輔助五軸加工機 (東台精機股份有限公司),圖 17 微孔加工之應用,圖 18 至圖 19 人工齒冠 (鈦合金、醫療陶瓷) 複雜曲面加工。

## 五、複雜曲面之線上切削特性分析與幾何量測技術

基於研究難削材製程切削模型、加工大數據雲端化、協同工具機智慧運行、以及刀具壽命檢知與斷刀預測之需求,透過一具有感測器之刀把,將切削過程中的軸向力、扭矩、X-Y

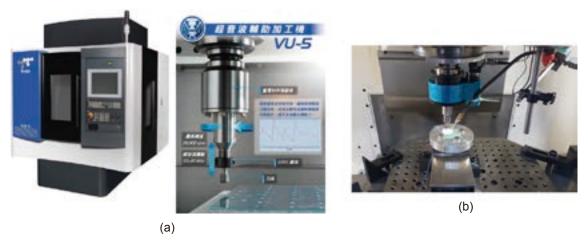


圖 16. 旋轉超音波輔助加工設備。(a) 旋轉超音波輔助五軸加工機,(b)超音波加工模組。

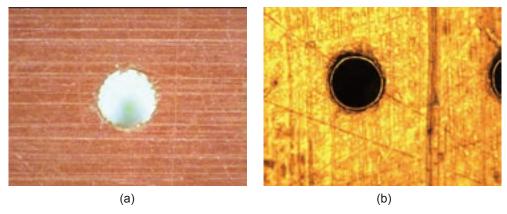


圖 17. 應用迴轉超音波於微孔加工毛邊減化之應用 $^{(17)}$ 。(a)  $\phi$ 0.3 mm 厚度 2 mm (酚醛樹脂),(b)  $\phi$ 0.1mm 厚度2 mm (黃銅)。

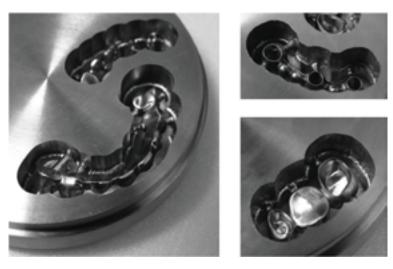


圖 18. 人工齒冠 (3 齒、6 齒、8 齒) 旋轉超音波輔助切削加工 (TiAl<sub>6</sub>V<sub>4</sub>)。

方向的彎矩以及溫度,即時量測並輸出至電腦端,作為刀具壽命評估、刀具設計開發、製程改善、以及提升生產率的依據。藉由實際切削測試評估所收集的切削特性資訊,可作為切削加工刀具選用參考,及刀具路徑規劃 (等切削力)的依據,線上切削特性量測設備如圖 20 所示,圖 21 所示為四刃銑刀切深寬比研究模型,材質:SUS304不銹鋼,刀具:直徑 16 END MILL-4 Flutes,工具機:TMV-850A 三軸機 (東台精機股份有限公司)。圖 22 所示為刀具壽命檢知與斷刀預測。

線上量測 (In-process measurement) 是指在生產線上即進行量測的工作,當曲面切削完成之後,將工具機的刀具換成探頭 (probe),直接在工具機上進行量測。線上量測不須裝卸工件即可初步檢驗尺寸,其結合了設計、製造與品管的領域,可使得產品的製程更具彈性化及自動化;且在製造整合系統的領域上,數值控制工具機之切削與線上量測以及 CAD/CAM系統的整合,更可達到製程系統化、電腦化的目標,提升產業的形象與競爭力。線上量測時的重要考量包括工件方位的設定、量測程序與路徑規劃、碰撞評估、誤差估計、以及誤差補償與校正等方面<sup>(19,20)</sup>。

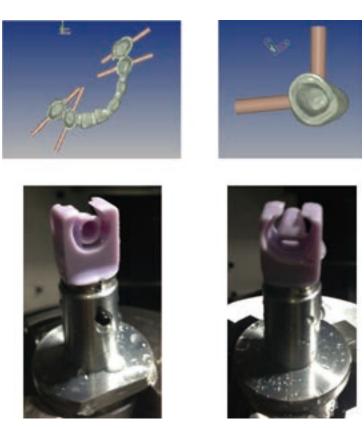


圖 19. 人工齒冠 (3齒、6齒、8齒) 旋轉超音波輔助切削加工 (e-max 醫療陶瓷)。



圖 20. 線上切削特性分析。

為減少廢品、縮短機器停機時間、提高生產力與多樣少量生產的靈活性,於製程前的加工設定,使用工具機測頭可識別組件以選擇正確 NC 程式、定位基準特徵以建立工件座標系統、檢測零件尺寸以確認加工餘量及粗切削加工的程序、量測零件方位 (相對於機器軸向)以進行座標旋轉。另,使用刀具設定儀可以量測刀長建立刀長補正值,並檢查刀長是否在設定公差範圍內、量測旋轉中的刀具直徑,以建立刀具直徑補正值。

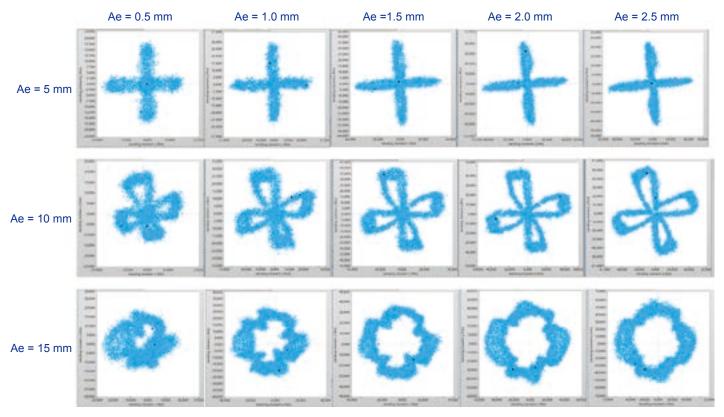


圖 21. 四刃銑刀切深寬比研究模型。

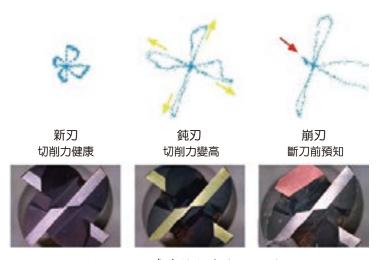


圖 22. 刀具壽命檢知與斷刀預測。

於製程中監控方面,以 Productivity+TM Active Editor Pro 工具機測頭軟體,進行量測路徑規劃,目的在於確認中加工後的預留量,以及精加工後的曲面精度,評估是否須補償刀具路徑,以改善加工精度,提升製程效率。為了避免量測路徑程式錯誤,或與曲面會有所干涉,在實際上機量測前,必須經由虛擬機床的量測路徑模擬加以驗證。圖 23 所示為本實驗室針對渦輪葉片製造之智慧自動化製程控制技術,其整合幾何建模、五軸加工與線上幾何量測與離線量測技術。



圖 23. 渦輪葉片智慧自動化製程控制技術。(a)智慧自動化製程控制技術,(b)渦輪葉片加工與 檢測製程。

### 六、結論

無論國防航太、精密機械乃至於醫療器材,基於能源效率的考量,產品曲面的設計漸趨複雜,且輕量化、更硬韌和耐高溫的先進材料未來將大量採用,且傳統加工方式已不符合現今高產值、高精度、多元化與低人力需求的生產型態。五軸加工機與複合化加工機之結合將能夠使單機的可加工範圍與型式發揮至極致。也因為五軸複合數控加工技術對航太零件等高值化精密零件的製造在產品精度與成本效益上有很大的幫助,因此五軸工具機、多軸車銑複合加工、超音波輔助切削、五軸加減法複合製程技術是複合化工具機發展之重點,其結合多種、多軸加工製程,不僅可減少製程更換時間與夾治具物力支出,且可提供先進材料加工技術,提高生產效益與降低人力管理成本,是高效率高品質的發展模式。

經由整合 CAD/CAM 系統、虛實整合技術、複合製程技術與智慧自動化製程控制技術,於航太零件難削材之製程技術開發,除了可確保產品精度與交期之外;同時收集、分析各生產設備的即時生產資訊、與線上切削負載,提供最適製造條件,發掘異常的根源,如此在生產製造方面將更有效率與競爭力。

#### 參考文獻

- 1. 雷震台, 中華民國航空太空學會會刊, 1 (2014).
- 2. Please refer to the web site:
  - http://www.casid.org.tw//
- 3. Patrick De Vos and Jan-Eric Stahl, Metal Cutting Theories in Practice, Fagersta, Sweden, SECO Tools AB (2014).
- 4. Dr. B. V. R Ravi Kumar, Int. J. of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 2 (5) (2013).
- 5. Martin Busmann, Dr. Erwin Bayer, XIX International Symposium on Air Breathing Engines (ISABE-2009-1169).
- 6. M. Albert, Modern Machine Shop, 59 (5), 54 (1986).
- 7. S. Li and R. B. Jerard, Computer-Aided Design, 26 (3), 165 (1994).
- 8. Y. J. Tseng and S. Joshi, Computer-Aided Design, 23 (5), 367 (1991).
- 9. K. Kim and M. K. Kim, Mechanism and Machine Theory, 26 (2), 207 (1991).
- 10. R. Sarma and A. Rao, ASME Trans. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 122, 191 (2000).
- 11. B. K. Choi, Surface Modeling for CAD/CAM, New York, Elsevier, (1991).
- 12. R. S. Lee and C. H. She, Int. J. Adv. Manuf. Technol., (13), 658 (1997).
- 13. D. N. Reshetov and V. T. Portman, Accuracy of machine tools, New York, ASME (1988).
- 14. Please refer to the web site:
  - http://www.delcam.com//
- 15. Jason Jones, Phil McNutt, Riccardo Tosi, Clinton Perry and David Wimpenny, 23<sup>rd</sup> Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, 821, TX, USA (2012).
- 16. Takeyama, H., S. Kato, Annals of the CIRP, 40 (83-86), (1991).
- 17. 李政男,陳鴻雄,陳易,邱世杰,洪宗彬,王祥賓,中華民國力學學會第四十屆全國力學會議 (2016).
- 18. Z. J. Pei, P. M. Ferreira, Int. J. Mach. Tools Manuf., 38, 1399 (1988).
- 19. Y. Yandayan and M. Burdekin, Int. J. Mach. Tools Manuf., 37 (10), 1423 (1997).
- 20. M. Skyes, Industrial and Production Engineering, 42 (1985).

#### 作者簡介

李政男先生為國立成功大學機械博士,現為正修科技大學機械工程系教授。

Jeng-Nan Lee received his Ph.D. in Mechanical Engineering from National Cheng Kung University. He is currently a professor in Department of Mechanical Engineering at Cheng Shiu University.

謝旻璋先生現為正修科技大學機電工程所博士生。

Min-Jhang Shie is currently a Ph.D. student in Graduate Institute of Mechatronics Engineering at Cheng Shiu University.

# 應用於晶圓級氣體感測器之高效 能點測設備開發

# Development of a Probing Equipment with High Throughput for Wafer-based Gas Sensors

陳銘福、林儀豪、陳志文、陳柏睿、林郁欣、卓文浩、陳建霖、 柯志忠

Ming-Fu Chen, Yi-Hao Lin, Chih-Wen Chen, Po-Jui Chen, Yu-Hsin Lin, Wen-Hao Cho, Jian-Lin Chen, Chi-Chung Kei

量測設備可提供在晶圓階段的氣體感測器晶粒的高效能電性量測,不需經封裝製程即可得知每顆氣體感測器之性能與品質,可大幅縮短感測器開發的試驗週期及有效提高整體生產效能。系統設備整合 (1) 可導入多種不同氣體成分及提供不同濃度之真空腔供氣系統; (2) 自動光學對位系統; (3)線陣列探針點測裝置; (4) 整合加熱裝置的晶圓吸盤等設計。可提供具有高效能之晶圓級氣體感測器的電性點測與品質分級,以 1×1 mm 晶粒的 6" 晶圓 (約17.6 K 顆) 為例,量測設備可在 30 分鐘內完成電性量測 (點測 10 顆/次),其點測效能為現有市售設備 (點測 1 顆/次)的 10 倍以上。

This measuring equipment can provide the electrical measurement with high throughput for wafer-based gas sensors to evaluate the quality and performance of sensor chips before packaging processes. Thus the experimental period can be reduced significantly and the production efficiency can be enhanced. The equipment integrated: (1) a chamber-based testing and gas supply system to provide required ingredients and concentrations of test gases; (2) an automatic optical registration system; (3) a linear probes device; (4) a chuck table integrated with a heating control module, to evaluate and classify gas sensors efficiently. For a 6"-wafer with chip size of 1 × 1mm (about 17.6 K chips), electric measurement could be completed within 30 minutes by using linear probing device with 10 sets of probes. The measuring efficiency was at least up to 10 times greater than the one of one by one testing for packaged sensors.

#### 一、前言

近年來空氣污染對環境及人體健康造成的威脅,在世界各國已越來越受到廣泛的證實與

重視。因車輛、工業排放及極端氣候與沙漠化等因素,造成全球地區空氣污染也日益嚴重。因此,偵測各種化學氣體成份與濃度的氣體感測器的需求也相對地日益提高,氣體感測器搭配智慧手持裝置與物聯網技術,將成為空氣污染通報與防治的新利器。傳統氣體感測器體積較大或價格較高,無法搭配智慧型手持裝置,也難以因應物聯網的龐大相關應用與商機。台灣在半導體相關的技術與產業具有全球的競爭優勢,非常有利於發展半導體製程的氣體感測器,可將氣體感測器加以微小化,並結合人工智慧與物聯網產業,預期可產生極為龐大的商機。但國內目前使用的氣體感測器大多從國外進口,在此項產業的技術與產品正處於積極發展的階段。

本文所提出的應用於晶圓級氣體感測器之高效能點測設備為整合多項技術所開發完成,包括真空腔體與供氣系統、自動光學對位系統、線陣列探針點測裝置、整合加熱裝置之晶圓吸盤、氣體濃度驗證系統與測試模組等,目前系統可導入含 H<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、NH<sub>3</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 與CO 等多種不同氣體成分,並以質量流量控制器 (MFC) 來調配控制,在測試腔中快速形成不同成分與濃度的氣體狀態,及可於晶圓階段進行氣體感測器晶粒之電性量測與分級,可大幅提高量測系統的點測效能及操作性能,也使得能於早期的晶圓狀態即可確認感測器的性能與品質,以篩除不合格的感測器晶粒產品,避免其進入後續的封裝製程,從而減低封裝資源與時間的浪費,可有效地提高感測器的生產效能與產品競爭力。

相較於市場上每次僅能點測 1 顆氣體感測器的電性量測設備,完成開發的氣體感測器點測設備具有每次可點測多顆晶粒的性能,且測試腔體內的氣體環境可依不同感測器的量測需求,而導入其匹配的測試氣體及整合加熱裝置晶圓吸盤之溫度控制,以提供符合受檢感測器種類的量測操作溫度 (e.g. 200 °C) 條件下,在晶圓階段進行氣體感測器晶粒的電性點測與分級。

#### 二、系統需求規格分析與架構設計

#### 1. 系統需求規格與分析

點測系統設備須可在晶圓階段及模擬實際氣體感測環境氣氛與不同濃度下,進行每顆氣 體感測器晶粒的電性量測,系統設備的需求規格分述如下:

- (1) 晶圓吸盤的熱控模組須可加熱吸盤表面至 200°C 以上。
  - 使用阻抗不易受氣氛影響的金屬作為加熱器材料,並具有低維護成本及維持加熱的均匀性。因加熱線在通電時會產生電磁波,可能會影響到量測時的電性,因此選擇使用電熱管(不鏽鋼空心圓棒塞入氧化鎂包覆金屬電線),以迴紋針繞法配合固定機構與隔熱設計,使吸盤表面在  $200\,^{\circ}$ C 時,溫度變易可控制在  $\pm 1.5\%$  內。真空腔體漏率  $< 1 \times 10^{-8}$  lmbar/sec。
- (2) 定位移動平台的重複精度須  $\leq$  50  $\mu$ m、載台平面度須  $\leq$  20  $\mu$ m (以實際點測動作為主);Z 軸移動精度須  $\leq$  20  $\mu$ m。
- (3) 每片晶圓於量測之前須進行一次自動光學對位對準,完成對位時間需≤3分鐘。
- (5) 點測效能具有可每次點測至少 5 顆氣體感測器晶粒,且以 1 mm × 1 mm 晶粒的 6" 晶圓 (約 17.6 K 顆) 為例,量測系統設備須在 30 分鐘內完成全部晶粒的電性量測。

#### 2. 系統架構設計

依據點測設備的系統需求規格與初步分析之後,系統設備主要由可提供感測器量測環境 之真空腔與氣體供應系統、自動光學對位系統、整合加熱裝置之晶圓吸盤、線陣列探針點 測裝置 (整合自動光學對位與裝置姿態調校機構)、精密定位移動平台及電控與點測軟體等構 成。

整合自動光學對位之線陣列探針點測裝置為此電性量測設備的核心技術,主要由對位光學取像裝置、探針精密對位模組、晶圓精密定位與點測規劃模組、點測控制與狀態監測模組、系統操作管理模組及工業級電腦與設備通信介面等構成,系統整合含蓋光.機.電.真空系統等技術之全系統整測。整合自動光學對位之線陣列探針量測裝置主要由下列的裝置或模組構成:

- (1) 對位光學取像裝置:由兩組對位光機模組構成,主要功能為分別提供:陣列探針卡模組 之調校對準及以晶圓上的定位十字標進行晶圓的精密定位。以利於解算兩光機模組和 探針卡模組與晶圓等四者之間的幾何模式與校正參數,並建立晶圓之座標系統與地圖 (wafer map)。
- (2) 探針精密對位模組:如圖 1 的功能方塊與介面圖所示,以對位光機模組-1提供探針的影像,並以手動調整滑台方式來調校探針卡模組的位置,以利於解算晶圓座標與探針卡模組間的精密幾何模式與校正參數。
- (3) 晶圓精密定位與點測規劃模組:以對位光機模組-2提供晶圓的影像,並以影像中的定位 十字標進行晶圓的精密定位,並建立晶圓地圖之參考座標。
- (4) 點測控制與狀態監測模組:以晶圓座標及點測規劃資料,機台控制系統可快速地移動 XY 載台進行多晶粒的點測,並即時監控及顯示晶粒點測狀況及系統運作狀態,及對量 測資料進行儲存與分析解算,以及更新至晶圓地圖的屬性資訊 (attributes) 中。
- (5) 系統操作管理模組:主要功能為提供量測系統的操作管理及圖形化使用介面 (GUI),以 利於工程師及操作員 (OP) 進行系統操作管理及狀態監控與狀況處理等。
- (6) 工業級電腦及設備通信介面:採用 64 位元的工業級電腦平台,以建構具有高穩定性與運作效能的晶圓級氣體感測器量測系統設備。

整合自動光學對位之陣列探針量測裝置之功能方塊與介面設計如圖 1。

## 三、系統設計與製作

量測系統設備主要由真空腔與氣體供應系統(提供感測器量測環境氣氛)、自動光學對位系統、整合熱控裝置之晶圓吸盤、線陣列探針點測裝置、精密定位移動平台及點測軟體等組成(請參見圖 2)。因為部份量測氣體具有腐蝕性,及量測時須先將晶圓加熱至操作溫度(例如 200 °C),故探針點測裝置須具備抗腐蝕及阻熱與導熱等架構設計,探針針體材料採用鎢,且整合供氣小腔體、探針卡與點測控制電路及其固定機構、導熱管、穩定噴流等架構設計,以阻隔腐蝕氣體與熱傳對線陣列探針點測裝置的功能及幾何精度造成不良影響。

因氣體感測器晶粒的量測輸出訊號相對微弱,探針卡與點測控制電路模組之間的量測傳輸訊號易因傳輸訊號電線而衰減及受雜訊干擾,因此在儘量阻隔腐蝕氣體的架構設計下,採用電路模組直接對接於探針卡的介面結構,來降低量測訊號的衰減與雜訊及提高傳輸品質。

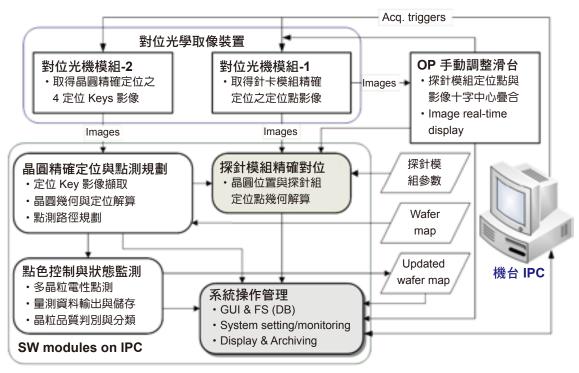


圖 1. 整合自動光學對位之陣列探針點測裝置之功能方塊與介面圖。

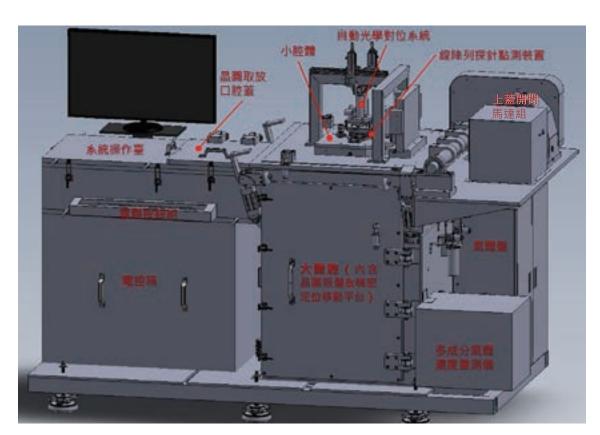


圖 2. 量測設備的硬體系統架構與外型設計。

#### 1. 量測氣體供應系統

在晶圓階段進行點測時,即可供應量測氣體來趨近感測器的實際運作環境之系統架構, 為本點測系統設備的重要特色,為滿足可達到量測氣體環境濃度之最具效能供氣量、在點測 區域可快速達到所需的氣體濃度、儘量降低對真空腔體內氦氣濃度的影響、藉供氣流場設計 來降低高溫晶圓對探針點測裝置的溫度與幾何精度影響、及探針點測裝置的調校機構須置於 腔體外等設計需求,因此以結合探針模組姿態調校機構的小型供氣腔體、波紋管、量測氣體 供應檢測裝置等之架構設計來達成。氣體供應系統之架構設計與實體圖如圖 3 所示,經分析 與實測結果:在點測區域處,系統於 60 秒內即達到所需要的氣體環境濃度,供氣效能極為 顯著,量測氣體的耗用量也可大幅降低。

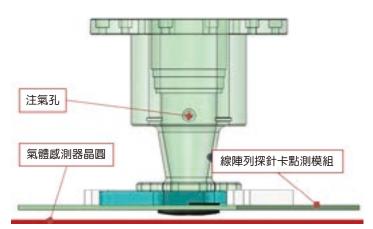




圖 3. 整合線陣列探針點測裝置及高效能進氣腔之架構設計與實體圖。

#### 2. 線陣列探針點測裝置

探針卡選用環氧樹脂探針卡 (epoxy ring probe card,如圖 4)。環氧樹脂探針卡是利用 epoxy ring技術,把數十根至數百根的探針,根據測試晶粒的銲墊 (pad) 位置分佈,以人工方式將探針黏著及焊接在印刷電路板上。其中探針呈懸臂結構狀,又稱懸臂式探針卡 (cantilever probe card, CPC)。因懸臂式探針卡須考量探針相互間的干涉及安裝空間,無法做成高密度的陣列形式,但本系統採每次點測 1 排晶粒方式而所需針數不多,故規劃線型探針卡可符合量測與空間需求。考量線型探針卡的製作成本與時間,採用供應商現有標準 PCB 模組,尺寸概估約為  $60~\text{mm} \times 50~\text{mm}$  (W × L)。

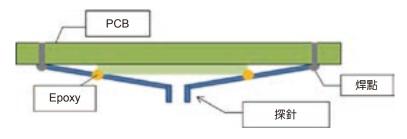


圖 4. Epoxy Ring Probe Card 剖面圖。

考量須能符合系統點測效能規格,即以晶粒尺寸 1 mm×1 mm之 6"晶圓,完成點測時間須≤30分鐘(僅指實際執行晶圓點測的時間,並不包含晶圓的置入/取出、自動光學對位及系統達到所需氣體環境濃度等程序的時間),故以可 1 次點測 10 顆感測器晶粒之線形懸臂式探針點測裝置 (如圖 5 與圖 6 之實體圖)。線形探針卡具有製作的成本較低與時間短及易於維修等優點,可快速因應不同感測器產品的電性點測需求。配合真空腔體外之整合波紋管 (welding bellow) 與探針卡姿態調校機構,可調整探針的針尖平面與晶圓表面平整碰觸,以利於點測控制系統進行弓字形路徑之量測。

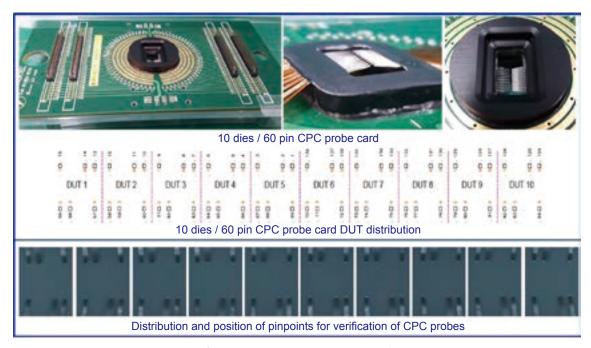
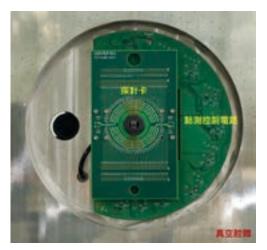


圖 5. 懸臂式探針卡及其基板之設計與實體圖。



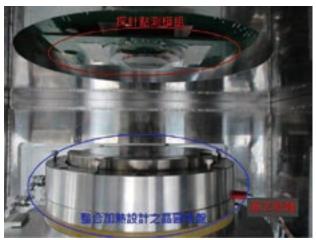


圖 6. 線陣列探針點測裝置整合於真空腔體內之實體圖。

#### 3. 整合加熱裝置之晶圓吸盤模組

晶圓吸盤模組之加熱器採用電熱管設計,主要是不可因加熱器產生電磁波對電性量測造成影響,並且採迴紋針繞法型態及經熱傳與機構形變分析後確認其設計配置與分布,使吸盤表面高度形變維持平坦,不會影響點測時探針的高度行程裕度。吸盤設計須使熱向上傳導到吸盤表面,同時也須阻隔熱往下傳導至吸盤機構,因此以 PBI 隔熱材料搭配抽氣管道設計及熱傳分析,達成降低吸盤模組之固定與調校機構因熱膨脹產生高度變易而影響探針點測行程,亦有利於保持晶圓表面的溫度穩定性及降低能耗。圖 7 為晶圓承載面高度 ( Z 軸向)變形分析,圖 8 為晶圓吸盤開發完成的實體圖,實測結果顯示:吸盤承載面加熱至 200 °C 時的高度最大變形量約為  $10\,\mu\mathrm{m}$ ,與分析結果相當接近,符合探針點測行程之誤差容許範圍 (<  $50\,\mu\mathrm{m}$ ) 要求。

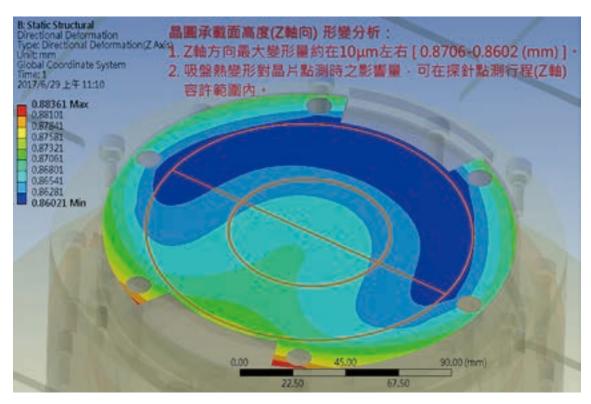


圖 7. 晶圓承載面高度 (Z 軸向) 變形分佈。

#### 4. 自動光學對位系統

自動光學對位系統為由兩組光機取像模組、調校滑台與機構及對位解算軟體所構成,提供線陣列探針點測裝置之調校對準,及以晶圓十字標進行晶圓的精密定位,以解算線陣列探針點測裝置與兩光機取像模組和晶圓之間的幾何模式與調校參數,並建構晶圓之座標系統與地圖,以執行定位調校及感測器電性點測,及連結與更新點測結果到晶圓地圖屬性資料中。

整合自動光學對位系統與高效能進氣腔裝置之點測架構之實體如圖 9 所表示,此架構設計為量測設備重要的核心技術,使量測系統具有操作簡便及快速備便等優越性能。

自動光學對位之目的是建構線陣列探針點測裝置與晶圓間之幾何關係,再經由精密定位移動平台來補償偏移量,達成將線陣列探針針尖點對準於每顆晶粒電極焊墊,以進行晶粒的

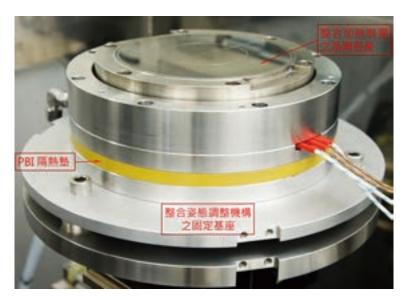


圖 8. 整合加熱裝置之晶圓吸盤實體圖。

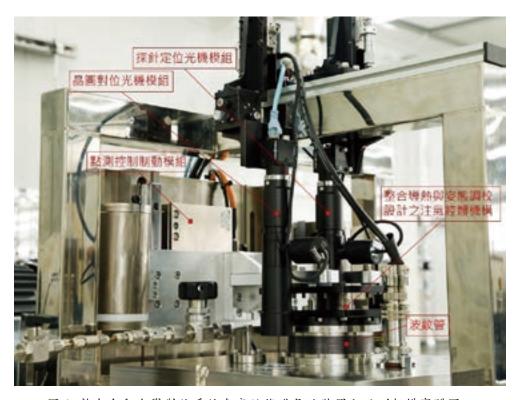


圖 9. 整合自動光學對位系統與高效能進氣腔裝置之點測架構實體圖。

電性量測程序。P 光機模組 (即使用於探針定位之光學取像模組,「P」代表 probe) 為安裝於線陣列探針點測裝置上方,可得到線陣列探針點測裝置的位置與角度 (如圖 10(a) 所示)。透由 K 光機模組(即使用於晶圓定位之光學取像模組,「K」代表晶圓上的對位 keys) 可取得晶圓定位十字標 (key) 位置的影像,再以影像處理方法得到定位標距離畫面中心之距離 (如圖 10(b) 所示)。兩組光機模組之位置關係如圖 10(c) 所示。

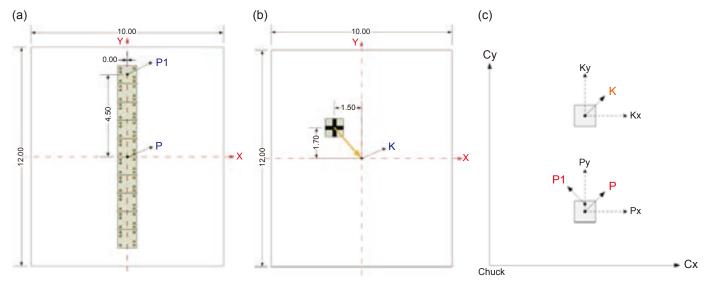


圖 10. (a) P光機視野範圍之晶粒位置示意圖, (b) K光機視野範圍之晶粒位置示意圖, (c) K 兩支對位光機之位置 關係式示意圖。

#### 5. 標準氣體濃度調整方法

量測系統設備已可應用於  $H_2$ 、 $H_2S$ 、 $NH_3$ 、 $C_2H_5OH$  與 CO 等成分氣體之感測器晶粒電性量測,調控量測用氣體的標準氣體濃度調整裝置的主要功能,是以三種範圍 (1000、500、10 sccm) 的流量控制器配合背景氣體 (80%  $N_2+20\%$   $O_2$ ) 來稀釋標準氣體濃度。濃度稀釋 50% 以上者使用 1000 sccm 流量控制器;濃度稀釋 50%-1% 者使用 500 sccm 流量控制器;濃度稀釋 1% 以下則使用 10 sccm 流量控制器,最小可調整至原濃度的 0.0002% (若標準氣體濃度為 2000 ppm,則最小可將濃度調整至 0.4 ppm)。

### 四、量測系統整合測試與驗證

圖 11 為以晶圓上四個方位的定位十字標進行自動光學對位之結果,四個定位十字標與影像中心的誤差 (X,Y) 均  $\leq 0.01$  mm 時,表示均已正確對位,亦即以量測的正確偏移量,利用精密定位移動平台移動定位十字標到影像正中央。影像解析度為  $5~\mu$ m/pixel、探針針尖約  $20~\mu$ m、晶粒 pad 為  $100~\mu$ m× $100~\mu$ m,對系統而言,對位誤差  $\leq 2~\mu$ pixels( $\pm~0.01~\mu$ m),已可符合點測精度需求。晶圓經自動光學對位之後,可得到每顆晶粒的偏移量而進行補償。

經以電性量測程序來實際驗證探針是否可精確接觸 pad,及多次的重新置入晶圓進行測試驗證,實驗結果顯示每顆晶粒均輸出電性量測資訊,亦即代表其偏移量均被正確補償,及自動光學對位補償功能可正確而有效的完成精密自動對位;依實測結果,每片晶圓的自動光學對位時間均可在 60 秒內完成,符合系統需求規格 ( $\leq 3$ 分鐘)。

量測系統設備為整合可導入多種不同氣體成分與濃度狀態之真空腔供氣系統、自動光學 對位系統、整合線陣列探針點測裝置與高效能進氣腔裝置,及整合加熱裝置之晶圓吸盤等新 穎設計所構成。系統主要特色與優勢:

- (1) 可適用於多種成分氣體感測器的開發。
- (2) 在晶圓階段即可進行晶粒電性量測,早期篩檢出性能不佳的晶粒。
- (3) 大幅加速檢測過程,以提升感測器開發速度。

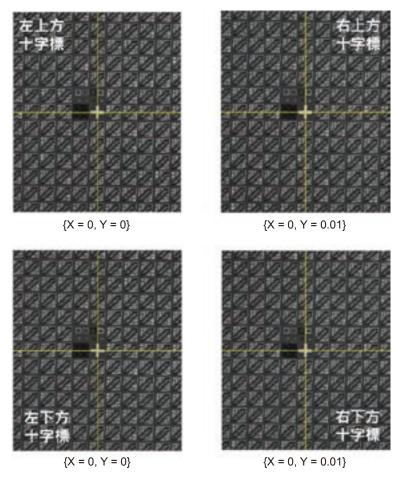


圖11. 以晶圓上四個方位的定位十字標進行自動光學對位之結果圖。

完成開發的量測設備,以  $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  晶粒尺寸的之 6"晶圓 (約 17.6 K 顆) 及每次可點測 10 顆晶粒的線陣列探針點測裝置的條件為實例,可在 30 分鐘內完成電性量測,其點測效能為現有市售設備 (點測 1 顆/次) 的 10 倍以上。再者,若將每次點測的移動與定位的時間計入,則本量測系統的點測效能可達市場上現有設備的至少 30 倍以上。

氣體感測器性能量測設備的方式與優劣比較如下表:

	現行檢測方式	儀科中心機台	儀科中心優勢
氣體測試 程序	封裝後	封裝前	品質管控與分級,減少封裝的成本與時 間浪費
點測方式	單點 一次檢測 1 顆	線陣列 一次檢測 10 顆	<ol> <li>檢測速度快 10 倍 (5 小時 → 30 分鐘 (1.7 萬顆))。</li> <li>若計入每次點測的移動與定位時間,則點測效能可達至少 30 倍以上。</li> </ol>
晶圓對位	人工顯微鏡對位	自動光學對位	精度提升、速度提升
加熱方式	封裝後之 IC 電路	直接加熱晶圓	封裝前即可檢測感測器效能,符合實際
點測時 通入氣體	無	有	環境

圖 12 為整合晶圓吸盤與精密定位移動平台於真空腔體之量測機台實體圖,圖 13 則為開發完成並移機至合作廠商無塵廠房之晶圓級氣體感測器高效能電性量測設備之實體圖。

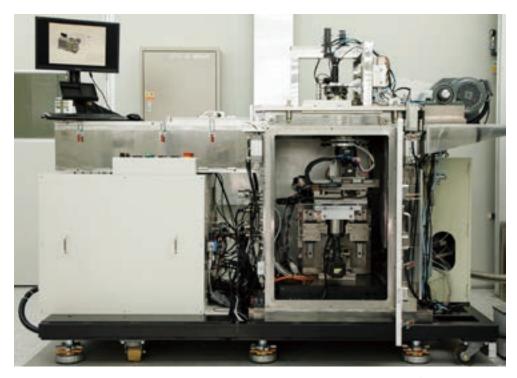


圖 12. 整合晶圓吸盤與精密定位移動平台於真空腔體之量測機台實體圖 (左)。



圖 13. 晶圓級氣體感測器高效能電性量測設備之實體圖 (右)。

#### 五、結論

完成開發之晶圓級氣體感測器的點測系統設備為全球首創之整合光機電與真空系統等技術之晶圓級氣體感測器的電性量測設備。系統可提供氣體感測器在晶圓狀態,通入測試氣體到真空測試腔體,不需經過封裝程序即可得知每顆感測器的性能優劣,使得氣體感測器開發者的試驗週期可大幅縮短,可有效地提高元件的開發速度,在相同時間下可開發出更多款的氣體感測器。

生產應用方面,在晶圓狀態時即可確認感測元件的功能,可於早期階段篩檢出性能不佳 的產品,及早發現不良晶粒產出,並使得製程與產線人員可快速的加以矯正,以免產出更多 不合格產品,及避免其進入後續的封裝製程而造成資源與時間的浪費,進而有效的降低整體 生產成本,增加產品競爭力。

有別於市場上點測機台每次僅能點測 1 顆晶粒,量測系統每次可同時點測多顆晶粒,提供具有高效能之晶圓級氣體感測器的電性點測與品質分級,其點測效能為現有市售設備(點測 1 顆/次)的 10 倍以上。

量測設備已可協助開發不同種類的氣體感測器;未來也可以本系統為基礎架構,架設更 多的機台供應大量生產使用,也可協助台灣廠商搶攻半導體製程之氣體感測器全球市場,以 提高台灣氣體感測器產業的市場競爭力。

#### 參考文獻

- 1. B. Srinivasa Reddy and B. N. Chatterji, IEEE Transactions on Image Processing, 5 (8), 1266 (1996).
- 2. Gonzalez, R.C., and Woods, R.E., Digital Image Processing, Prentice-Hall, New Jersey (2002).
- 3. Barbara Zitova and Jan Flusser, Image and Vision Computing, 21, 977 (2003).
- 4. Wen-Yen Wu, Mao-Jim J. Wang, Chih-Ming Liu, Computers in Industry, 28, 103 (1996).
- 5. "Datasheet of Telecentric Lens for 5 Mega Pixel", MYUTRON CO, 2017.
- 6. "BFLY-PGE-Technical-Reference", FLIR Integrated Imaging Solutions Inc, 2017.
- 7. "Reference Manual of Open Source Computer Vision (openCV) Library", Intel Corporation, Version 2.4.10, 2014.

#### 誌謝

感謝中部科學園區管理局提供前瞻設備研發計畫,儀科中心配合晶電光電公司及協同清華大學與工研院量測中心等,完成此極具技術前瞻性與競爭力的氣體感測器電性量測系統設備的開發。

#### 作者簡介

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 Department of Mechanical Engineering from National Taiwan University. He is currently a research fellow and division director at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

林儀豪先生為國立中與大學生物產業機電工程碩士,現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心 助理研究員。 Yi-Hao Lin received his M.S. in Department of Bio-industrial Mechatronics Engineering from National Chung-Hsing University. He is currently an assistant researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

陳志文先生為國立中央大學機械工程碩士,現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心副研究員。 Chih-Wen Chen received his M.S. in Department of Mechanical Engineering from National Center University. He is currently an associate researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

陳柏睿先生為國立台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 Department of Mechanical Engineering from National Taiwan University. He is currently an associate researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

林郁欣先生為國立交通大學機械工程博士,現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心副研究員。 Yu-Hsin Lin received his Ph.D in Department of Mechanical Engineering from National Chiao-Tung University. He is currently an associate researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

卓文浩先生為國立中央大學光電科學與工程博士,現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心副 研究員。

Wen-Hao Cho received his Ph.D in Department of Optics and Photonics from National Center University. He is currently an associate researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

陳建霖先生為私立健行科技大學機械工程學士,現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心佐理 工程師。

Jian-Lin Chen received his B.S. in Department of Mechanical Engineering from Chien-Hsin University of Science and Technology. He is currently a junior engineer at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

柯志忠先生為國立清華大學材料科學與工程博士,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。

Chi-Chung Kei received his Ph.D in Department of Materials Science and Engineering from National Tsing-Hua University. He is currently a research fellow and division director at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

# 科儀新知目錄索引

第 218 期-221 期 (民國 108 年 3 月-108 年 12 月)

篇 名	作者	年月	總期數	頁數
智慧氣體咸測器專題				
國內外空氣品質感測器現況介紹	黃國政等	108(3)	218	4
固態氣體感測器介紹	楊力儼等	108(3)	218	12
奈米粒子修飾氧化鋅奈米線於大氣環境中氮氧化物氣體感	呂文忠等	108(3)	218	26
應用				
固態電化學式 NOx 感測器於 Euro 6 空氣汙染防制之研究	蔡淑儀等	108(3)	218	34
半導體式晶片型氣體感測器研發	薛丁仁等	108(3)	218	42
低耗能氣體感測器設計與製作方法	蕭育仁等	108(3)	218	51
應用於工廠煙道環境之即時光學空氣品質監測系統	邱裕中	108(3)	218	61
整合溫度、濕度、微粒與無線通訊功能感測器模組於三	林奕成等	108(3)	218	69
維空間即時監控				
可變焦透鏡多焦點影像應用於顯微形貌量測	范振亮等	108(3)	218	76
3D 成像與成型技術專題				
3D影像掃描技術與其在室內定位的相關應用	孫慶成	108(6)	219	4
應用於三維感測的垂直共振腔面射型雷射陣列	許晉瑋	108(6)	219	15
結構光三維成像及其編碼技術	劉治中等	108(6)	219	25
使用二維彩色圖像修補紅外線深度圖像	余業緯等	108(6)	219	38
條紋投影技術於三維形貌、移動速度、與三維形變量量測	蘇威宏等	108(6)	219	47
的應用				
語意閉環檢測	楊哲宇等	108(6)	219	58
光學掃描全像之三維顯影技術	劉榮平等	108(6)	219	72
多層全像非軸向掃描狹縫共軛焦螢光顯微鏡	吳祚華等	108(6)	219	82
3D 成型技術之介紹與應用	沈育芳等	108(6)	219	90

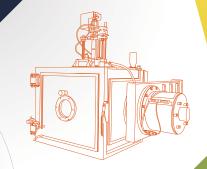
7119 H	· · ·	1 / 3 /1.6.//3/2007	
智慧光電農業機器人			
智慧農業機具與輔具之應用	楊智凱等	108(9) 220	4
無人機於精準農業之應用	楊明德等	108(9) 220	20
空中與地面無人載具應用於 3D 果樹與樹林建模	黃韋蒼等	108(9) 220	40
植生指標之單/雙影像模組發展探討	廖泰杉	108(9) 220	62
精準雷射蟲害控制	張嘉熒等	108(9) 220	74
應用於CIGS薄膜太陽能電池的陣列取像裝置及檢測系統	陳志文等	108(9) 220	86
智慧機械			
加速規與溫度感測器	鄭志鈞等	108(12) 221	4
工業 4.0 與智慧製造的關鍵技術:工業物聯網與人工智慧	洪哲倫等	108(12) 221	19
機械工廠內之異質機臺連網整合與應用	李維楨等	108(12) 221	26
強化學習應用於深孔機加工參數優化	陳國榕等	108(12) 221	35
工業用機器人控制技術簡介	游鴻修等	108(12) 221	45
工具機主軸熱變位預測技術	盧亦軒等	108(12) 221	56
航太零件難削材之智慧製造技術	李政男等	108(12) 221	71
應用於晶圓級氣體感測器之高效能點測設備開發	陳銘福等	108(12) 221	88

# 了 了 京 東 東

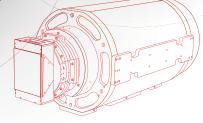
儀器客製服務專家







DUV濺鍍腔透視圖



先進封裝製程用 步進式曝光機投影鏡頭系統



# 智慧儀控設計與整合

Intelligent Instrument Design & System Integration



# 光學系統設計、製造與檢測

Total Solution Service for Optics



# 先進鍍膜製程設備開發

Advanced Coating Equipment Development



## 生醫光電系統

Biomedical Optical System



# **Mitutoyo**

# 以精密量測技術貢獻社會

1987年正式在台成立,除了銷售精密量測儀器的業務,並且建構以技術服務為主軸的量測技術支援中心。提供最好的售前與售後服務體系,為快速提供客戶所需要的服務,台灣三豐分別於台北、台中、高雄設立營業所,包括量測技術支援中心(M3SC)以及技術服務部門,就近迅速提供客戶所需要的量測DEMO、各種量測Solution、與售後服務。



承蒙惠顧,三豐已由測微器、游標卡尺之類的小量具,發展成為一個運用電腦驅動的FA關連機器一三次元座標量測儀、畫像測定機、顯微鏡、投影機、表面粗度、真圓度測定機、輪廓測定機、硬度機、雷射測定機等,已成為世界第一大精密儀器的綜合製造商。

#### 台北總公司 / 台北量測技術支援中心

114台北市內湖區洲子街71號4樓 營業部代表號:(02)5573-5900 技術部代表號:(02)5573-5901 管理部代表號:(02)5573-5902 FAX:(02)8752-3267

營業部:sales@mitutoyo.com.tw 技術部:technical@mitutoyo.com.tw 校正實驗室:lab@mitutoyo.com.tw



#### 台中辦事處 / 台中量測技術支援中心

414台中市烏日區高鐵一路299號1樓

FAX:(04)2338-6822

#### 高雄辦事處 / 高雄量測技術支援中心

802高雄市芩雅區海邊路31-1號1樓

EL: (07)334-6168 AX: (07)334-6160

服務據點