

出國報告（出國類別：考察）

赴義大利參加國際工具機、金屬加工暨自動化機械展(BIMU)及至德國聯邦物理技術研究院(PTB)出國報告

服務機關：經濟部標準檢驗局

姓名職稱：侯技正沛霖、沈技正斯凱

派赴國家：義大利、德國

出國期間：中華民國 113 年 10 月 9 日
至 10 月 17 日

報告日期：113 年 11 月 29 日

摘 要

我國工具機產業當前面臨無法與德日領先大廠工具機能力相當之狀況，為提升產品競爭力需加強空間加工精度及經時精度之能力。因此，須瞭解國外量測技術及先進五軸工具機等產業發展現況，藉由參訪 2024 義大利國際工具機、金屬加工暨自動化機械展(BIMU)及德國聯邦物理技術研究院（PTB），蒐集相關資訊作為我國智慧機械量測追溯之未來方向規劃參考。

本次出國計畫首先參訪 2024 義大利 BIMU 展，今年展覽主題為「All Faces of Innovation」，總共有 8 個展區(包括工具機、量測、數位、機器人等項目)超過 750 家廠商參展。藉由本展覽了解國際工具機新技術的應用和發展趨勢，並針對「五軸工具機關鍵零組件、技術和產品」及「工具機品質長效量測的技術、產品」深入了解，及透過展會上的技術研討會、論壇和講座，了解業界目前所著重之技術、趨勢和挑戰。

此外亦規劃至德國參訪 PTB 布倫瑞克院區，了解 PTB 目前較新興及重點之發展技術，以使我國精密機械與精密量測相關領域能持續與國際接軌，進一步協助產業升級並提供完善之計量追溯環境，所介紹之技術包含非球面量測技術、光鐘技術、太陽能模組量測技術及量子技術相關研究等，並參觀力量量測領域實驗室之各項系統，了解各校正系統設計及機台配置，包含靜態力量、動態力量及扭矩校正系統，提供我國實驗室未來擴建及精進之規劃方向。

本次出國相關結論與建議將作為規劃未來本局委託財團法人工業技術研究院量測中心執行國家度量衡標準實驗室及智慧機械科專計畫之參考，並提供我國產業相關資訊，以滿足我國產業界所遭遇之問題及缺口，提升我國產品國際競爭力。

目 次

壹、前言	3
一、 智慧機械產業量測之需求	3
二、 國家度量衡標準實驗室對於智慧機械產業的定位.....	5
三、 本計畫出國目的	5
貳、過程	5
一、 本次參訪行程.....	5
二、 主要參訪之詳細內容.....	7
(一) 義大利國際工具機、金屬加工暨自動化機械展	7
(二) 拜訪德國聯邦物理技術研究院	18
參、心得及建議	32

壹、前言

一、智慧機械產業量測之需求

根據工研院產科國際所，預估工具機市場於 2021 ~ 2024 年間，均可維持成長；2021 年全球工具機消費金額約為 800 億美元，預計於 2025 年，全球工具機消費金額將達到 873 億美元。帶動市場成長因素，包含中國與新興國家經濟持續發展、全球製造基地移轉帶動生產設備投資，以及多元化產業應用促使工具機需求擴張等。在國內市場需求方面，也因國機國造及國艦國造、半導體設備與零組件、航太產業、風電與零組件國產化等趨勢，亦將帶動工具機市場需求。另一方面，由於電動車市場快速成長，已成為全球汽機車產業發展重要趨勢。汽車產業是工具機最主要應用領域，由於電動車與燃油車在動力系統零組件製造上，對工具機需求有重大差異，新型工具機之市場需求也將隨電動車產業需求而提升。電動車衍生新工具機產品應用需求，包含電動馬達加工、電動車動力系統、減速齒輪加工、電池箱零組件製造與輕量化零組件加工等。國內工具機產業將可藉此新興需求切入中高階工具機市場，並與智慧科技融合，透過智慧化、數位化產品、服務與創新商業模式，提升產業與企業競爭力；對應的挑戰，則包含提升關鍵零組件品質、工具機組裝與測試能力提升，以及零組件、整機與資通訊技術與智慧科技整合等。

圖 1 為工具機發展趨勢，依據市場發展，例如，半導體設備與零組件、航太產業、風電與零組件國產化、電動車動力系統、減速齒輪加工等，及國機國造與國艦國造的政策推動，新型、高階工具機之市場需求也將隨產業需求而提升。因此，藉此新興需求，國內工具機產業莫不提升工具機品質，或是並與智慧科技融合，強化智慧化功能，以競逐中高階工具機市場。為實現此目標，需提高工具機產業附加價值，包含數位化整合及建立智慧化量測技術，同時也須提高關鍵零組件品質、工具機組裝與測試能力，提升組裝品質及整機精度，才能趕上德、日中高階工具機之水準。

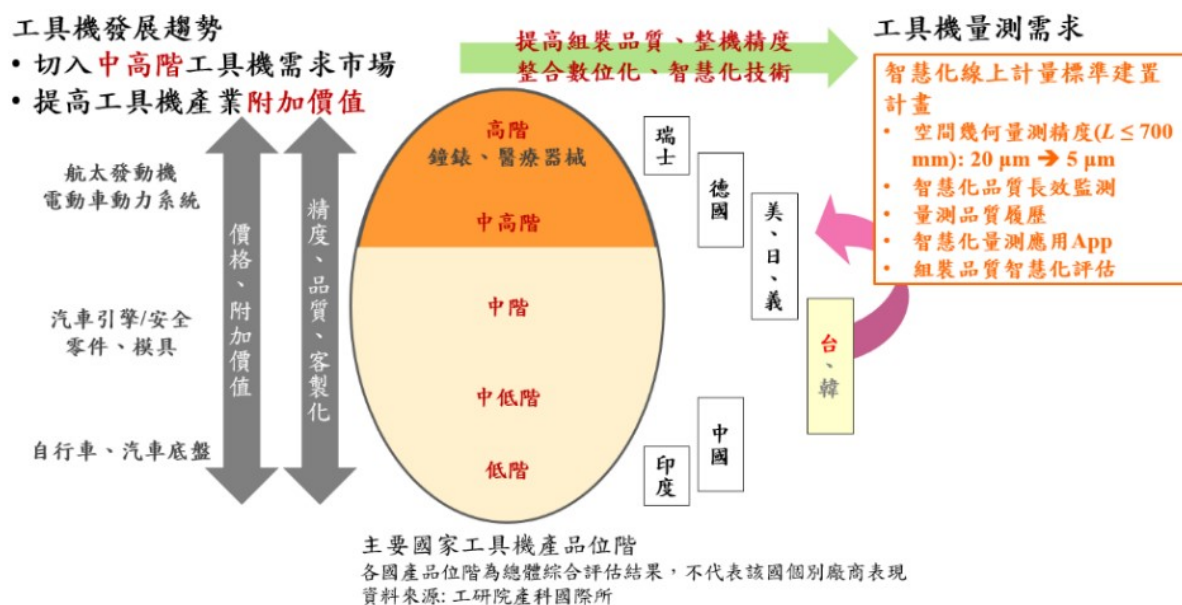


圖 1 工具機發展趨勢

本局後續與智機產業訪談(如表 1)，並透過本局智慧機械科專計畫，以計量技術發展為基礎，建立智慧化高精度線上校正與量測(in-process “smart” calibration/measurement)技術，提升我國工具機、關鍵零組件之組裝與測試能力，以達到德國工具機水準；建立品質長效評估技術，整合量測技術與智慧科技，確保加工品質；建構智慧化量測標準平台，提供校正追溯及線上量測履歷，提升產線整合智慧化診斷、監控能力，強化智慧生產品質。預期計畫完成後，可以滿足高階工具機及智慧製造產業的品質要求，建立數位化整機高精度量測技術、組裝品質精度量測方法、零組件量測技術等，協助工具機智慧製造達成平均故障間隔(MTBF)目標及量測履歷收集及雲端化，達成持續提升關鍵零組件品質與性能，增進工具機組裝、測試能力，及整合零組件、整機與資通訊技術及智慧科技於製造產線。

表 1 工具機及其關鍵零組件產業具體需求

量測項目	目前量測能量	量測需求	技術領先公司	技術領先規格
空間幾何誤差	量測精度 $\geq 30\ \mu\text{m}$	量測精度 $\leq 10\ \mu\text{m}$	Etalon	量測精度 $\leq 5\ \mu\text{m}$
空間幾何誤差 補償(五軸)	補償效果 $\sim 30\% \sim 50\%$	補償效果 $\geq 70\%$	Etalon	補償效果 $\approx$ $50\% \sim 60\%$
線軌組裝	真直度量測精度約 $\geq 8\ \mu\text{m}$	真直度量測精度 $\leq 3\ \mu\text{m}$	RENISHAW	真直度量測精度 $\pm 1\ \mu\text{m}$
鑄件孔位	量測精度約 1 mm	量測精度 $\leq 50\ \mu\text{m}$	gom	量測精度 $\geq 38\ \mu\text{m}$
主軸	軸向/徑向誤差	量測精度 $\leq \pm 1\ \mu\text{m}$	LION	量測精度 $\leq \pm 1\ \mu\text{m}$
旋轉軸幾何誤差	3 項幾何誤差 (線性: E_{XC}, E_{YC} 、角度定位 E_{CC}) 角度定位: $\pm 0.5''$	6 項幾何誤差 (線性: E_{XC}, E_{YC}, E_{ZC} 、角度: E_{AC}, E_{BC} 、角度定位 E_{CC})	RENISHAW	1 項幾何誤差 (角度定位 E_{CC}) 角度定位: $\pm 1''$

二、國家度量衡標準實驗室對於智慧機械產業的定位

經濟部標準檢驗局為我國標準、度量衡及商品檢驗主管機關，負責編修我國國家標準、推行品質管理系統、建立我國認證環境，推動國際合作及相互承認、以及劃一全國度量衡，確保計量準確性與追溯性並提供相關校正服務。在度量衡部分，本局依據我國度量衡法第 4 條第 1 項、第 2 項及國家度量衡標準實驗室業務委託辦法第 2 條規定委託財團法人工業技術研究院成立國家度量衡標準實驗室，協助本局執行相關法定業務，包括全國度量衡最高標準 17 個領域(長度、力量、質量、溫度、電流等)之研究實驗、建立、維持、保管、供應、校正及其他相關事宜。

NML 以「校正」方式傳遞計量標準，以確保我國智慧機械產業感測器量測資料的可靠性與正確性，並協助解決我國智機產業量測技術問題，進而協助我國機械產業升級，持續作為國家政策執行之基磐而努力。

三、本計畫出國目的

為協助工具機產業提升量測精度及經時精度能力，本局除持續精進與擴建現有國家計量標準系統外，亦考量國際趨勢與領先國家之精密機械與精密量測相關領域量測技術方向，以進一步協助產業升級提供完善之計量追溯環境，本計畫規劃參加歐洲規模最大的兩場工具機展之一的義大利米蘭 BIMU 國際工具機展及參訪國際先進度量衡實驗室德國聯邦物理技術研究院(PTB)針對重點量測系統規劃進行交流，瞭解國際工具機領先量測技術之發展與先進國家實驗室量測技術之進程，以作為本局量測技術與系統建置規劃參考。

貳、過程

一、本次參訪行程

本次參訪 2024 年義大利米蘭 BIMU 國際工具機展以瞭解國際工具機領先量測技術之發展，及規劃至德國參訪 PTB 布倫瑞克院區，對其重點發展技術與力量量測系統規劃進行瞭解並尋求未來合作。本次參訪日程為 113 年 10 月 9 日至 10 月 17 日，完整行程如下(表 2、圖 2)：

表 2 本次參訪行程表

參訪日期	參訪地點與機構	參訪主題及實驗室
10/9-10	10/9 搭機啟程，10/10 抵達義大利米蘭	
10/11-10/12	義大利米蘭 BIMU 工具機展	瞭解工具機領先廠商之感測器及精密量測相關領域之產業與技術發展。
10/13	移動日	義大利米蘭至搭機至德國布倫瑞克
10/14-10/15	德國 PTB (布倫瑞克院區)	參訪 PTB (1) 第 2 組之 2.5 半導體物理和磁力學部門 (2) 第 4 組之 4.24 非球面量測工作小組、4.43 光鐘工作小組、4.53 太陽能模組工作小組、4.55 單光子計量工作小組。 (3) 第 5 組之 5.32 座標量測系統工作小組、5.34 多感測器量測工作小組。 (4) 量子技術創新研究計畫 (5) 第 1 組之 1.2 固體力學部門力量量測實驗室並進行技術與管理經驗交流參訪。
10/16-10/17	10/16 搭機回程，10/17 回抵國門	



圖 2 參訪行程示意圖

二、主要參訪之詳細內容

(一) 義大利國際工具機、金屬加工暨自動化機械展

義大利國際工具機、金屬加工暨自動化機械雙年展(BIMU)為歐洲最大的兩個工具機展之一，係由義大利工具機與自動化產業協會(UCIMU)主辦，本屆(34 屆)於 2024 年 10 月 9 至 12 日在米蘭國際展覽中心(Fieramilano Rho)舉行，義大利 BI-MU 國際工具機展每兩年舉辦一屆，是全球最重要的國際專業工具機、機器人及自動化機械展之一，亦是義大利工具機產業拓展國際市場的重要活動。

展覽場地位於米蘭國際展覽中心，該中心具有 20 個展館，399,000 m²展覽面積，是世界最大的展覽場地之一。本次展覽使用 4 個展館計 65,000 m²(圖 3)約為我國最大展覽館南港展覽館一館展出面積 46,000 m²之 1.5 倍，並有超過 750 家企業參展，其中 37%為國外參展國，我國計有 39 家廠商參展，為參展家數第 3 多之外國國家(圖 4)，能在具指標性國際性大型工具機展出，更能推展我國工具機產業前進國際。



圖 3 米蘭國際展覽中心

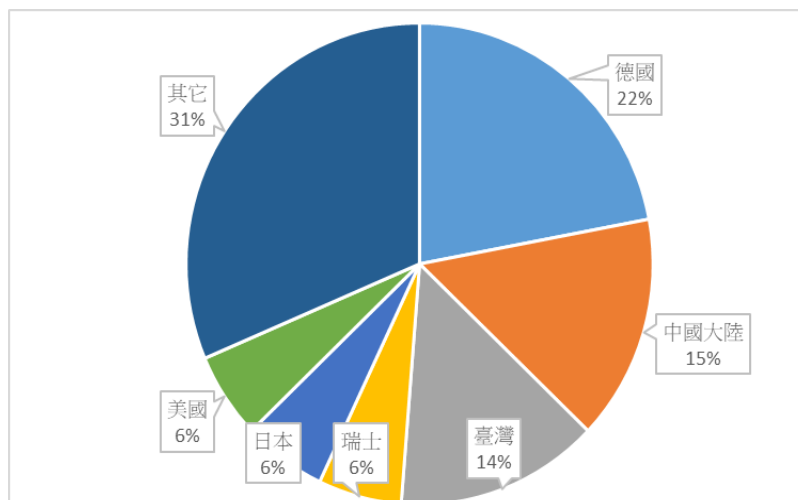


圖 4 BIMU 展外國廠商參展家數

本屆展覽主題為「All Faces of Innovation」，設計「RobotHeart 機器自動化整合」、「Additive 積層製造」、「BI-MU Digital 數位化」、「Metrology & Testing 計量與測試」、「Power4Machines 機電整合」、「Heat and Surface Treatments 表面熱處理」、「Composites 複合材料」、「Consulting & Certification 認證」8 個主題展區以展現各面向的創新如表 3：

表 3 BIMU 主題展區說明

主題	說明
Roboheart	致力於製造領域的機器人、自動化、系統和人工智慧
Additive	專注於使用積層技術進行生產的機器、材料和軟體
BI-MU Digital	專注於軟體、連接和資料管理技術、網路安全和感測器
Metrology & Testing	測量儀器、測試機器、電腦視覺和品質控制
Power4machines	提供用於動力傳輸的機電整合解決方案、系統和組件
Heat and Surface Treatments	展示用於表面和熱處理的機器、設備和系統
Composites	將重點放在複合材料製造商和加工複合材料的機器
Consulting & Certification	提供數位化、網路安全、永續發展和環境方面的諮詢服務

展覽會除了主題展區外，更安排了一處特色展演場地(BIMU piu)，提供更深入的主題演講及產品介紹舞台，展期 4 天安排了 60 多場會議（如表 4），反映了展出的技術產品，包括工具機、製造系統、計量和品質、資訊通訊技術和數位技術、機器人等，並在 BI-MU 網站上提供直播服務，讓各界都可即時參與。

展覽會另一項特色為舉辦 ROBOTGAMES 機器人競賽項目，專門為高中、技術學院的年輕學生進行新型自動化和機器人競賽，當天為經過各地競賽進入決賽的隊伍，共計 8 隊，競賽內容為嘗試創建機器人自動化原型並應用於世界各地(圖 5)。

表 4 BIMU+ 展演場地時程表

CALENDARIO Calendar				BI-MUPiù	11	PAD/HALL AREA F26
ORE Hours	09	10	11	12		
	MERCOLEDÌ Wednesday	GIOVEDÌ Thursday	VENERDÌ Friday	SABATO Saturday		
10.00 - 10.15	CERIMONIA INAUGURALE (10.30)	PASSEPARTOUT	EXECUTIVE ROUNDTABLE: Robotics market evolution: global trends and European perspectives IFR-SIRI-UCIMU			
10.20 - 10.35		HOLONIX				
10.40 - 10.55		BALLUFF				
11.00 - 11.15		HILTI		TEBIS ITALIA		
11.20 - 11.35		SANMARCO INFORMATICA		RECODI TECHNOLOGY		
11.40 - 11.55		PROBEST	ROUNDTABLE: The technological trends of the future IFR-I-RIM-SIRI-UCIMU	ULYSS		
12.00 - 12.15		DATA SPACE: Innovazione, efficienza e valore per le aziende manifatturiere		OMCR		
12.20 - 12.35				TEOMA		
12.40 - 12.55				SOLARELIT		
13.00 - 13.15		ZERYNTH	IA E ROBOTICA: VERSO UN'INTEGRAZIONE SINERGICA AIRO - AlxIA - SIRI	RETUNER		
13.20 - 13.35		SANMARCO INFORMATICA		/		
13.40 - 13.55		ALA		SCUOLA SANT'ANNA	/	
14.00 - 14.15	ASSILEA	ITALFINANCE	ASSISTEC		Metrologia e Qualità / Metrology and quality	
14.20 - 14.35	SIEMENS	CHIMAR	ABB			
14.40 - 14.55	MARPOSS	PROBEST	UNIVERSAL ROBOTS			
15.00 - 15.15	FANUC	SIEMENS	KUKA			
15.20 - 15.35	CONVEGNO FEDERTEC Proteggiamo davvero l'avanguardia dell'innovazione tecnologica e dell'expertise industriale che rappresentiamo?	GERARDI	TECNOROBOT			Robotica/ Robotics
15.40 - 15.55		HIWIN	COMAU	/		
16.00 - 16.15		GROB	ROBOTECO	/		
16.20 - 16.35		FIDIA	GUIDETTI TECHNOLOGY	/		
16.40 - 16.55		BDF DIGITAL	WENGLOR	/		
17.00 - 17.15	CONVEGNO ASSOCOMPOSITI Tecnologie avanzate e automazione per il settore dei materiali compositi	COSEMA TRADING	STAR AUTOMATION	/		
17.20 - 17.35		POLYWORKS EUROPA	ELETTROCABLAGGI	/		
17.40 - 17.55		/	POLYTEC	/		

-  Macchine utensili e tecnologia meccanica / Machine tools and manufacturing system
-  Tecnologie ICT e Digitali / ICT and Digital technology
-  Metrologia e Qualità / Metrology and quality
-  Robotica / Robotics





圖 5 BIMU ROBOTGAMES 機器人競賽

本屆義大利 BIMU 展亦是歐洲工具機業合作委員會(European Committee for Cooperation in the Machine Tool Industry, CECIMO)支持的歐洲工具機展之一，該會會員為各國的國家型組織，收納了 15 個國家的國內工具機業組織，並代表西歐所有主要工具機製造商。其會員總數超過 1,500 家企業，為國際工具機市場潛力最大的單一資源。2022 年 CECIMO 會員佔有世界產值的 32%(圖 6)，而歐洲、北美洲為我國工具機出口地區除亞洲之外最主要區域(圖 7)，義大利與台灣分別為世界第 5 及第 7 大工具機生產國(圖 8)，我國企業參與本次歐洲工具機展，可持續拓展出口動能。

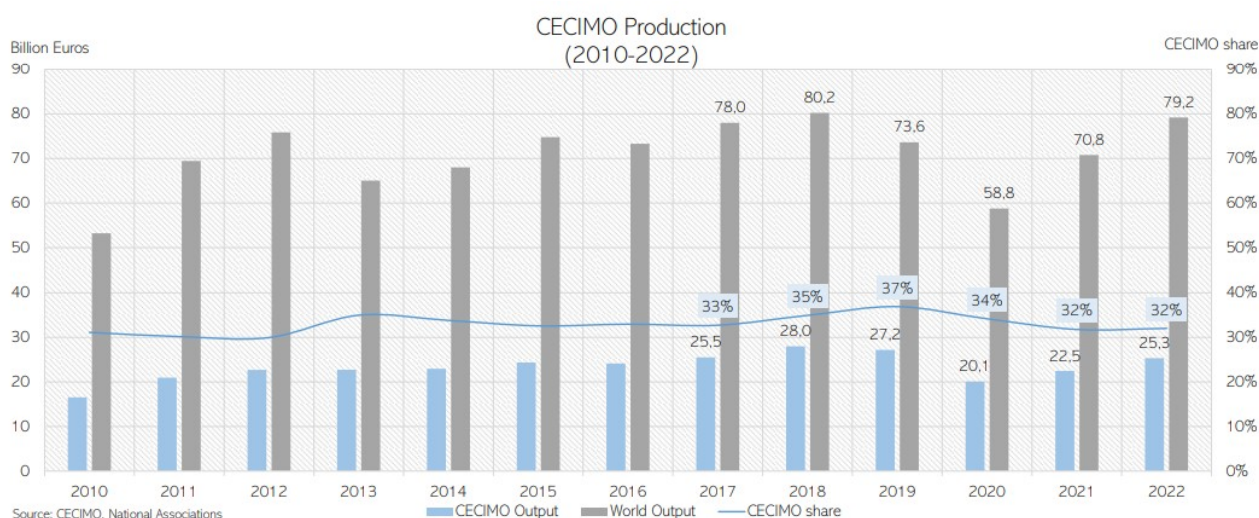


圖 6 歷年歐洲工具機業合作委員會會員產值

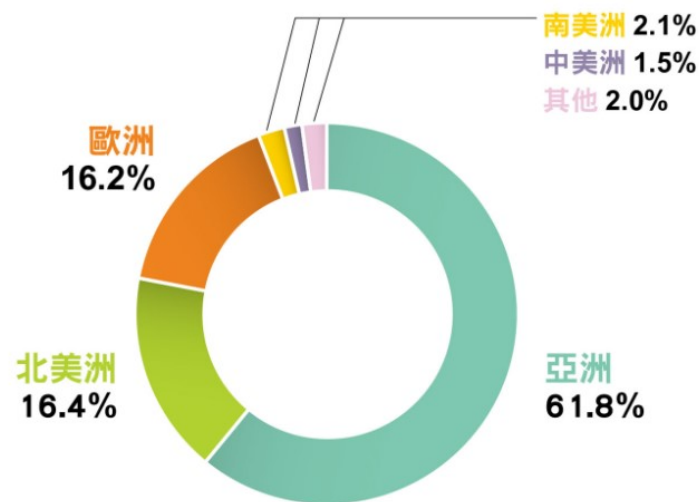


圖 7. 2024 年 1-8 月台灣工具機出口也區別比重圖(工具機與零組件雜誌 164 期)

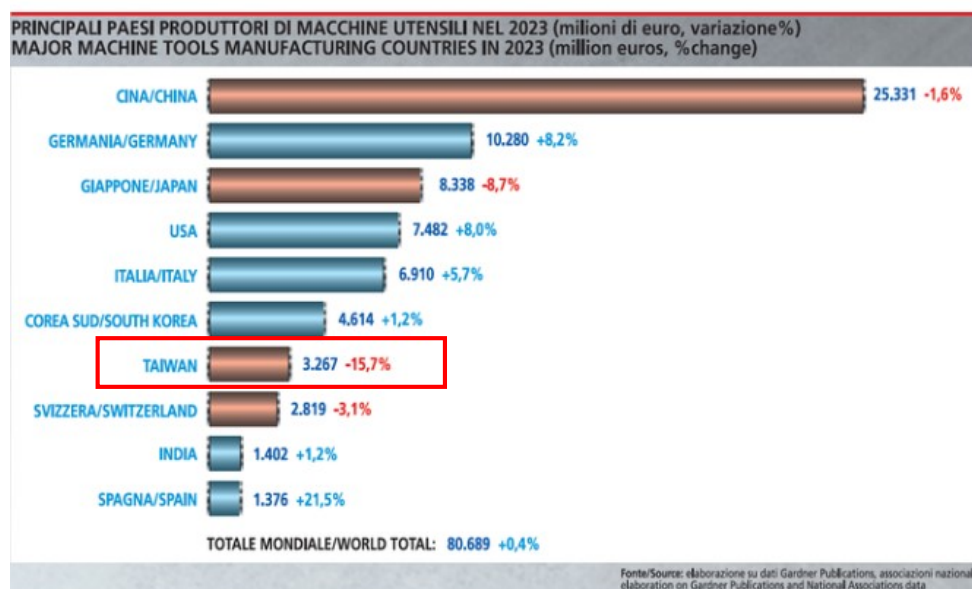


圖 8. 2023 年工具機生產國產值(ucimu)

本次展覽廠商中，全球工具機領導品牌包括 Hexagon、Mazak、Mitutoyo、Renishaw、SCHUNK、SIEMENS 及義大利知名品牌 D' ANDREA、SIGMA、FIDIA、SCM、BRETON、PIETRO、VIBITECH 皆有參展，我國則有上銀、友嘉、永進、台中精機等廠商參與，本次參加展覽之主要目標是了解新技術的應用和發展趨勢，並對「五軸工具機的關鍵零組件、技術和產品」及「工具機品質長效量測的技術、產品」深入了解，以下即對各大廠所展出項目與展場技術研討會、論壇和講座內容，對業界目前所著重之技術、趨勢和挑戰摘要說明：

1. 量測儀器及品保展區

本展區為本次參觀目的最重要的項目，量測儀器指標廠商如 Renishaw、Zeiss、Hexagon、Keyence 及 Werth 皆有參展(圖 9)，展示許多量測機台新產品，基本上都是光學的量測儀器，包括三次元量測儀(Coordinate Measuring Machine, CMM)、3D 掃描儀等等，力學相關的量測設備較少，可能表示出目前廠商或者業界較青睞非接觸式的量測設備。



圖 9 指標性量測大廠 Renishaw、Zeiss 儀器展示

ZEISS 展示 O-INSPECT 多感測器量測機器(圖 10)，以光學或接觸方式對每個特性進行最佳測量，其具有出色的光學性能，高影像清晰度、最佳對比度，可獲得精確的量測結果；並可使用接觸測量、光學測量、白光測量等多感測器技術，適用不同目的之檢測。ZEISS INSPECT X-Ray 產品(圖 11)，目的是利用 X-Ray 評估缺陷、結構與組合情形，產出易於理解的報告。

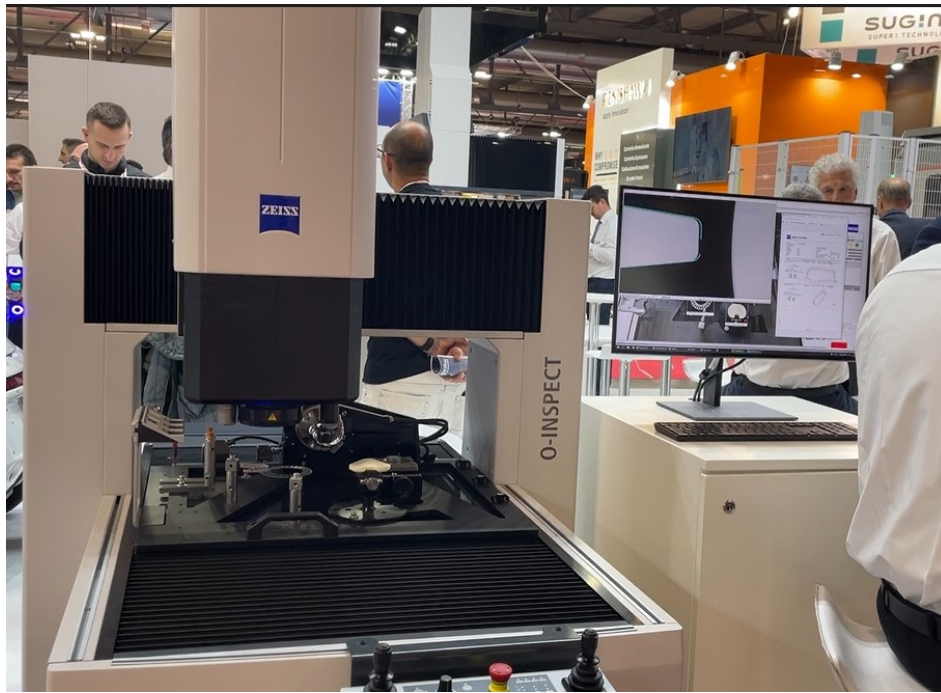


圖 10 ZEISS 展示 O-INSPECT 多感測器量測機器



圖 11 ZEISS 介紹 INSPECT X-Ray 產品技術

Mitutoyo 展示新量測機台 Roundtracer Flash 為一款高速高精度的非接觸形狀量測儀 (圖 12)，利用最新影像感測器技術，透過 2D 影像架構，在不進行垂直移動的情況下快速量測長度達 300 mm 的工件，能在數秒內完成多個零件的靜態或動態量測，適合量測螺紋、葉片等複雜形狀，應用於汽車、電子、航太及醫療等產業。並具備高度耐

久性、穩定性且易於維護，能提升生產效率並確保產品品質，特別適合需要高精度及高速度的現代化生產環境。



圖 12 Mitutoyo 新量測機台 Roundtracer Flash

Mitutoyo 展示 MeasurLink 相關技術(圖 13)，專門用於工業上的統計製程管制 (Statistical Process Control, SPC) 軟體，主要功能是即時數據收集和分析設計，即時呈現統計結果如管制圖等。透過多套量測儀器與 MeasurLink 軟體搭配使用，監控和控制實驗室或廠內製程是否有異常，可提高生產效率及減少因製程異常造成的產品報廢和退修加工成本。隨著工業 4.0 和智慧製造的推進，企業開始重視數據呈現的製程控制和品質管理，這類的 SPC 軟體可以幫助企業實現數據的即時監控和分析，從而提高整體製造業的水準。



圖 13 Mitutoyo 製程管制技術 MeasurLink

2. 工具機及零組件展區

工具機相關的展區大部分展示工具機機台搭配虛擬加工(Virtual Machining)應用，值得我國廠商借鏡，對於工具機品質長效量測技術，因現場多數以產品銷售為主，無法獲得更多技術細節，而經洽詢結果，參展廠商都是對自家產品深具信心，比起評估機台使用壽命、平均故障間隔，參展廠商更著重於故障發生時的客戶端服務，能即時進行監控，快速派員檢修。

現場所產示之虛擬加工技術(圖 14)，可在實際加工之前，透過模擬的方式確認工件加工品質或參數配置問題，是一種結合虛擬現實技術和工具機加工技術的系統，可針對特定廠商工具機進行模擬，改變刀具型式、工件材料、切削速度、冷卻液的類型等等，完整模擬現實加工的情境，並呈現加工過程的模擬結果，如切削力、溫度分布和應力分布等，也可以產生 3D 圖檔用於後續的加工品質的評估(如：使用虛擬 CMM 量測工件尺寸或者平面度)。技術的好處主要是可節省材料和降低成本，在虛擬環境中進行模擬加工，避免浪費材料，可提前調整機台的參數，提高加工精度。

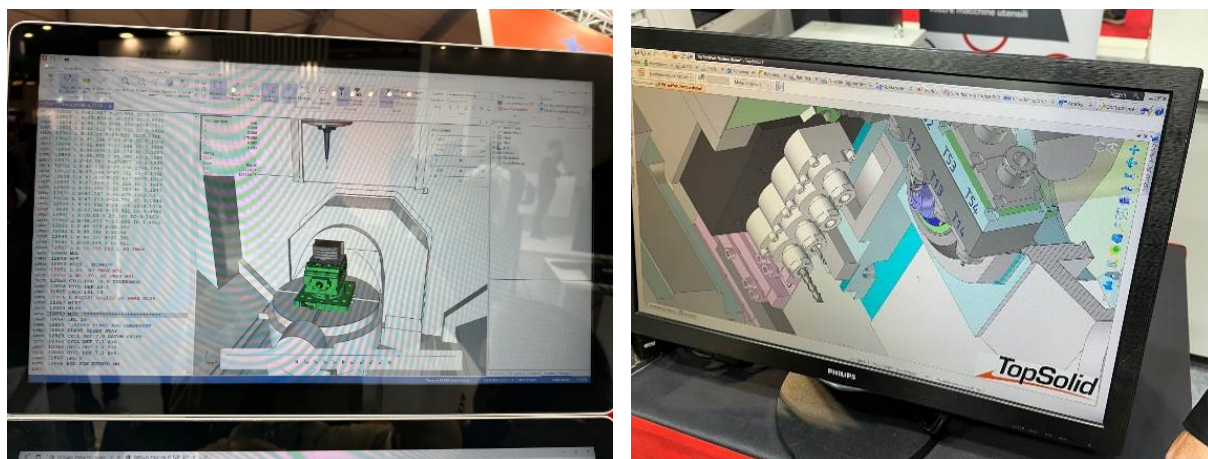


圖 14 現場展示之虛擬加工技術

3. SIEMENS 公司(西門子)永續及減低能源消耗

西門子公司工具機部門在永續及減低能源消耗的方法(圖 15)，首先需通盤瞭解整個工具機運行過程能源消耗的分析，例如主軸運作消耗比例、輔助單元消耗比例，依德國 Darmstadt 工業大學所作研究、主軸可佔 80%能源消耗，西門子公司藉由分析能源消耗運作模式，建立了 control-e advanced analysis，可立即檢視能源使用分析，並可選擇需不需要關閉輔助裝置，或是在短暫休息時間，暫停主軸運作或是冷卻系統，在特定時間關閉特定單元。在減少無生產力時間所消耗的能源部分，例如操作員在對工具機輸入指令時，仍有多項測試在進行，工具機會消耗許多能源，無法做任何有生產力

的事，此時可利用數位孿生模式以虛擬機軟體來測試驗證和運行，減少機器的負載。最後優化加工程序，依據各種產業的生產環境與結構，例如切削工具在適當的時機依據材料硬度或刀具條件，加速或減慢運轉，縮短循環周期，同時也減少輔助單位的運作等，因此可以減少能源消耗，另一個好處是延長刀具使用壽命。

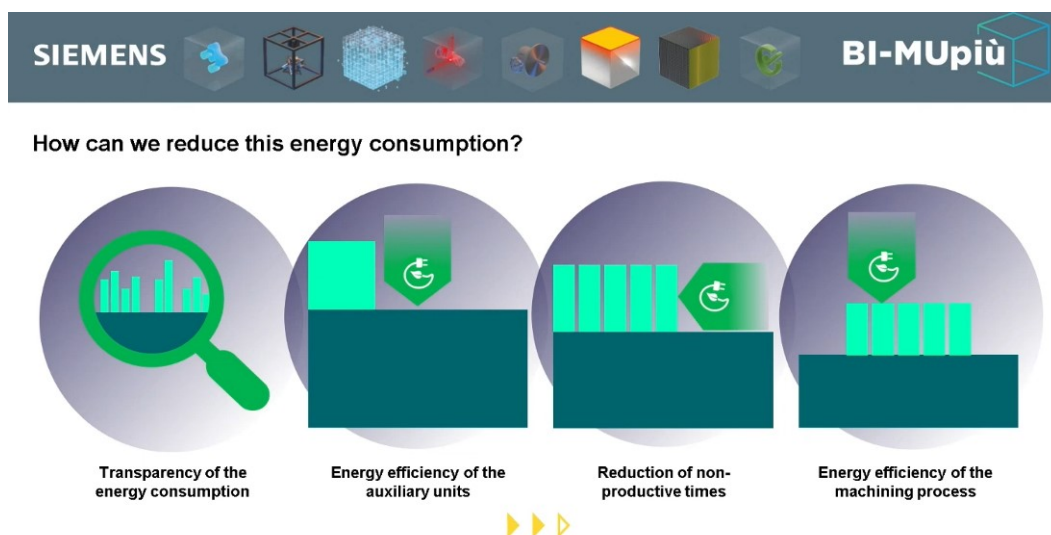


圖 15 西門子公司降低工具機能源消耗方析

4. POLYWORKS 公司量測數據共享

POLYWORKS 是一家機械產品建模套裝軟體公司，在全球前 100 機械製造商均有使用，包含了八間大型汽車公司，該公司介紹了他們的軟體在產品設計、加工、驗證及產出階段所能提供的服務，但最重要的是，在量測檢測上，他們的重點在 DATALOOP 可共享測量數據，具有資料互換性(圖 16)，這是該公司軟體的一大優勢，並可創造出通用的檢測流程，提高產品的適用性及加速人員訓練。

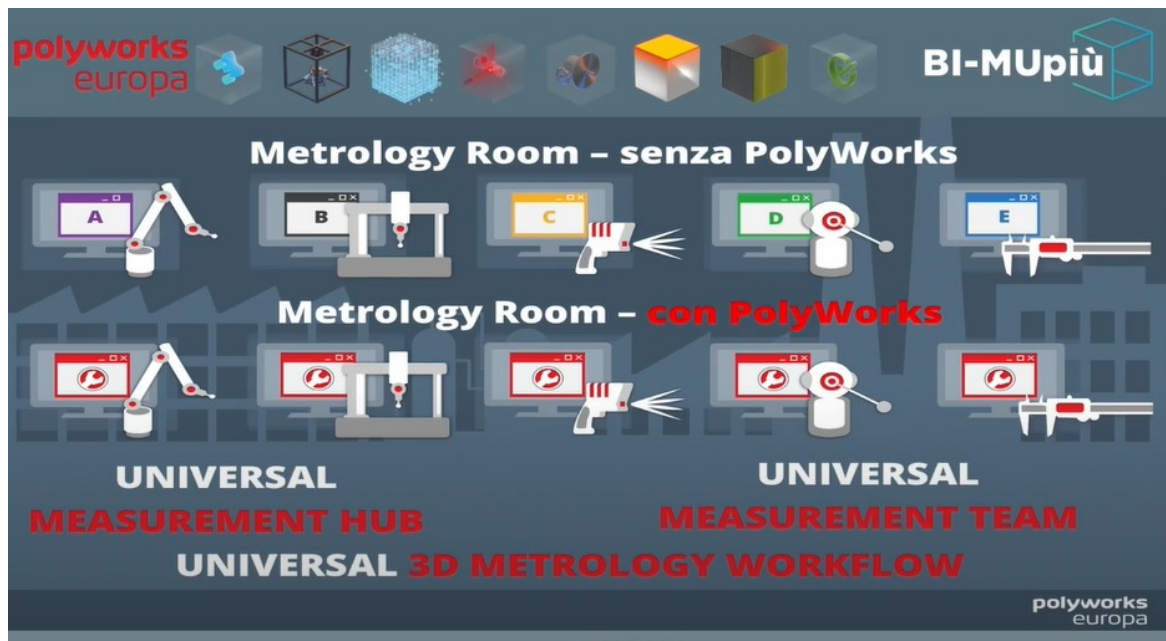


圖 16 PolyWorks 公司具有通用量測檢測流程

5. 圓桌會議-重要的技術趨勢主題討論

本屆所安排的特色展演場地(BIMU piu)，除提供參展廠商介紹各自產品與技術外，並邀集產官學界代表參與一系列的討論會(圖 17)，討論主題有「機器人市場演變：全球趨勢與歐洲觀點」、「未來的技術趨勢」及「人工智慧與機器人：邁向協同整合」等，參與者包含 UCIMU 主席、I-RIM(義大利機器人和智慧機器研究所)主席、IFR(國際機器人協會)主席、SIRI(義大利機器人和自動化協會)主席探討近期最重要的技術趨勢，如人工智慧、協作型機器人的新應用、移動機械手臂、數位孿生、人型機器人等；從本屆展覽中，可以觀察到全球關注度最高的人工智慧、人型機器人仍持續是未來工具機產業必需應用的方向之一。

本屆展覽會產官學界對於未來技術趨勢簡述如下：**數位孿生**，研究、教育和機器人間的關連，德國教授 Alexander Verl 指出比起 AI 及人型機器人，數位孿生是有明顯成果的項目，利用虛擬化來嘗試並製作自己的數位孿生模型，進行實驗及預測，達到實體的優化，數位孿生是很值得持續推廣的領域。**協作型機器人**作為與人相互合作的模式，雖然只是佔工具機的一小部分，但數量持續有增加，在學術界部分要持續給予實務經驗，提供學生更多的學習經驗，以便準確地了解新技術，並針對協合機器人安全部分，要對整個單元進行安全考量，而不是單一個安全的協合機器人。在**人工智慧與機器學習**部分，此項技術使我們生活在具顛覆性的時代，無時無刻的創新，使我們的技術推展不再是以線性模式進步，開發新技術的人員通常都會有新思惟、新的思考模式，公司需要有創新又開放的管理層，對於新技術的風險持開放態度並且具有遠見，

無時無刻接受面臨新的挑戰，才能適應現代的快速發展。人型機器人在工業應用並不是主導項目，因為不需要人型機器人做特定繁重的工作，有更多更好的機器正在使用，至於為何目前受到如此關注，第一個原因是如果想要在家裡使用機器人，那麼就需要看起來像人類或有類似控制的手形態的服務型機器人，另一個原因則是，機器人技術真正進步的原因是允許輕鬆編輯程式或無需編輯程式提供機器人運作，AI 技術使得大型語言更加容易，讓人型機器人可以直接學習人的動作而不是依靠程式編碼修正。

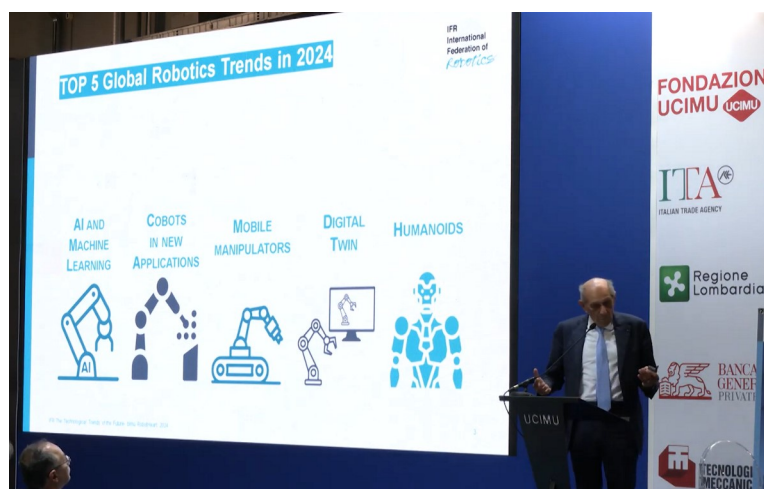


圖 17 技術趨勢討論會

(二) 拜訪德國聯邦物理技術研究院

德國聯邦物理技術研究院(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)成立於 1887 年，為世界上最早之計量標準機關，亦稱為德國國家度量衡標準實驗室，為全球盛名度量衡標準機構之一的計量技術先進國家，我國 SI 質量新標準相關量測系統即透過 PTB 協助下完成建置。

PTB 為德國國家級計量機構，隸屬於德國聯邦經濟事務和能源部(Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, BMWi)，授權該國最高量測標準，計有 9 個分組、2 個管理部門，分組包含有力學與聲學(Mechanics and Acoustics)、電學(Electricity)、化學物理與防爆(Chemical Physics and Explosion Protection)、光學(Optics)、精密工程(Precision Engineering)、游離輻射(Ionizing Radiation)、溫度與同步輻射(Temperature and Synchrotron Radiation)、醫學物理與計量資訊科技(Medical Physics and Metrological Information Technology)、以及法定計量部門(Legal and International Metrology)，德國透過多邊協定及合作計畫，直接或間接協助超過 80 個發展中或新興國家建立計量基礎建設，包含技術諮詢，技術協助及提供訓練、協助計量基礎建設等，為計量技術之先進國，2023 年，PTB 年度預算約 2.6 億歐元，另為研究項目籌集的額外第三方資金約 2,400 萬歐

元。目前員工近 2,100 人，其中 1,700 人在布倫瑞克院區，下圖為 PTB 組織架構。

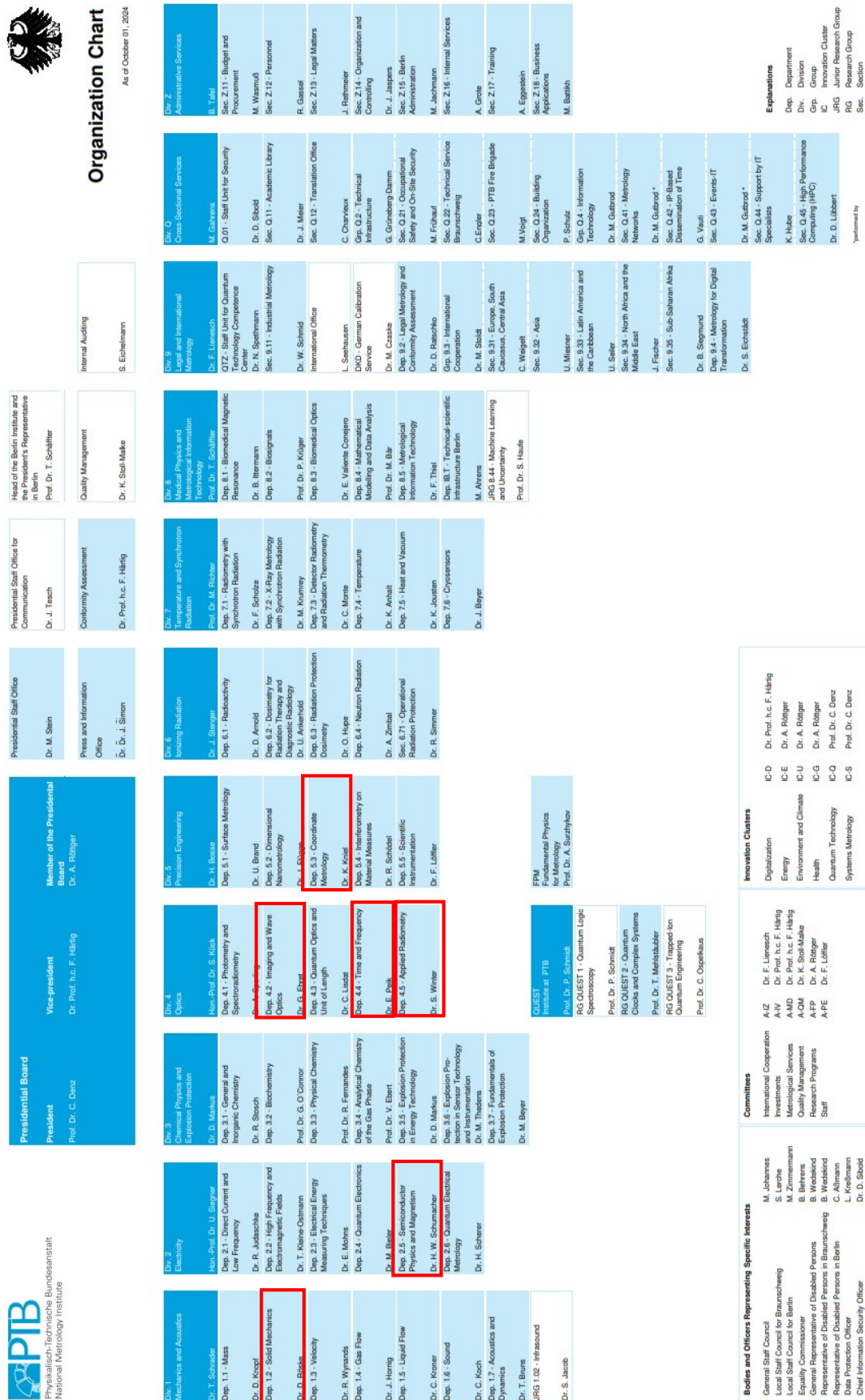


圖 18 德國聯邦物理技術研究院組織架構圖

本次計參訪 PTB 第 2 組之 2.5 半導體物理和磁力學部門、第 4 組之 4.24 非球面量測工作小組、4.43 光鐘工作小組、4.53 太陽能模組工作小組、4.55 單光子計量工作小組、第 5 組之 5.32 座標量測系統工作小組、5.34 多感測器量測工作小組、量子技術創新研究計畫及第 1 組之 1.2 固體力學部門力量量測實驗室參訪。下表為 PTB 針對我方拜訪需求所提之規劃，訪問內容如下：

表 5 PTB 拜訪行程表

Date Time	Item	Contact person
Monday 14th Oct 2024 08:45 h	Arrival at PTB, pick-up at entrance and accompanying the delegation	Ms. Mai Seliem Phone +49 531 5928309 Vieweg Building, room 326
09:00 to 09:30 h	Visit of Working Group 4.24 Asphere Metrology	Dr. Ines Fortmeier phone: +49 531 592 4240 Laue Building (entrance)
09:30 to 10:00 h	Visit of Working Group 5.34 Multisensor-Coordinate Metrology	Dr. Ulrich Neuschaefer-Rube phone +49 531 592 5311 Bessel Building 1 (entrance)
10:00 to 10:30 h	Visit of Working Group 5.32 Coordinate Measuring Systems	Dr. Daniel Heißelmann phone: +49 531 592 5320 Euler-Building 1
10:45 to 11:15 h	Visit of Department 2.5 Semiconductor Physics and Magnetism	Dr. Thomas Gerster phone +49 531 592 2536 Meissner Building
11:30 to 12:15 h	Lunch break	
12:30 to 13:15 h	Visit of Working Group 4.43 Optical Clocks	Dr. Nils Huntemann phone +49 531 592 4430 Kopfermann-Building (entrance)
13:45 to 14:30 h	Visit on topic Single photon measurement	Dr. Hristina Georgieva phone +49 531 592 4544 Dr. Stefan Kück phone +49 531 592 4010 Einstein Building (entrance)
14:45 to 15:15 h	Visit of Working Group 4.53 Solar Modules	Dr. Stefan Riechelmann phone +49 531 592 4149 Solar Tubus (entrance)
15:30 to 16:15 h	Meeting on topic Quantum Technology	Dr. Nicolas Spethmann phone +49 531 592 2009 Central Building, 403 (Diko-room)
16:15 to 17:00 h	Meeting with the Vice President of PTB	Dr. Prof. h.c. Frank Härtig phone +49 531 592 2000 Central Building, 403 (Diko-room)
Tuesday 15th Oct 2024 10:00 -14:00	Visit 1.2 Solid Mechanics Department of Mechanics and Acoustics Division on Mass	Dr. Tegtmeier Force Measuring Technique Working Group

1. 第 2 組 2.5 半導體物理和磁力學部門

PTB 第 2 組為電學組別，負責電和磁單位的實現和傳播，即電力學常見的伏特、歐姆及安培單位。此部門開發了基於電量計量學和量子標準的精密電磁測量，將奈米技術應用於超導體和半導體量子標準製造，並以凝聚態量子效應基礎研究為未來的電氣計量學奠定了基礎。

電學組別下 2.5「半導體物理和磁力學」部門進行半導體量子標準的研究和開發工作，發展奈米尺度和太赫茲頻率範圍內電量和磁量測量，研發主題包含介觀維度下半導體結構中的傳輸、半導體單電子傳輸及量子電流標準品、霍爾效應的量子電阻標準、低維度半導體的分子束磊晶等。該部門 2.53 工作小組介紹了 Non-adiabatic Single-Electron Pumps(非絕熱單電子泵，圖 19)，單電子泵是基於修訂後的國際單位系統 SI 的基本電荷直接實現基本單位安培的方式之一，單電子源可望在新的研究領域單電子量子光學中進一步應用，有望為量子技術提供新的工具。

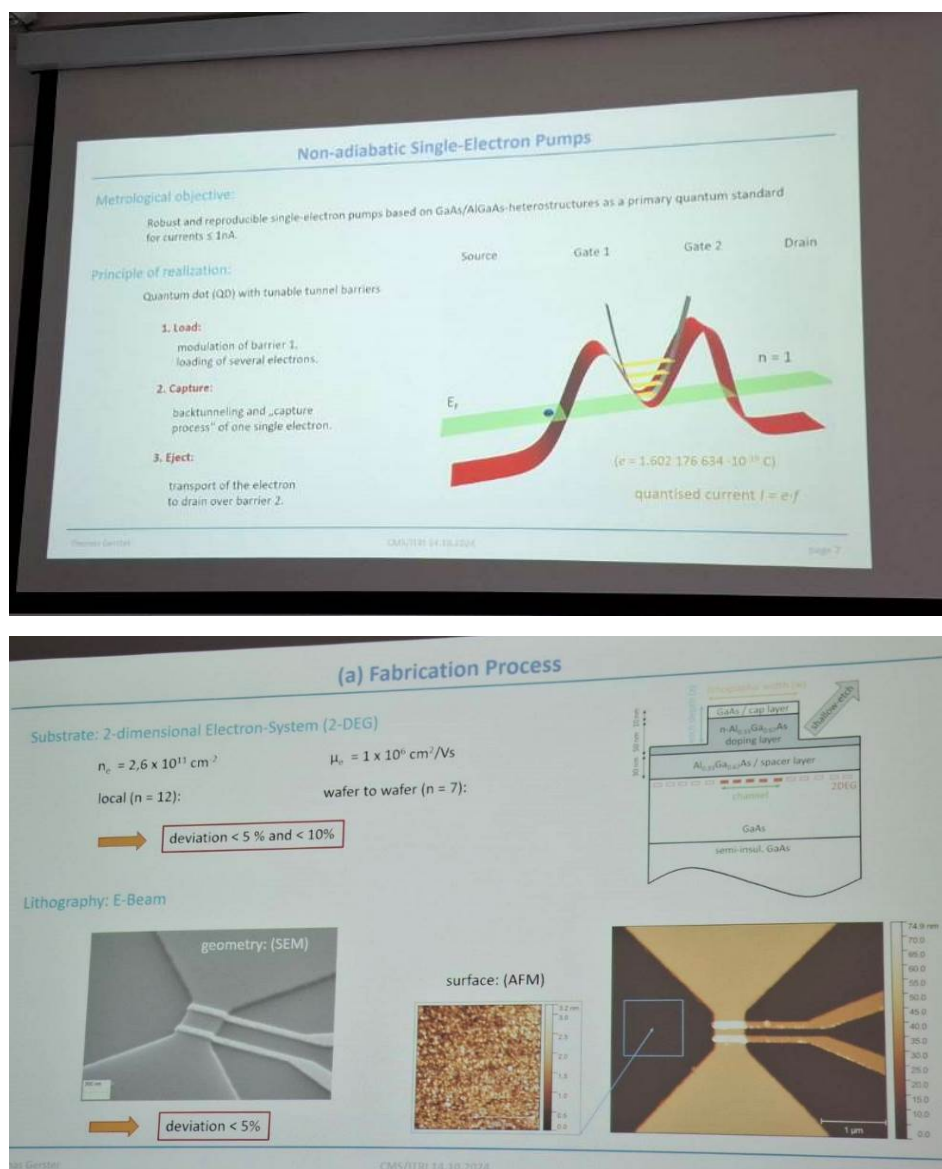


圖 19 非絕熱單電子泵介紹

2. 第 4 組 4.24 非球面量測工作小組

PTB 第 4 組為光學組別，負責長度、時間和光強度基本單位，並針對各種光學量測訂定最高精度的標準和測量方法。

光學組別下 4.24 「非球面量測工作小組」的目的是以精確的測量技術來確定非球面的形狀並將測量結果追溯到參考標準和參考設備。目前正在開發一套計量系統，以光學操作傾斜波干涉儀（optically operating tilted-wave interferometer，圖 20）測量非球面的表面形狀以實現測量不確定度非常低的可追溯測量技術，從而滿足當前和未來的要求。

PTB 所開發的傾斜波干涉儀量測系統，可用於量測非球面的表面形狀，並確保有足夠低的量測不確定度，可應用在加工精度受限於表面形狀量測精度的情況，並可用於量測非球面之自由曲面(不具有旋轉對稱性的光學表面)。

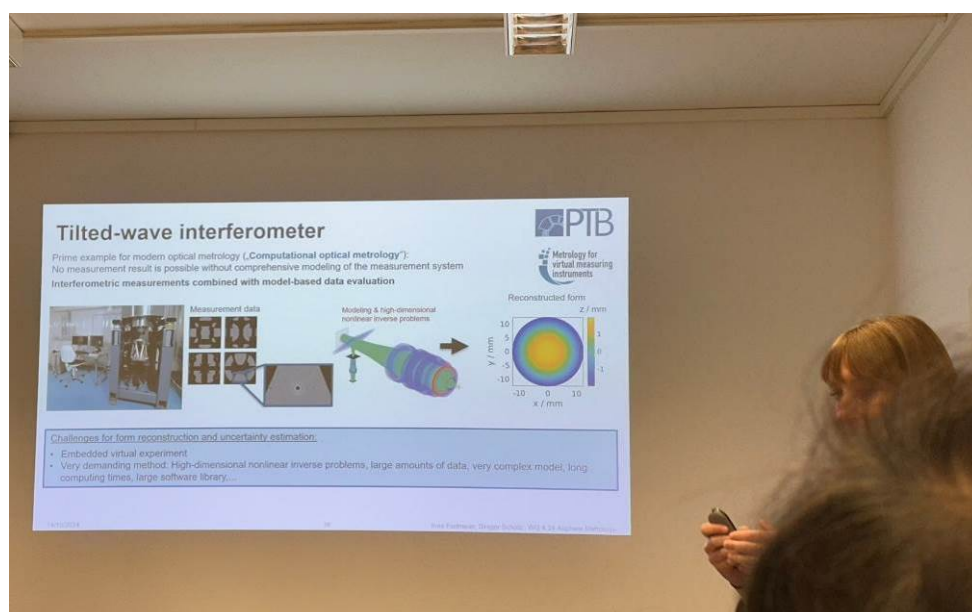


圖 20 傾斜波干涉儀 技術介紹

3. 第 4 組 4.43 光鐘工作小組

第 4 組光學組別下 4.4 部門為「時間與頻率標準部門」，該部門為負責秒的實現和傳播，為德國法定時間傳播機構，其實現德國秒定義計由 2 組傳統銻鐘(CS)及 2 組銻噴泉鐘(CSF)來實現(圖 21)，德國 PTB 為貢獻國際協調時權重主要之實驗室。



圖 21 德國 PTB 傳統銫鐘(CS)與噴泉式銫鐘(CSF)

4.43 為「光鐘工作小組」，該工作組致力於基於捕獲離子(trapped ions)的光學時鐘的研究和開發(圖 22)，採用鐮離子(Yb⁺)的躍遷頻率，不確定度已可達 3×10^{-18} 。高精度的光學時鐘使未來基礎研究的新應用成為可能，特別是對於相對論的假設及預測，將可能在物理學領域產生新的發現。

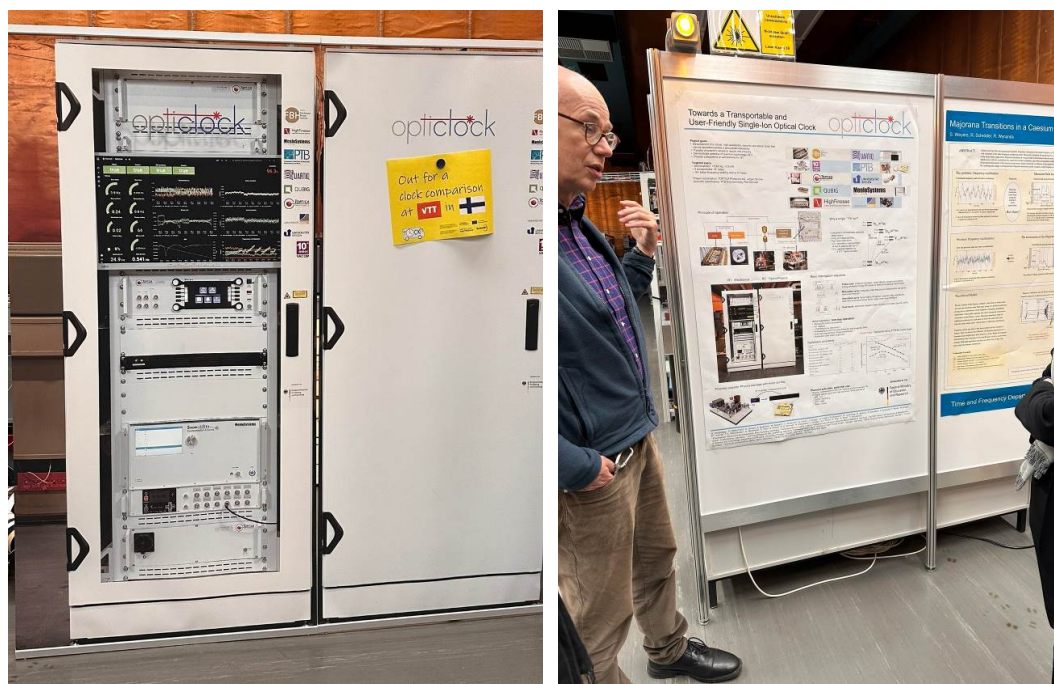


圖 22 PTB 光鐘(世界上最精確的鐘)介紹

4. 第 4 組 4.53 太陽能模組工作小組

光學組別下 4.53「太陽能模組工作小組」成立於 2018 年，負責太陽能組件初級和次級校準的校準方法，該小組建立了室外測量設施，能夠測量光電模組的受風及角度之影響，提供 IEC 61853 進行完整光伏組件校準的可能性。

負責人介紹太陽能模組的校正方式，分為室內以及室外的方式(圖 23)。室外的校正系統還有配備 Sunlight tracing 的系統，可以根據不同的太陽角度調整量測系統角度，才能得到最好的量測效果；當室外天氣狀況不佳時，則可以透過 LED 太陽模擬器進行量測。



圖 23 太陽能板室外、室外校正設備

5. 第 4 組 4.55 單光子計量工作小組

光學組別下 4.55「單光子計量工作小組」，為研究用於輻射和計量應用的單光子源。利用共軛焦顯微鏡(Confocal Microscopy)，在室溫和可見光譜範圍內進行微光致發光光譜分析，光譜研究包括光子通量、光譜和單光子純度的測量，並致力於單光子發射器優化角度相關發射，以提高量子效率。

6. 第 5 組 5.32 座標量測機械(CMM)工作小組

PTB 第 5 組為精密工程(Precision Engineering)組別，該部門的主要任務是透過應用專用測量儀器、方法和標準，確保不同長度和角度範圍內工業測量的可追溯性，並研究和開發新的測量方法、儀器和標準。此外，該部門也從事計量領域基礎的製造和測量任務，為整個 PTB 提供特殊零件和精密儀器的建造和製造服務。

精密工程組別下 5.32「座標量測機械工作小組」，為開發有效率且精確的座標量測系統(CMM)檢查標準和程序以及工業測量校準標準提供產業支援。該小組並致力於開發和改進計量數位孿生，例如虛擬座標測量機 VCMM，這項技術能夠模擬實際 CMM 量測過程，為日益數位化的工業、經濟和社會中的不確定性評估提供必要的工具

該部門所提供的 CMM 校正服務，具有多部接觸式、光學式等多軸測量裝置，並有目前世界上最大之高精度、超大尺寸的三次元量測儀和齒輪檢測系統 Leitz PMM-G 系統(圖 24，測量體積：5,000 mm x 4,000 mm x 2,000 mm，我國 NML 機型為 Leitz PMM-C ultra，測量體積：1,200 mm x 1,000 mm x 700 mm)，該系統常用於量測航太、船舶引擎和風力發電機的大型齒輪，能夠在處理大尺寸工件時，仍保有較小的測量儀的精度及性能，這些特點使得 Leitz PMM-G 為大型工件量測的理想選擇，並在工業界廣泛應用。

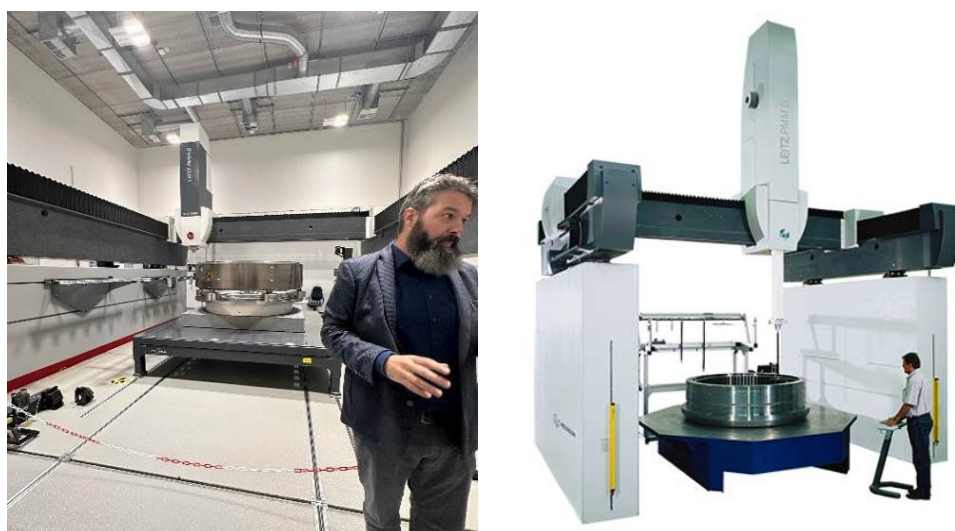


圖 24 Coordinate Measuring Systems(Leitz PMM-G)

7. 第 5 組 5.34 多感測器量測工作小組

精密工程組別下 5.34「多感測器量測工作小組」開發了用於測試觸覺和光學感測器以及 CT 測量系統的製品和程序，以因應座標計量中，越來越多以多感測器進行測量，將不同感測器的量測數據結合成一個多感測器數據集，以提高量測的完整性和準確性。另亦有光學感測器的應用，其優勢為能快速且無接觸地量測，特別適合用於具彈性的工件、容易受損表面以及微小零件的量測。

本次觀摩其工業 X-ray CT 系統，使用斷層掃描（CT）技術進行尺寸量測(圖 25)，這種無接觸量測技術能夠高密度地取得工件的完整幾何形狀及量測工件之內部結構。

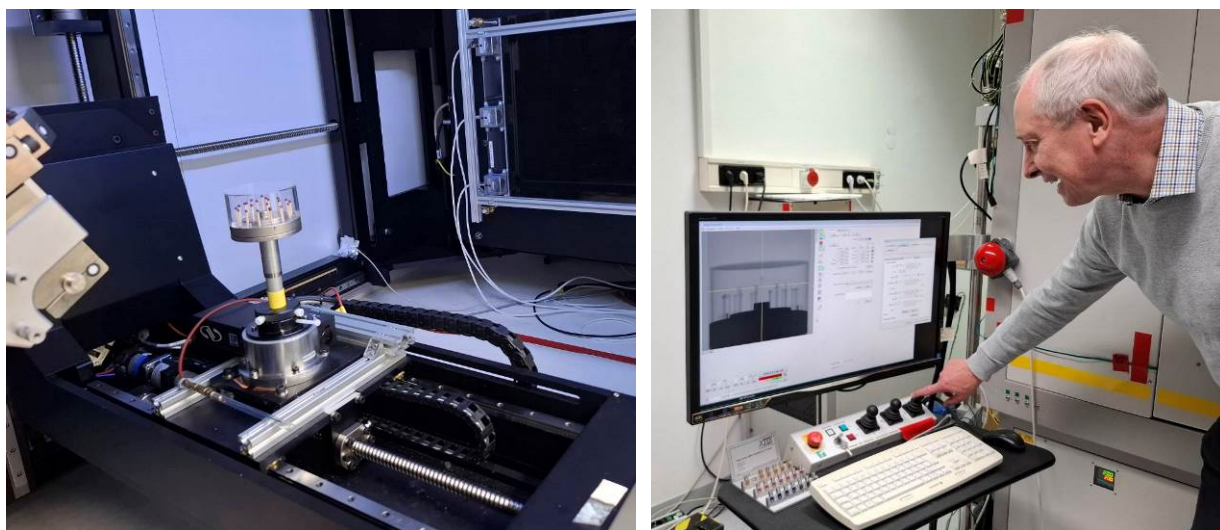


圖 25 工業 X-ray CT 系統

8. 量子技術

PTB 憑藉著卓越的量測技術能力，在量子技術領域具有重要的研究地位，未來將憑藉著新原子鐘、精確的電氣標準及創新的測量技術進一步推動量子技術發展，PTB 最近成立了量子技術能力中心(QTZ)，專注於量子技術的應用，將成為量子技術產業化發展的重要基礎，QTZ 的技術研究方向為(圖 26)：

- (1) Quantum Metrology for Time & Frequency and for Ultrastable Lasers：光學時鐘研究，致力提升時間的準確定性，邁向秒的新定義。
- (2) Quantum Magnetic-Field Densors：量子磁場感測，檢測非常微小的磁場，應用於醫學影像、醫學生物標記及量子通訊中。
- (3) Ion Traps：以離子捕獲技術，傳達量子訊息，建立量子位元進行量子計算及模擬。
- (4) Electrical Quantum Metrology：電量子計量，以量子效應建立電流、電壓和電阻測量，實現量子標準。

- (5) Quantum Metrology for Time & Frequency and for Ultrastable Lasers：建立量子密碼學標準，以基於自然法則而不是數學演算法，來實現無法破解的加密技術及進行超弱光訊號如單光子量子輻射測量。

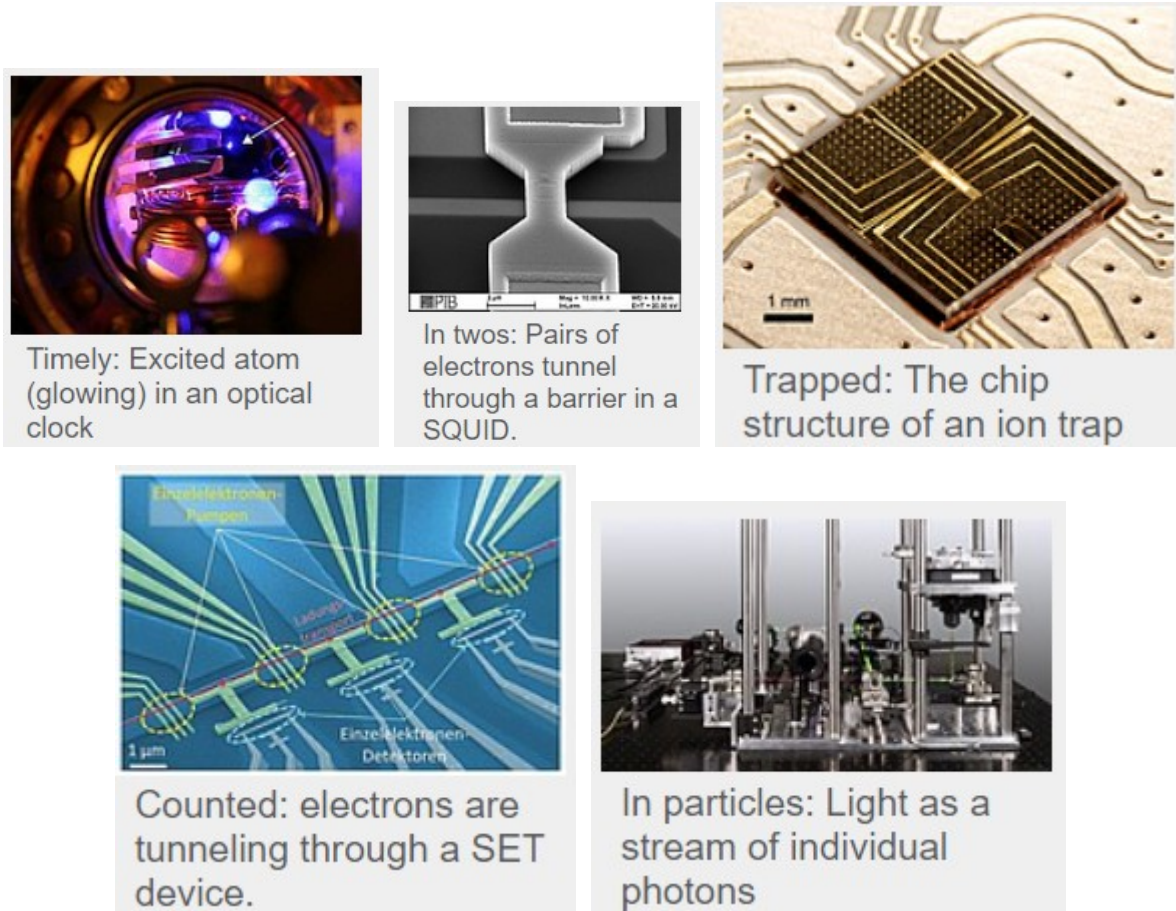


圖 26 QTZ 研究技術方向

PTB 的量子計畫中心的負責人 Nicolas Spethman 介紹有關目前 PTB 量子領域的研究統整說明(圖 27)，目前的量子相關研究包含以下項目：如單光子技術與光鐘技術，單光子是量子運算中的基本單位之一，量子運算利用量子位元來進行計算，單光子可以作為光量子位元來儲存和傳輸量子資訊。光鐘的高精度計時能力也對量子運算有著重要影響，需要精確的控制量子位元才能夠提高量子運算的準確性和效率(圖 28)。中心負責人並介紹德國漢諾威至布倫瑞克 PTB 間所建立半導體單光子源高速城際間量子金鑰分配(QKD)計畫，計 79 公里長的量子互聯網之實驗(圖 29)，可確保量子通訊的主要優勢。



圖 27 Nicolas Spethman 統整說明 PTB 量子計畫

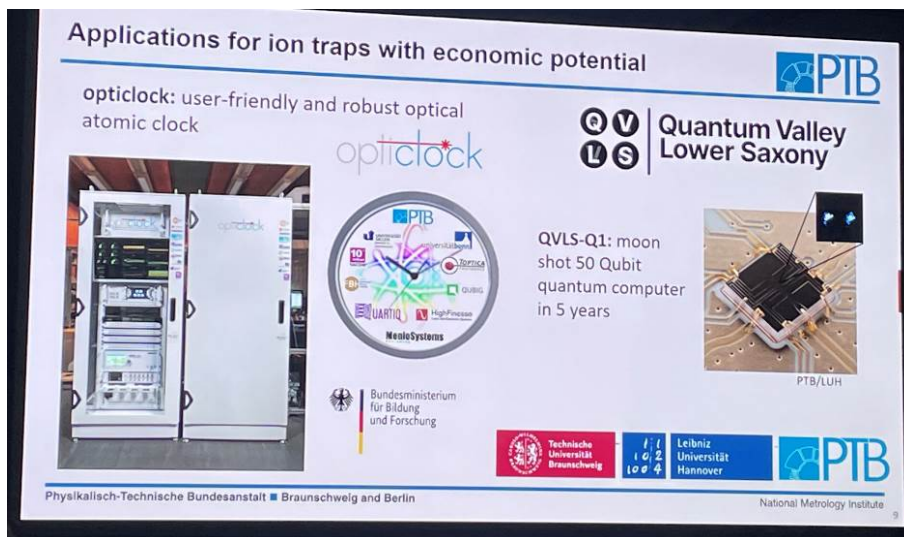


圖 28 光鐘高精度計時能力

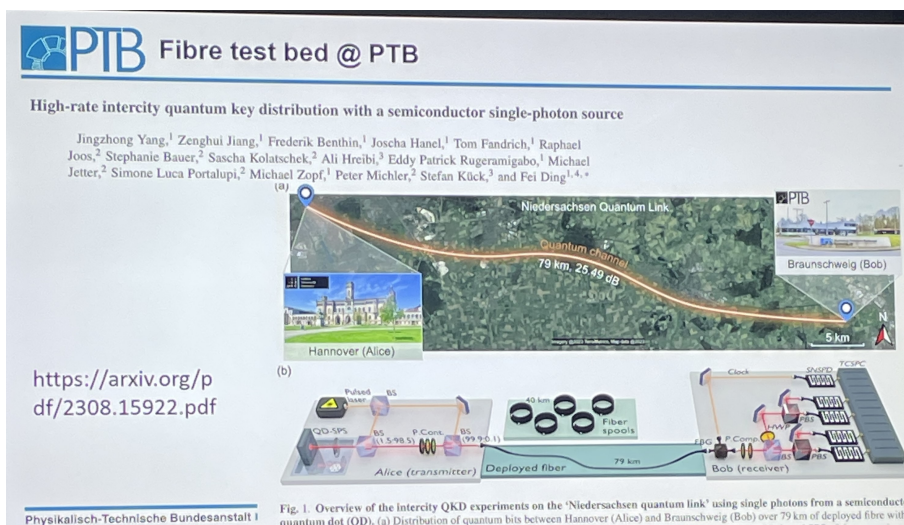


圖 29 半導體單光子源高速城際間量子金鑰分配(QKD)實驗

9. PTB 副院長介紹發展願景

PTB 副院長(Dr. Prof. h.c. Frank Härtig)，目前也是國際測量協會(IMECO)主席，具有座標量測領域專長，Frank 曾於 2018 年親臨我國「SI 質量新標準-砵晶球歡迎儀式記者會」，見證我國新質量單位實現並接軌國際。並且於 2022 年 1 月 COVID-19 疫情期間，親自將已完成球體積與表層質量量測之我國「砵晶球原級公斤標準」送回我國，展現對我國極高之重視與善意。副院長在行程最後進行了 PTB 簡短介紹並結尾，說明 PTB 目前的發展方向以及願景，並留下大合照(圖 30、圖 31)。



圖 30 PTB 關注之全球未來挑戰



圖 31 參訪成員與 PTB 副執行長合照

10. 力學實驗室參訪與實作

參訪第 1 組力學與聲學組別下 1.2「固體力學」部門，該部門主要任務是研究和開發力和扭矩物理量單位的實現和傳播，以及力和扭矩感測器的測試、校正和認證，並設有「力量校正」、「扭矩校正」、「力量量測技術」、「力量與扭矩資訊技術」四個工作小組，產業應用主要為航太、鋼鐵、汽車、建築、半導體、材料等，本次訪談 PTB 力學實驗室固體力學部門，以了解智慧機械產業在力量感測器所需之服務。

PTB 的力量校正系統校正項目類型主要分為 3 種，與我國 NML 規劃類似，分為「靜態力量校正系統」、「動態力量校正系統」及「扭矩校正系統」，具有 0.5 N-16.5 MN 範圍力量標準機，及 0.01 Nm - 1,100 kNm 扭矩校正標準機，總計提供 13 項力量及扭矩校正範圍(表 6，表 7)，我國則有 4 項校正範圍，其設備數量、校正範圍及不確定度部分均優於我國。

表 6 我國 NML 與德國 PTB 力量校正與量測能力比較

我國 NML		德國 PTB	
校正範圍	不確定度	校正範圍	不確定度
0.01 N - 10 N	1×10^{-3}	0.5 N - 200 N	2×10^{-5}
		50 N - 2,000 N	2×10^{-5}
		250 N - 20 kN	2×10^{-5}
5 kN - 500 kN	2×10^{-4}	2 kN - 100 kN	2×10^{-5}
		20 kN - 1,000 kN	2×10^{-5}
100 kN-2,000 kN	5×10^{-4}	50 kN - 2,000 kN	2×10^{-5}
		100 kN - 5 MN	1×10^{-4}
		0.1 MN - 16.5 MN	1×10^{-4}
費用 5000 -20000 台幣		費用 1000 -2000 歐元 (35,000-70,000 台幣)	

表 7 我國 NML 與德國 PTB 扭矩校正與量測能力比較

我國 NML		德國 PTB	
校正範圍	不確定度	校正範圍	不確定度
10 Nm - 5,000 Nm	1×10^{-4}	0.01 Nm - 5,000 Nm	2×10^{-4}
		1 Nm - 20,000 Nm	2×10^{-5}
		20 kNm - 1,100 kNm	8×10^{-4}
		0.01 Nm - 1,000 Nm	2×10^{-3}
		0.001 Nm - 1 Nm	1×10^{-4}
費用 15000 -25000 台幣		費用 1000 -2000 歐元 (35,000-70,000 台幣)	

註、粗體字範圍為 BIPM CMCs 項目

靜態力量校正系統採用之靜法碼機台，力量可達 2 MN(圖 32，我國 NML 為 50 kN)，機台高達三個樓層，配有專門的吊掛系統用於執行校正作業。



圖 32 2 MN 靜法碼力量標準機及操作系統

靜態力量校正系統採用之油壓式校正機台，力量可達 16.5 MN(圖 33，我國 NML 為 2 MN)，有專用的機械手臂用於吊掛待校件，並具有獨立之操作空間。



圖 33. 16.5 MN 油壓式力量標準機

扭矩校正系統，具有最大能量達 5 MNm 扭矩校正機(圖 34，我國 NML 為 5 kNm)，尺寸大小為 17 m x 9m，主要是因應綠電發展而建立的系統，為全世界最大的扭矩校正

機，用於校正風力發電機所需使用的扭矩感測器，其直徑達 1.5 m，亦需有專門之吊掛系統協助，這台校正機除了扭力的校正，還可提供六軸向的施力測試。如以現今風力渦輪機性能提升係透過增加尺寸來實現情形下，當風機直徑達 220 m(發電量可達 12 MW)，其在轉速 10RPM 時，所產生之扭矩達 11.5 MNm，以目前設備尚不足以直接進行校正。



圖 34.5 MNm 扭矩校正機

我國標準實驗室力量比較系統服務數，每年直接服務量約 400 件，目前服務能量範圍及不確定度需求尚符合我國各產業需求，如在大力量部分，我國目前大部分需求在 2,000 kN 以下，服務對象如中鋼、華航，高鐵等公司，至於 2,000 kN 以上之服務部分，目前我國則有 1 家具 TAF 認證可達 10,000 kN 校正實驗室，其校正追溯係送自國外辦理。未來在力量領域如有擴充需求，PTB 的校正系統分類與我國類似，且其校正範圍的多樣性，將有助於我國系統擴充的速度。

參、心得及建議

- 一、 我國工具機廠商在近年產業衝擊下，出口表現受到影響，為推廣我國工具機至國際，應積極參與國際型大型展覽進行展出；我國為本屆 BIMU 參展家數第三大外國廠商，足以拓展我國工具機國際能見度，實屬可貴。
- 二、 工具機品質長效量測技術目前尚非各大工具機廠商重點項目，各大廠多採以機具耐久性、可靠性之保證為產品進行推銷，並以具完善的售後服務，在機具故障時能快

速派員解決加強顧客信賴程度。雖然以評估機台使用壽命、平均故障間隔建立工具機使用預測技術尚未成為主流，但本計畫持續有業界積極參與合作，仍具有工具機技術發展的重要性。

- 三、 工具機搭配虛擬加工技術，已成為各大工具機應用之一，近年持續推廣數位雙生概念，該技術在虛擬環境中進行模擬加工，可以節省材料、降低成本、避免浪費，可提前調整機台的參數，提高加工精度值得本國廠商借鏡。
- 四、 本次德國 PTB 介紹技術發展部分，在量子技術及應用著墨許多，包含單電子泵基本電荷實現、量子磁場檢測、單光子城際傳輸技術、離子補獲光鐘技術及量子密碼學標準等，可提供我國度量衡標準實驗室技術發展方向參考。
- 五、 德國 PTB 的力量校正系統架構與我國類似，其校正系統數量及能量範圍遠高於我國，因此可服務更多且需求特殊之廠商與產品，可做為我國未來校正系統新建、精進及擴充方向的參考。