

出國報告（出國類別：其他）

赴德國參加「3D 量測研討會」 出國報告

服務機關：飛航安全調查委員會

姓名職務：工程師／莊禮彰

派赴國家：德國

出國期間：民國 106 年 9 月 24 日至 10 月 1 日

報告日期：民國 106 年 12 月 25 日

目次

壹、目的與過程	3
貳、量測研討會	5
參、德國聯邦航空失事調查局	17
肆、建議	24

壹、目的與過程

飛安會 106 年度科技計畫「提昇我國飛航安全及事故調查能量」之分項研究「工程失效模式之研判與分析」係發展光學掃描技術，將點雲資料轉換為實體曲面模型，並建立系統化數位建模方法。目前本會使用德國 GOM 公司生產之 ATOS 光學掃描系統，將光柵條紋投射於待測表面，取得大量點雲資料，可協助調查人員觀察結構件損壞狀況，此方法已應用於數起事故調查。

德國 GOM 公司每兩年定期舉辦 3D 量測研討會（3D Metrology Conference 2017），與會者包括來自工業界、學術界、研究機構、政府單位等，討論議題為光學量測與檢測技術、點雲資料處理、材料測試與金屬成型技術、航太工業之製造檢測等。本年度研究計畫係以航空器殘骸或是直昇機機身為案例，其體積龐大且重量非常重，不易搬運與移動，需規劃最有效且快速的掃描方法，本會指派莊禮彰工程師參與旨接會議，學習最新的光學掃描技術及應用方法。

美國與法國為航空器設計製造國，因此美國國家運輸安全委員會（NTSB）、法國飛航失事調查局（BEA）均投入大量的金錢與人力於工程失效的調查能量上，經查德國聯邦航空失事調查局 BFU 的規模與本會類似，其航空器工程失效能量之建立就值得參考，爰於本次會議後至 BFU 實驗室參訪，並與 BFU 調查人員作技術交流。

行程表如下：

日期		起訖地點	任務
月	日		
9	24	台北~法蘭克福	起程
9	25	法蘭克福~布倫瑞克	交通
9	26~28	布倫瑞克	會議
9	29	布倫瑞克~法蘭克福	參訪 BFU 及交通
9	30	法蘭克福~台北	返程
10	1		

貳、量測研討會

本次 3D 量測研討會（3D Metrology Conference 2017），與會者包括來自工業界、學術界、研究機構、政府單位、經銷商等，規模盛大，參與人數超過五百人，包括德國重要汽車廠、航太製造業等均參加此次研討會，討論議題為光學量測與檢測技術、點雲資料處理、材料測試與金屬成型技術、航太工業之製造檢測等，會議照片如圖 2-1，會議議程如表 2-1。



圖 2-1 會議場景

表 2-1 會議議程

日期	會議議程
9 月 26 日上午	<ul style="list-style-type: none">✓ GOM 3D Metrology Conference 2017 開場✓ Technical Exhibition 技術展覽
9 月 26 日下午	<ul style="list-style-type: none">✓ Advanced Airfoil Inspection 進階翼形檢測✓ Automotive 汽車業✓ Civil Engineering 土木工程✓ Materials Testing 材料測試✓ Numerical Simulation Verification 數位模擬驗證✓ Production Control 生產控制✓ Training and Education 訓練及教育

9 月 27 日上午	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Materials Testing 材料測試 ✓ Production Control 生產控制 ✓ Automotive Design and Benchmarking 汽車業設計及標竿 ✓ Casting 鑄造 ✓ Large Structural Castings for Aerospace 航太業結構鑄造
9 月 27 日下午	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Numerical Simulation Verification 數位模擬驗證 ✓ Production Control 生產控制 ✓ Biomechanics 生物力學 ✓ Management Session 管理會議 ✓ Tools and Molds 工具及模具 ✓ Structural Testing - Automotive 汽車業結構測試
9 月 28 日上午	<ul style="list-style-type: none"> ✓ ATOS 經銷商會議
9 月 28 日下午	<ul style="list-style-type: none"> ✓ ATOS 使用者諮詢會議 ✓ Technical Exhibition 技術展覽

2.1 掃描儀器簡介

飛機模型係為飛機製造商之商業機密及智慧財產權，本會無相關設計圖檔；若飛航事故有結構分析之需求，需要向飛機製造商提出需求，始能獲得飛機原始設計模型，並與飛機製造國之調查機構、飛機製造商共同進行後續分析。但是假使發生的飛航事故非常輕微或是飛機製造商為小型廠商，如此一來本會將難以取得飛機零件設計圖，因此若能運用逆向工程的概念，使用光學掃描儀器取得飛機零件的高精度點雲資料，並由三角網格模型重建出實體模型，本會即可進行後續結構應力分析，將對事故調查有很大的助益。

市面上掃描儀器種類繁多，大致區分為接觸式及非接觸式等兩大類；接觸式可分為基於變形原理的觸發式和連續掃描式；而非接觸式可分為光干涉法、聚焦檢測、圖像分析法及三角量測法等。飛航事故調查有其特殊性，事故殘骸皆屬於重要證物，如以接觸式掃描儀器進行量測，探頭會接觸到待測物的表面，可能破壞證物的完整性；此外事故殘骸的外形通常破碎且複雜，探頭及其連接組件會與

待測物產生干涉，探頭量測方式較不易規劃，掃描空間受到限制。相較之下，非接觸式掃描儀器便無此缺點，其掃描的受限條件較少、應用層面較廣。

依據投射光源來區分，可分為「雷射式掃描儀器」與「光柵式光學掃描儀器」兩大類。雷射式掃描儀器是以雷射測距儀為基礎，利用雷射光打到待測物上的往返時間得到深度值，並與相機結合取得待測物表面的影像，其基本原理主要有三種，分別是計算飛行時間法、單相機三角量測法、雙相機三角量測法。光柵式光學掃描儀器採用雙相機三角量測法，其系統架構由一個光柵投射裝置與兩個 CCD 鏡頭所組成，如圖 2.1(a)；也有部分掃描儀器採用單相機三角量測法，其系統架構由一個光柵投射裝置與單一 CCD 鏡頭所組成，如圖 2.1(b)，兩者原理、架構與雷射式相似，差別在於光源的種類。

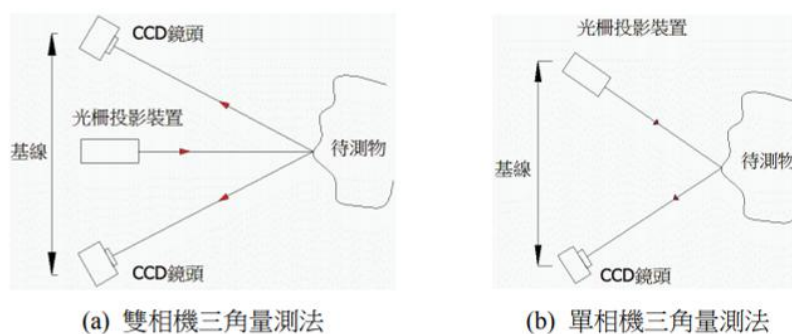


圖 2.1 光柵式光學掃描儀器取像原理

2.2 ATOS 光學掃描儀

目前本會實驗室使用非接觸式光學掃描系統 ATOS I，為德國 GOM 生產製造，由一個光柵投射裝置與兩個工業級 CCD 鏡頭所組成，如圖 2.2-1 所示；將光柵投影在待測物表面上，輔以光柵粗細變化及相位位移，配合 CCD 鏡頭擷取數位影像和電腦運算處理，即可得到待測物的高密度點雲資料，並搭配原廠自行研發之 ATOS 點雲資料處理軟體，可取得三角網格檔案。圖 2.2-2 為所有掃描區域及探頭相對應之空間位置。

ATOS I 光學掃描系統符合德國 VDI-2634 規範，VDI-2634 是德國工程師協會所制定的，適用於工業應用品質管制的光學式量測設備，規定光學式量測設備的可接受性以及校驗的方法。而驗證的原理為使用已校驗過之啞鈴規進行量測，把結果與標準件尺寸作比較，進而獲得量測精度。只要環境參數不改變，每次量得的結果都是很接近的，系統的穩定度也相當高，誤差約為 0.01mm。



圖 2.2-1 ATOS I 光學掃描系統及光柵變化情形

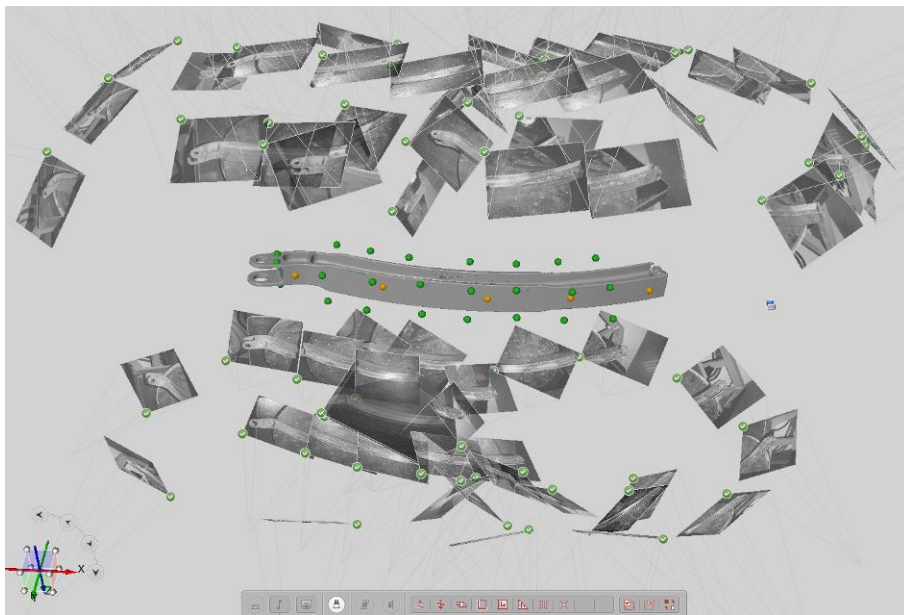


圖 2.2-2 掃描待測物及探頭相對應之空間位置

2.3 ATOS ScanBox 掃描系統

操作 ATOS 光學掃描系統時，需人工規劃掃描待測物及探頭相對應之空間位置，每一次掃描後再規劃下一個掃描位置，因此操作者需具備基本的訓練與幾何

空間概念，因此掃描工作效率受到限制。新一代的 ATOS ScanBox 掃描系統具備電腦化及自動化功能，可應用於汽車及航太製造業之快速檢測及批次檢測，目前德國車廠幾乎已都採用 ATOS ScanBox 於製造檢測。

依照掃描空間及待測物尺寸，ATOS ScanBox 掃描系統可再細分為 4 至 8 系列，如圖 2.3-1 所示。ATOS ScanBox8 系列具備兩組電腦化及自動化探頭，可大幅減少線上檢測作業時間，圖 2.3-2 為研討會現場展示之 ATOS ScanBox 掃描系統，掃描之點雲資料可以直接與原始設計圖檔作誤差比對分析，如圖 2.3-3 所示。Opel、Porsche、Audi 汽車等公司於會議中分享 ATOS ScanBox 掃描系統應用於線上製造檢測的實例與成果，圖 2.3-4 為 Opel 汽車導入 ATOS ScanBox 掃描系統的成果，即時線上判斷工件之製造精度是否合格。

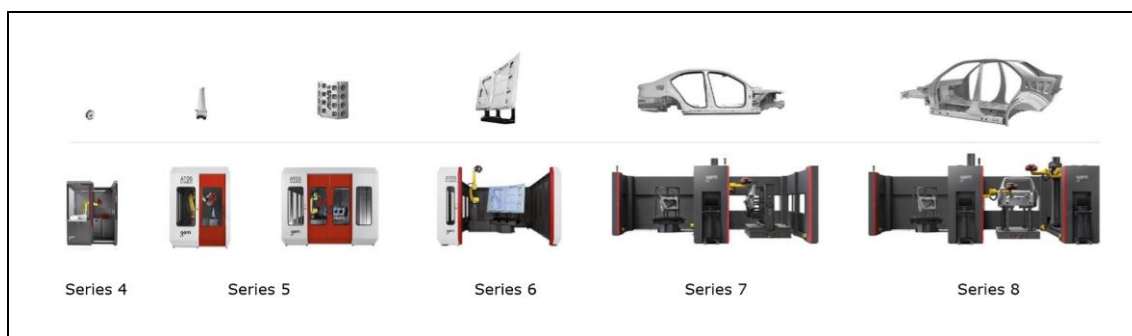


圖 2.3-1 ATOS ScanBox 系列



圖 2.3-2 現場展示之 ATOS ScanBox8 系列掃描系統

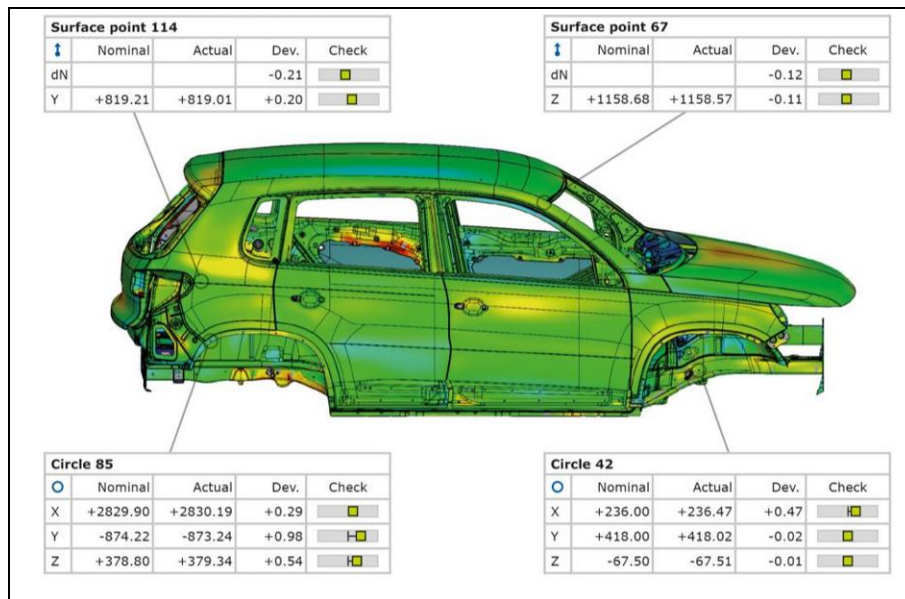


圖 2.3-3 掃描點雲資料之誤差分析

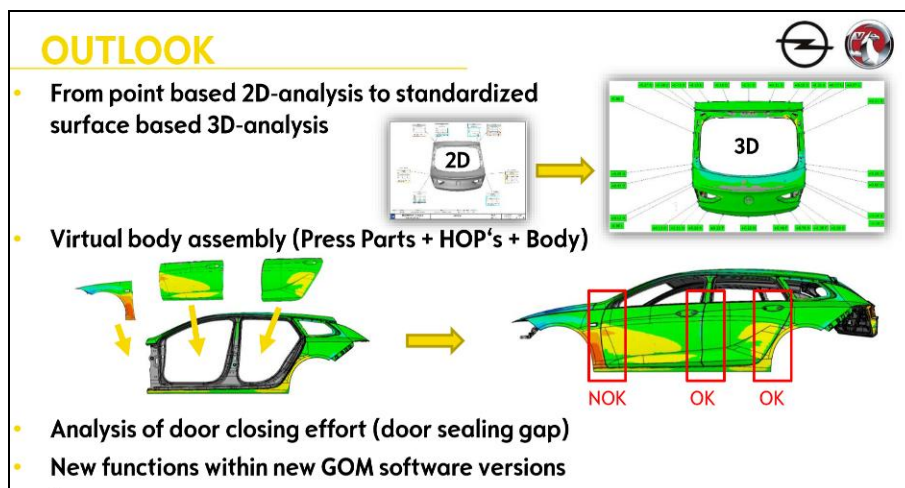


圖 2.3-4 Opel 汽車導入 ATOS ScanBox 掃描系統

2.4 製造檢測

以往製造檢測都是使用 CMM 座標量測儀 (Coordinate Measuring Machine, CMM)，根據探頭是否接觸待測物，又區分為接觸式和非接觸式兩大類，接觸式是以探頭直接接觸待測物以進行量測，非接觸式則是以雷射或是影像作為探測系統，並沒有直接接觸到待測物。一般常見的是接觸式座標量測儀，其探頭大部份為一顆紅寶石球，經接觸待測物後，取得該位置的座標值，再減去探頭的半徑後，即可求得工件的實際座標值。

Rolls-Royce 的簡報內容提到（圖 2.4-1），發動機幾何外型相當複雜，加工精度要求高，軸承座組裝時，需用人工使用傳統 CMM 作檢測及定位，若精度不夠時會影響到組裝，甚至造成發動機運轉震動問題。目前 Rolls-Royce 導入光學檢測技術，取代傳統 CMM，不僅檢測精度高達 0.01mm，也大幅所短傳統 CMM 檢測所需的時間，如圖 2.4-2 所示。

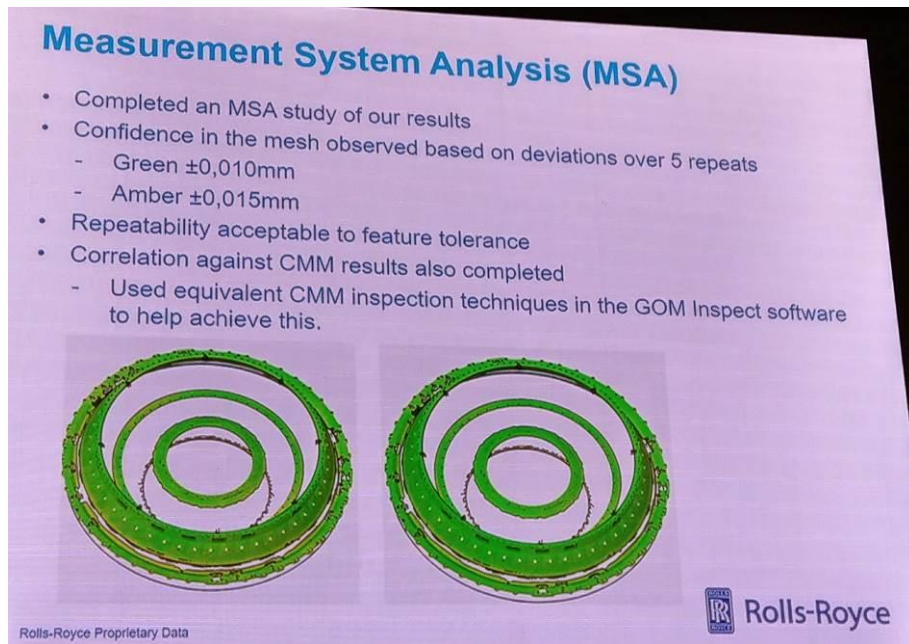


圖 2.4-1 Rolls-Royce 導入光學檢測技術

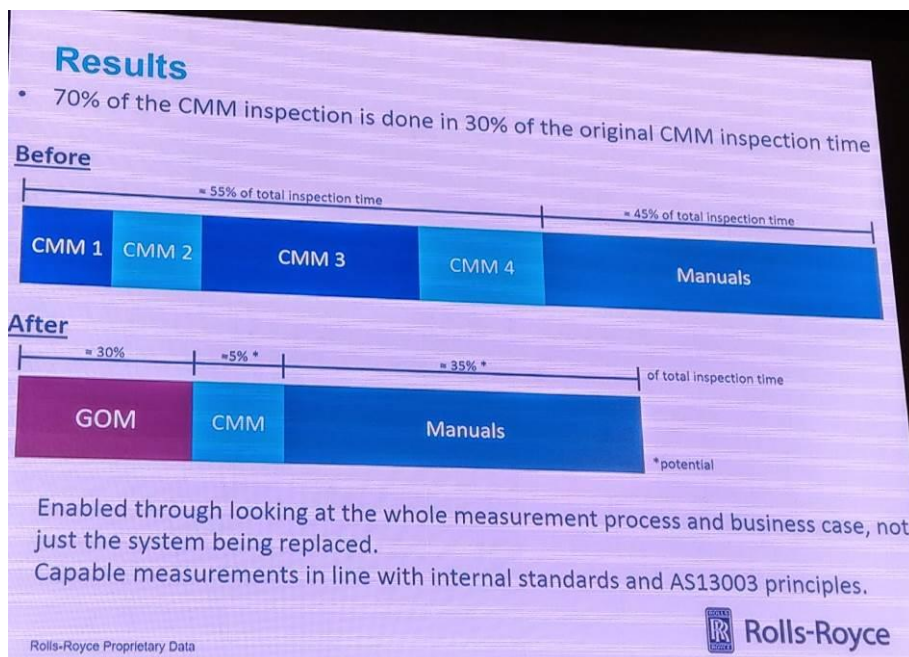


圖 2.4-2 光學檢測技術與傳統 CMM 檢測的比較

2.5 高速攝影光學量測技術

GOM 公司針對即時性的材料行為及材料試驗的需求，發展了高速攝影光學量測 ARAMIS 系統，搭配三維相機及控制器，並利用隨機圖案或參考點標，ARAMIS 系統可即時提供精確的三維坐標、三維位移、三維速度、三維加速度、自由度評估等。以往的拉伸試驗僅能獲得平均應變、平均應力，若導入 ARAMIS 高速攝影光學量測技術，就可獲得拉伸試片的即時表面應變，繼而求得表面應力，如圖 2.5-1 所示。

圖 2.5-2 為現場展示之 ARAMIS 高速攝影光學量測技術，施加負荷於某直昇機尾旋翼末端，模擬尾旋翼受力後應力應變的變化，以三維相機拍攝尾旋翼上的參考點標，之後 ARAMIS 系統即可即時計算尾旋翼表面各點的應變值（圖 2.5-3），進而求出應力分布。

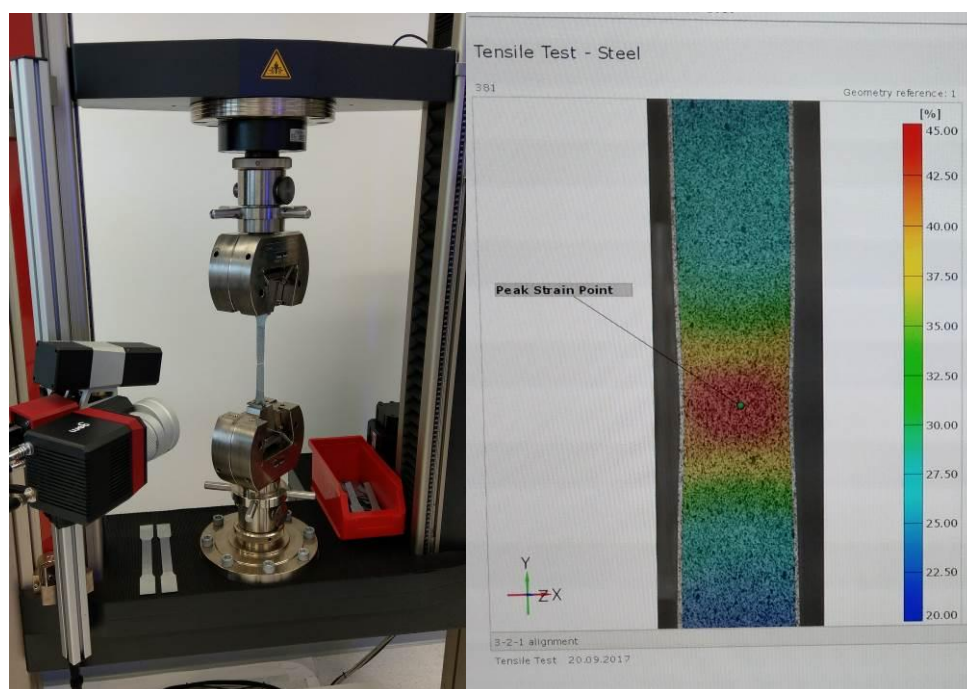


圖 2.5-1 高速攝影光學量測 ARAMIS 系統應用於拉伸試驗

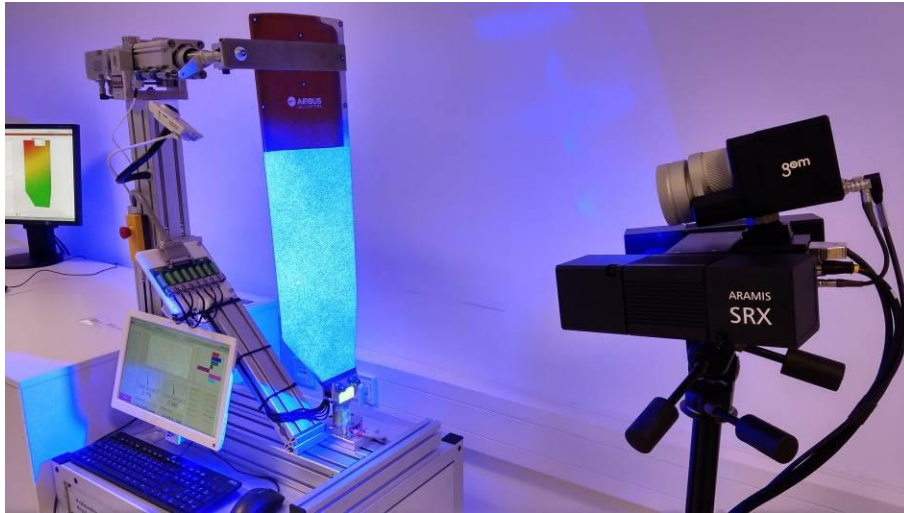


圖 2.5-2 ARAMIS 系統即時量測尾旋翼上的參考點標

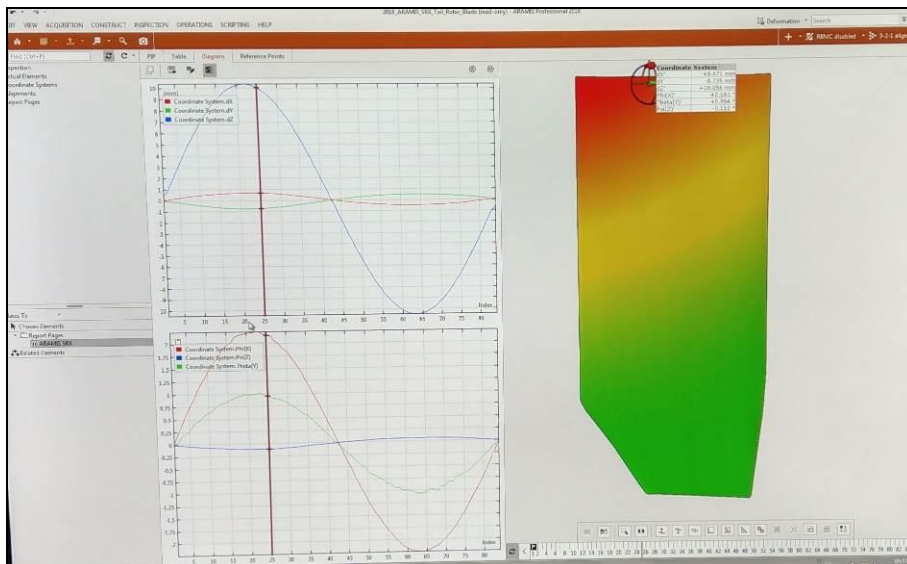


圖 2.5-3 尾旋翼之即時應變

本會調查實驗室自從民國 98 年導入有限元素分析能量後，便積極地努力建立結構件應力分析與流固耦合分析能量，期間亦在數件飛航事故的調查中導入有限元素分析來驗證航機組件失效的機制，並獲得令人滿意的結果。目前有限元素分析應用於事故調查大多為趨勢分析，經過分析計算後找出最大應力發生位置，以協助確認材料破損之位置；並經由材料試驗結果，驗證有限元素分析的結果。但是有限元素分析常被質疑分析的嚴謹性與可靠度，如何驗證邊界條件設定是否正確，分析結果的正確性為何。

目前透過 ARAMIS 高速攝影光學量測技術，即可驗證有限元素分析的解算結

果，圖 2.5-4 左圖為扳手施力的有限元素分析結果，圖 2.5-4 右圖則為經由高速攝影及光學量測所分析的應力分布，經比對後發現扳手施力的有限元素分析結果與實際應力分布幾乎吻合。

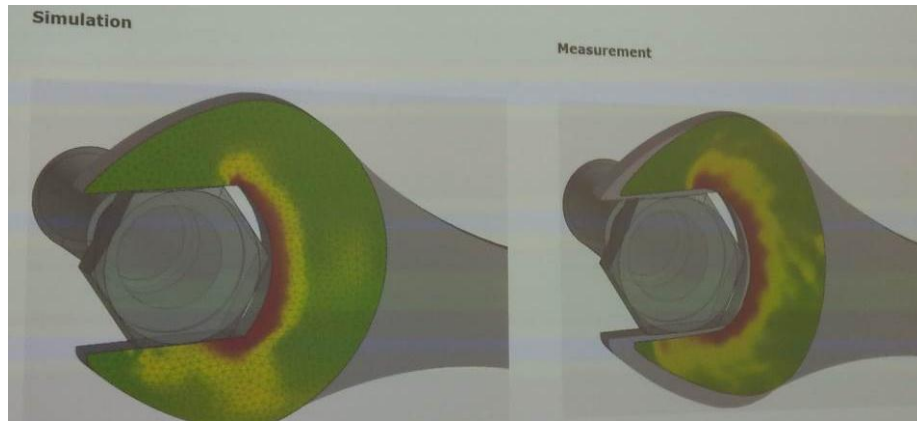


圖 2.5-4 有限元素分析結果與實際案例作驗證

2.6 起落架系統之應用實例

Liebherr 公司於會議中分享導入光學掃描技術於起落架系統測試及結構測試的成果，圖 2.6-1 為起落架挫曲（Buckling）試驗，首先施加負荷於一起落架上，當負荷不斷增加至一定值時，起落架會發生挫曲現象。經使用高速攝影及光學量測，可得到起落架的應變分布，以及挫曲的發生位置。在本案例中，Liebherr 公司亦導入有限元素分析技術來模擬分析挫曲現象，經比對後發現起落架的有限元素分析結果（圖 2.6-2）與實際應力分布（圖 2.6-1）幾乎吻合。

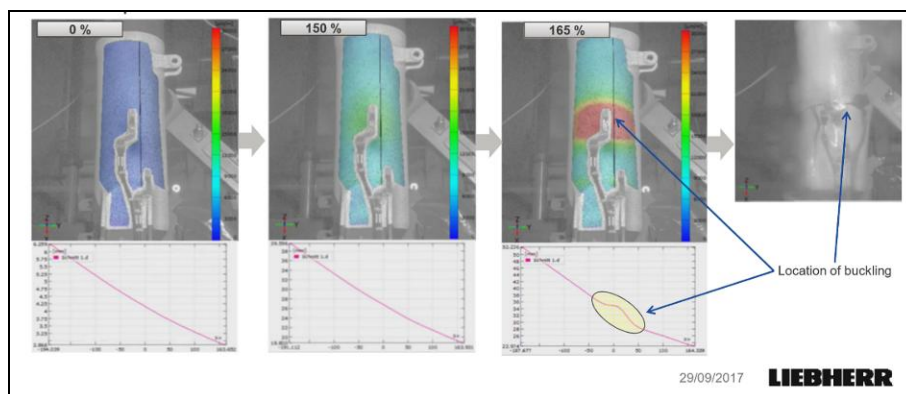


圖 2.6-1 起落架挫曲試驗

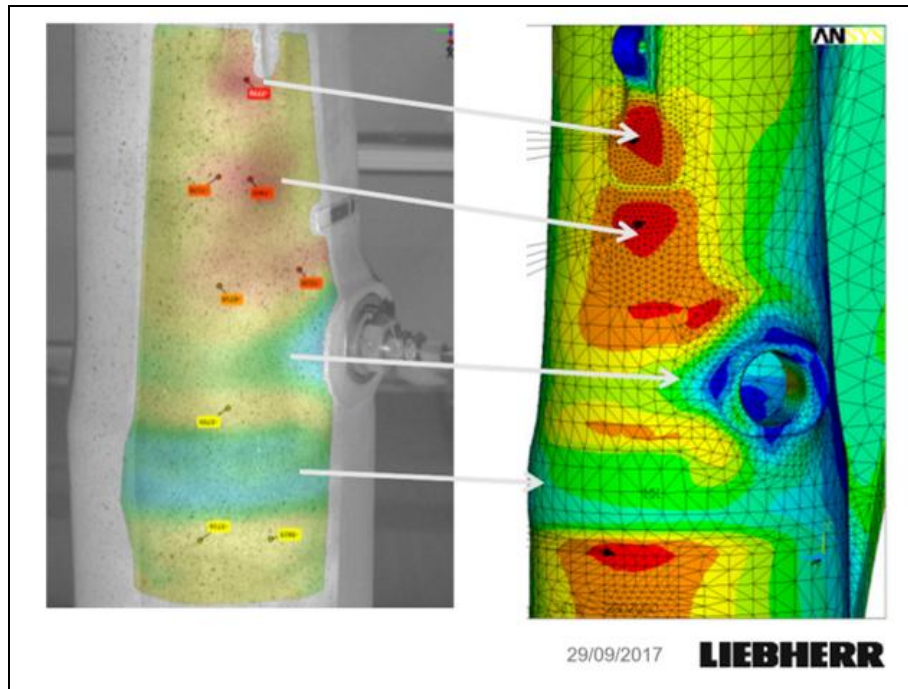


圖 2.6-2 起落架挫曲之有限元素分析與驗證

2.7 光學量測技術於事故現場的應用

經過多年的使用，本會已相當熟悉 ATOS 光學數位掃描系統的使用，也實際應用於事故調查上，因此職於本次研討會分享「光學掃描技術應用於航空器事故調查實務經驗」。現有 ATOS 光學數位掃描系統精度高，但不易攜帶至事故現場，且易受天候及日光的影響，考量事故現場的環境變因，需規劃最有效且快速的掃描方法，記錄殘骸數位資料及破損狀況，之後再將重要結構件攜回處理，縮短資料處理時間，提昇事故現場蒐證的效率。

職借此機會與原廠討論，原廠提供以下的解決方案：使用便攜式 TRITOP 攝影 3D 量測系統，可快速準確地測量物體的三維坐標。原廠舉實際範例來說明，如圖 2.7-1 所示，於待測汽車上貼上數個定位控制點，接著使用原廠提供之照相系統，依照不同角度拍攝多組照片，系統即可辨識定位控制點的位置，以數位化呈現定位控制點的空間位置，如圖 2.7-2 所示。如同接觸式坐標測量儀一樣，TRITOP 系統能記錄任何特徵空間的坐標及其方向，因此在航空器重要零組件上貼上特徵控

制點，經由特定照相系統即可將殘骸數位資料及破損狀況記錄下來。未來將持續研究此方法之可行性。



圖 2.7-1 於待測物貼上定位控制點

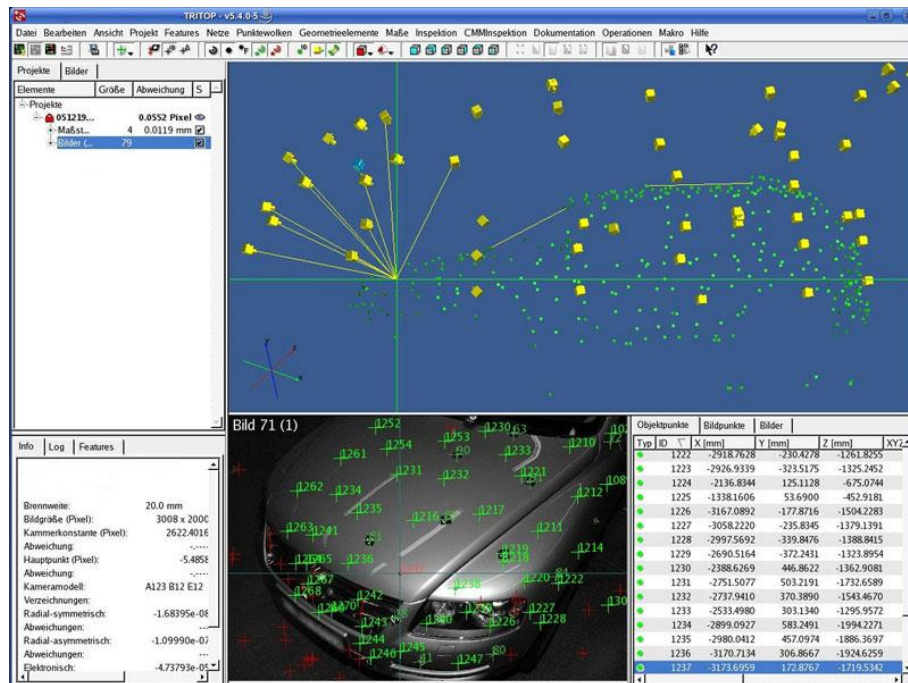


圖 2.7-2 定位控制點的立體空間位置

參、德國聯邦航空失事調查局

德國聯邦航空失事調查局（Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung, BFU）位於德國下薩克森州（Niedersachsen）布倫瑞克（Braunschweig）北方，地理位置如圖 3.1 所示。

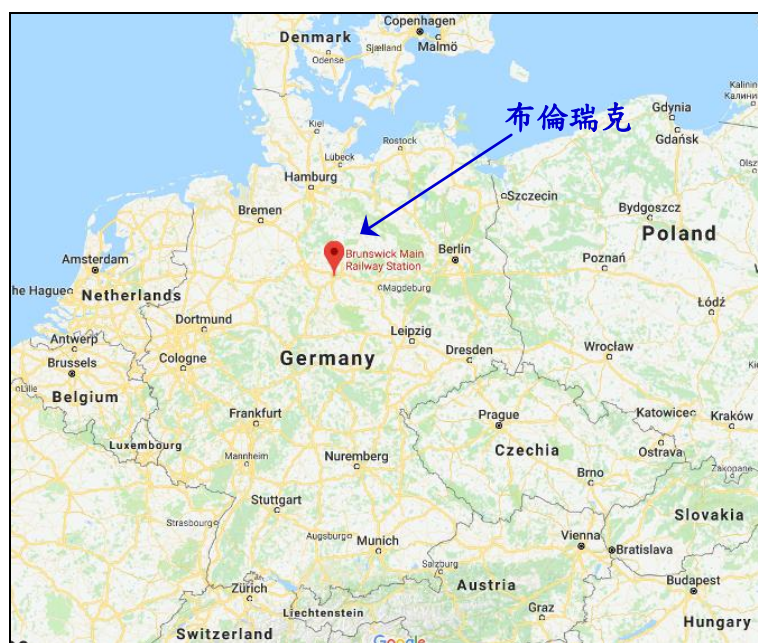


圖 3.1 BFU 地理位置

3.1 BFU 歷史及組織架構

BFU 原隸屬德國民航局之下，但依據歐盟西元 1994 年 11 月 21 日之指令，在 1998 年 9 月 1 日依「航空器失事及重大意外事件調查法」脫離民航局，成為獨立運作之事故調查機構，負責德國境內航空器失事及重大事件之調查。

有關航管意外事件則由提供飛航服務之 DFS (Deutsche Flugsicherung GmbH) 負責調查。普通航空業、輕型航空器、滑翔機及熱氣球等意外事件則在 BFU 監督之下委託民間調查員負責；這些民間調查員的地理位置都已標註在值日官室牆壁的地圖上（如圖 3.2），當發生意外事件時，BFU 值日官依據地理位置通知分散德國各地的民間調查員前往處理。跟本會不同的是，本會值日官每次輪值 24 小時，

晚上留宿於辦公室待命，隔天早上交接；而 BFU 值日官每次輪值為一個星期，若晚上留宿於值日官室，有額外的薪資報酬，值日官亦可選擇回家待命，但就沒有薪資報酬。

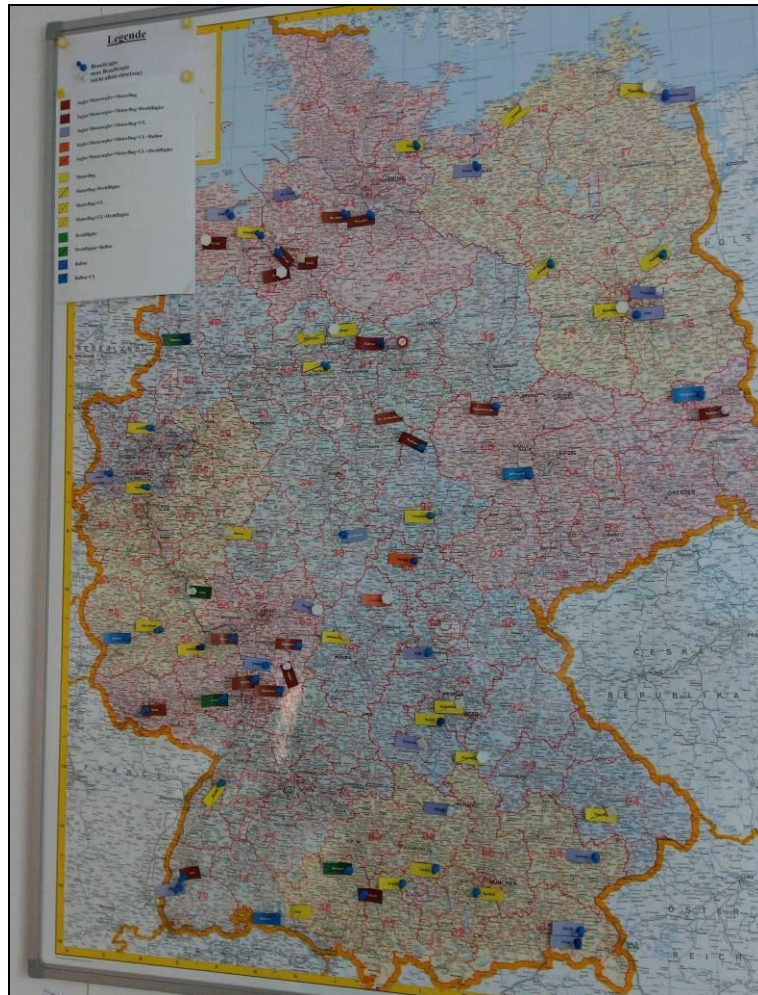


圖 3.2 民間調查調查員分佈之地圖

BFU 於西元 2000 年 1 月 1 日進行組織再造，其組織架構與本會相當類似，共有四個部門：事故調查部門、工程部門（包括飛航紀錄器、航電、殘骸棚場等）、分析與事故預防部門、行政管理部門，目前 BFU 現有人力約 30 人，組織架構如圖 3.3 所示。

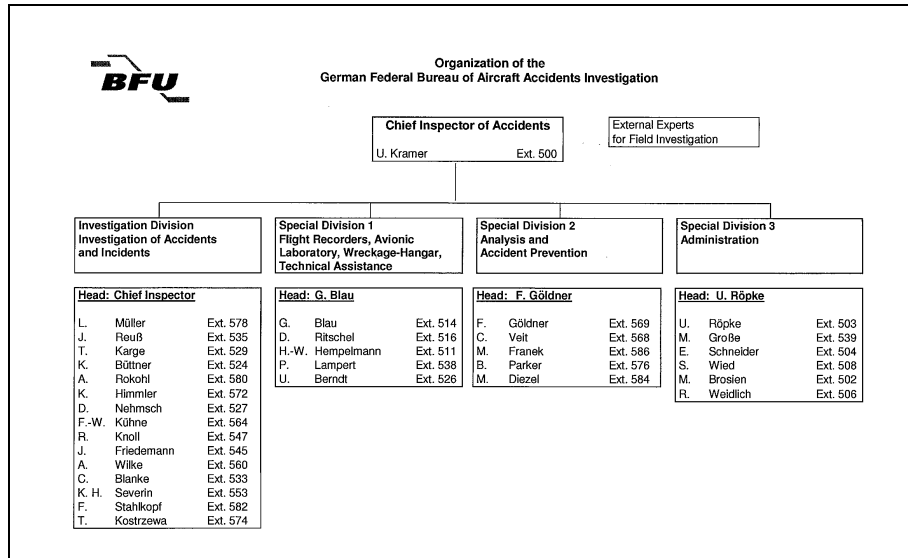


圖 3.3 BFU 組織架構圖

3.2 BFU 工程部門

BFU 工程部門主管為 Mr. George Blau，他曾於民國 97 年來台灣參加過飛航事故調查員紀錄器（Accident Investigator Recorder, AIR）會議，職在此次 AIR 會議中與 Mr. George Blau 熟識，因此曾於民國 98 年至 BFU 參訪，本次亦藉由參加 3D 量測研討會之便，再次拜會 Mr. George Blau。

BFU 工程部門擁有的能量大致可區分為：紀錄器解讀與分析（包括固態式紀錄器及俄製紀錄器）、航電、航材失效分析等。以下針對 BFU 工程部門擁有的特別能量作說明。

飛航紀錄器解讀

BFU 飛航紀錄器解讀實驗室如圖 3.4 所示，其飛航資料紀錄器解讀的情況與本會類似，往年均使用加拿大 CAE 公司設計之 INSIGHT 軟體，目前面臨軟體維護更新銜接不濟的狀況，因此 BFU 考慮改使用 FAS 軟體（本會已開始使用 FAS）。

關於座艙語音紀錄器解讀，BFU 的 CVR 語音播放系統由德國太空中心(German

Aerospace Center, DLR) 製作，與本會使用之播放系統相類似，解讀設備如圖 3.5 所示。



圖 3.4 紀錄器解讀實驗室



圖 3.5 座艙語音分析系統

俄製紀錄器解讀

BFU 具備之特殊能量：俄製紀錄器解讀。俄羅斯與西方歐美等國之適航相關法規不同，因此其飛航紀錄器之記錄方式與資料格式均不同，因此其解讀方法與設備為另一套獨立系統。德國統一前，東德大部分使用俄製航空器，德國統一之後，西德接收東德的技術人員及裝備，因此 BFU 具備俄製紀錄器解讀與分析能量，俄製紀錄器如圖 3.6 所示。



圖 3.6 Mr. George Blau 介紹俄製紀錄器

工程失效分析

目前 BFU 並無足夠的材料試驗設備可作完整的材料試驗，因此若有工程失效分析的需求，BFU 大部分均委託第三機構進行，但是 BFU 也擁有一些基本的分析設備，如常見的實體顯微鏡等，可對斷裂面作初步觀察，今年度 BFU 要增添一台 Keyence V5000 數位顯微鏡。另外 BFU 擁有大型切割工具、切割機、車床、鑽床等，可對飛機殘骸或是重要關鍵斷裂區域作切割。BFU 亦擁有一台數位控制之烘乾機（圖 3.7），可控制烘乾時間及溫度。



圖 3.7 數位控制烘乾機

棚場

國外事故調查機構通常位於機場附近，因此可使用空間相當多，大多擁有棚場可作為飛機殘骸堆置及保存。BFU 位於布倫瑞克機場附近，因此租用一個棚場作為保存飛機殘骸的地方，如圖 3.8 所示。此棚場佔地達 1 百多坪，亦設置天車進行飛機殘骸吊掛之用，目前 BFU 調查過或是調查中的飛機殘骸，都置於該棚場保存，由工程部門負責。



圖 3.8 飛機殘骸之堆置及保存



圖 3.9 與 BFU 工程部門主管 Mr. George Blau 合影

肆、建議

此次職參加 3D 量測研討會，收穫頗豐，並藉此機會至德國聯邦航空失事調查局參訪，職提出建議如下：

- 一、 蒐集 TRITOP 攝影 3D 量測系統相關資訊，研擬應用於飛航事故現場量測之程序及方法。
- 二、 持續與德國聯邦航空失事調查局技術交流，共同研議工程失效的發展策略。