

出國報告（出國類別：進修）

赴法國土魯斯參加認知人因工程訓練

服務機關：國家運輸安全調查委員會

姓名職務：李苡星/運輸安全組調查官

派赴國家：法國

出國期間：民國 112 年 2 月 4 日至 2 月 13 日

報告日期：民國 112 年 4 月 25 日

公務出國報告提要 系統識別號

出國報告名稱：赴法國土魯斯參加認知人因工程訓練

頁數：55 頁 含附件：否

出國計畫主辦機關：國家運輸安全調查委員會

聯絡人：郭芷桢

電話：(02) 7727-6228

出國人員姓名：李苡星

服務機關：國家運輸安全調查委員會

單位：運輸安全組

職稱：調查官

電話：(02) 7727-6289

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 視察 6 訪問 7 開會 8 談判
9 其他

出國期間：民國 112 年 2 月 4 日至 2 月 13 日

出國地區：法國

報告日期：民國 112 年 4 月 25 日

分類號/目

關鍵詞：人為因素、認知神經人因工程、駕駛員生理訊號、心智作業負荷

內容摘要：

為提升本會運輸事故調查人為因素專業知能，瞭解駕駛員人為績效表現與心智狀態評估，並為本會規劃建置駕駛員生理行為分析系統前置準備而參加本次訓練。本次訓練由法國國立高等航太工程學院舉辦，目的在協助人因工程、心理學及航空工程背景人員瞭解運輸人因研究方法、研究倫理及駕駛員生理訊號量測與分析技術，包括眼動追蹤、心跳變異率、腦波及大腦近紅外光血氧監測等技術，課程內容兼具理論與實務應用，主要為人為因素在航空與交通運輸領域之應用。

目次

壹、	目的.....	1
貳、	過程.....	2
參、	課程摘要與心得.....	10
肆、	建議.....	52

壹、 目的

駕駛員操作隨運具作業環境日趨複雜而改變。以飛航駕駛員為例，在座艙自動化導入後，駕駛員轉變為航空器之管理與監控為主之角色。自動化系統之導入目的原在降低人員工作負荷、提升人為績效表現，惟當駕駛員對複雜系統不夠瞭解而誤用，或介面設計不當，皆可能增加心智作業負荷而提高人為疏失或錯誤之機會。因此，考量人為因素，或評估人為績效表現，在現今運具製造與驗證過程（含人機介面設計），乃至營運階段之安全與風險管理，直至意外事件調查或重大運輸事故調查皆佔有舉足輕重之地位。

本會運輸安全組負責人為因素調查與研究業務，為提升運輸事故調查專業知能，強化本會人員人為因素專業知識，瞭解運具駕駛員人為績效表現與心智狀態評估方式，並為本會 113 年起科研計畫擬逐步建置駕駛員生理行為分析系統前置準備，由運輸安全組李玟星調查官於 112 年 2 月 4 日至 13 日赴法國土魯斯參加認知人因工程訓練，以儲備在認知人因領域之調查與研究能量。

本次訓練課程由法國國立高等航太工程學院（ISAE SUPAERO）開設，本課程為該學院開設有關於航空認知人因工程訓練之其中一項人因模組化課程（HF 420），目的在協助心理學、人因工程與航空工程人員，以及業界及航空器製造商人因相關領域專業人員瞭解運輸人因研究方法、研究倫理及駕駛員生理訊號量測與分析技術，包括眼動追蹤、心跳變異率、腦波及大腦近紅外光血氧監測等技術。課程內容兼具理論與實務應用，主要為人為因素在航空與交通運輸領域之應用。本會調查技術人員完訓後，應可習得駕駛員生理行為評估基礎學理知識及量測技巧，作為未來推動本會運安人因研究或事故調查之應用及參考。

貳、 過程

一、 出國行程

日期 月/日	起訖地	任務
2/4	前往桃園機場 搭乘中華航空 (CI61) 台北 - 德國法蘭克福	啟程
2/5	前往法國土魯斯 搭乘漢莎航空 (LH1100) 德國法蘭克福 - 法國土魯斯	轉機至受訓地
2/6-10	法國土魯斯	認知人因工程專業訓練
2/11	前往德國法蘭克福 搭乘漢莎航空 (LH1095) 法國土魯斯 - 德國法蘭克福	返國 (轉機)
2/12-13	前往桃園機場 搭乘中華航空 (CI62) 德國法蘭克福 - 台北	返國

二、 課程安排

本次專業訓練共計 5 日，課程表如圖 2-1 所示。課程進行方式結合課堂講述、實作練習及分組討論。課堂講述主要在介紹航空人因工程及各項駕駛員生理訊號測量技術之學理基礎，實作及分組討論則提供學員實際使用特定生理訊號測量工具之機會，以模擬情境或認知實驗進行儀器操作，蒐集生理訊號原始資料，並於資料蒐集後進行初步分析。在實作過程則有相當多小組討論，或即時與講師進行交流與問答。課程實況如圖 2-2 所示。

	Mon 6	Tue 7	Wed 8	Thu 9	Fri 10
GMT+01 07:00					
08:00	HF420 - Human Factors: Expe 08:00, 11 138 SALLE CAS - 13	HF420 - Human Factors: Expe 08:00 à 09:00	HF420 - Human Factors: Expe 08:00, 11 138 SALLE CAS - 13	HF420 - Human Factors: Expe 08:00, 11 138 SALLE CAS - 13	Réservation de salles, 08:30, 1
09:00					
10:00	HF420 - Human Factors: Experimentatio# - SCANNELLA - Human Factors in aeronautics - Cours 09:15 à 11:15 11 138 SALLE CAS - 13	HF420 - Human Factors: Experimentatio# - LADOUCE, ROY - Electroencephalography - Centre de Neuro ergonomie 13.103 - TP 09:15 à 12:15	HF420 - Human Factors: Expe 09:15, 11 138 SALLE CAS - 13	HF420 - Human Factors: Expe 09:15, 11 138 SALLE CAS - 13	HF420 - Human Factors: Expe 09:00, 10 102 EXAMEN - 42
11:00			HF420 - Human Factors: Expe 10:30, 11 138 SALLE CAS - 13	HF420 - Human Factors: Experimentatio# - LEFEBVRE, SCANNELLA - Electrocardiography - TP 10:15 à 12:15 11 138 SALLE CAS - 13	Réservation de salles, 10:00, 1
12:00			HF420 - Human Factors: Expe 11:45, 11 138 SALLE CAS - 13		
13:00	HF420 - Human Factors: Expe 12:45, 11 138 SALLE CAS - 13			INTERNATIONAL DAY - COA - aéronefs + électriques, COA - architecture avion, COA - conception hélico, COA - propulsion aéronautique, COS - syst orbitaux & appli, COS - transport spatiaux, ETE -énergie, transport, environnement, NEURO-IA, SA - drones, SA - robotique, SA - syst spatiaux et autonomie, SXS 13:00 à 18:00	
14:00	HF420 - Human Factors: Expe 14:00, 11 138 SALLE CAS - 13	HF420 - Human Factors: Expe 14:00, 11 138 SALLE CAS - 13	HF420 - Human Factors: Experimentatio# - LEPRON - Ethics - Cours 14:00 à 16:00 11 138 SALLE CAS - 13		FE403 - Flight test experimentation# - JUANEDA, PERRIN - Flight #7 : Stab Longi-Mode longi - TP 13:30 à 15:30 Lasbordes CAS
15:00					
16:00	HF420 - Human Factors: Expe 15:15, 11 138 SALLE CAS - 13	HF420 - Human Factors: Experimentatio# - CHENOT, SCANNELLA - Near Infra-Red spectroscopy - TP 15:15 à 17:15 11 138 SALLE CAS - 13			
17:00	HF420 - Human Factors: Expe 16:30, 11 138 SALLE CAS - 13				
18:00					

圖 2-1 認知人因工程專業訓練課程表



圖 2-2 課程實況

課程內容與施行過程說明如下：

- 第一日課程重在說明本課程（人因模組 420）與其他系列課程之關聯（introduction）；介紹航空認知神經人因工程基礎概念（cognitive neuroergonomics in aeronautics），內容包括人類訊息處理歷程與限制，以及駕駛員生理與行為量測技術於航空人因工程與飛航安全之實務應用；另外，為使學員能以適當方式取得駕駛員生理與行為資料並具備正確分析、解讀生理數據之技能，第一日課程亦安排認知人因工程實驗方法（introduction to experimental design），並簡介航空作業環境下之影響駕駛員人為績效表現之生理因素。
- 第二日課程以腦波（physiological markers: electroencephalography, EEG）、大腦近紅外光血氧監測（near infrared spectroscopy, NIRS）等兩項技術為主軸。課程架構與施行方式相似，先安排課堂講授，介紹測量技術基本原理與學理基礎、生理訊號蒐集與分析、相關注意事項，以及該技術於認知人因工程之應用與實例。課堂講述後則安排儀器說明與介紹，接著讓學員以小組方式實際使用儀器，進行訊號蒐集與資料初步分析。

以腦波專題為例（圖 2-3），講師首先將學員分組，接著逐步引導學員於受試學員頭部裝設電極、將腦波帽與電腦建立無線連結、設定濾波器以優化訊號品質，並讓學員測試並學習識別各種干擾訊號之出現。完成各項軟硬體設定後，讓配戴腦波儀之受測學員，在不同心智負荷程度下進行認知作業，並同時蒐集大腦電生理反應資料，再引導學員利用 EEGLAB 分析軟體，初步處理腦波資料。有關大腦近紅外光血氧監測技術之實作課程施行及過程，與腦波實作課程相同。



圖 2-3 腦波實作課程實況

- 第三日課程以眼動追蹤（eye tracking）與認知人因工程研究倫理（ethics）等兩大主題為主軸。眼動追蹤以課堂講述為主，分別介紹眼睛生理與解剖學構造、眼動基本概論、眼動儀發展歷史、眼動資料分析方式、可視化技術於眼動資料呈現，以及眼動技術於航空人因工程之應用。講師於講述過程亦實際展示眼動儀整合至空中巴士 320 機型模擬機實例（圖 2-4）。此種眼動追蹤內建於模擬器之整合方案，可讓駕駛員在不配戴任何眼動儀器、且因攝影鏡頭藏於面板中而使飛航操作過程不受干擾，自然地蒐集駕駛員眼球移動與軌跡，並將駕駛員頭部位置座標、頭部轉動資訊、凝視點座標、瞳孔直徑等數據，以即時方式呈現於電腦螢幕，供研究者與教官參考使用。研究倫理課程部分，講師向學員介紹目前國際上使用之研究倫理重要準則，以及執行認知人因工程實驗如何保障受測者權益、如何在蒐集生理訊號前取得受測者知情同意，以及應留意參加

認知人因工程實驗之受測者，於實驗後可能產生之身心狀態改變與處理。

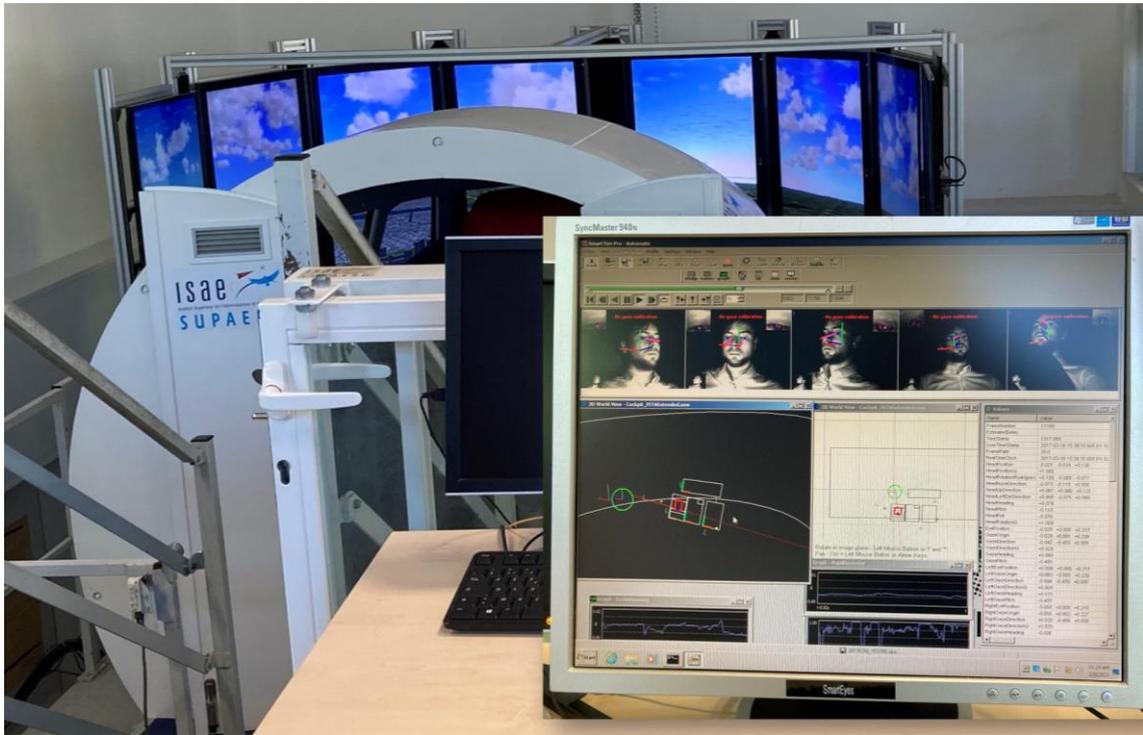


圖 2-4 眼動追蹤與飛航模擬器整合實例

- 第四日介紹本次課程最後一項生理訊號技術：心電圖與心跳變異率分析（electrocardiography, ECG & heart rate variability, HRV）。課程架構及施行方式與第二日課程近似，包含課堂講述與實作等兩部分，惟實作課程進行時，講師未讓學員實際操作儀器與練習貼設電極片，而是將重點放在心電圖與心跳變異率如何應用於航空人因工程之實例操作。因此，講師提供學員一段駕駛員於實機飛行中蒐集之心電圖數據，透過分析軟體引導學員逐步處理駕駛員心電圖原始資料，並在分析出心跳變異率後，依據數據結果，以類似逆向工程手法，研判資料來自哪段飛航操作（圖 2-5）。當日課程後則參加由校方舉辦之國際學生日，與其他學員交流航空、飛安與人因工程相關議題討論。



圖 2-5 心電圖技術於航空人因工程之應用實例練習

- 第五日為本次專業訓練測驗日。學員於測驗當日至校方指定測驗大樓進行筆試（圖 2-6），筆試內容涵蓋前四日訓練之課堂講授、實作及分組討論，題型亦相當多元，包括多重選擇、填空、申論及情境式問答；筆試過程有專人監考，不可翻閱資料，亦禁止使用手機與網路，為相當正式之考試。



圖 2-6 認知人因工程專業訓練測驗大樓

三、 學員及講師

本次課程共計 10 位學員（含本會人員）參加訓練，除本會人員為在職者，其他學員皆為學生，法籍居多，亦有來自義大利、墨西哥、美國等國家（圖 2-7）。學員皆已取得航空工程碩士，另部分學員已有私用或商用飛行執照。

學員參加本次課程目標係為取得更進階之認知人因工程專業認證，同時修習飛航測試工程（Flight Test Engineering）課程。學員預計完成飛航測試學門及認知神經人因工程之 4 模組後，至空中巴士製造商、航空業者、大學研究中心等單位接受在職訓練，將認知神經人因工程技術應用於實機飛航測試或人機介面設計等領域。



圖 2-7 本次訓練課程學員

本次訓練課程共有 5 位講師，分別來自神經科學、認知人因工程、電腦科學、資訊科學、醫學、心理學等專業領域，為一跨領域整合之研究與教學團隊。另於腦波與心電圖與心跳變異率等兩堂實作課程配有博士班助教協助進行。

本次訓練課程講師名單如下：



Dr. Sébastien Scannella



Dr. Evelyne Lepron



Dr Bernard COMET



Dr. Raphaëlle Roy



Dr. Vsevolod
Peysakhovich

參、 課程摘要與心得

本次訓練課程目的在協助學員瞭解駕駛員人為績效表現與人為錯誤，以及行為與犯錯背後所反映出人類認知資源與大腦功能及運作之限制。透過量測並分析駕駛員於運具操作過程之生理訊號，可更客觀、科學化呈現出人類（包括訓練有素之駕駛員）在哪些不利情況下有更高機會出現人為疏失或犯錯，並可進一步據此研擬或設計相關緩解措施或預防機制，以達到提升運輸安全之目的。本次訓練課程重點內容摘要說明如下：

1. 認知神經人因工程基礎概念

以航空領域而言，雖然自動化系統與設備與日俱進，重大運輸事故率也呈現逐年下降之趨勢，仍無法達到零事故率之目標；從事故肇因來看，人為因素相較過去佔有更高之比例，但在高度自動化技術之發展下，民用航空器迄今又無法轉型為無人機運作。對此，講師指出：主要原因在駕駛員（人類）處理複雜情境時展現之彈性與韌性（flexibility & resilience），仍遠勝於自動化系統，甚至人工智慧；換言之，駕駛員迄今仍常是阻止事故發生之最後一位關鍵把關者。因此，提升對駕駛員人為績效表現之瞭解與人為錯誤之肇因分析，在當今營運與運輸安全領域變得更為重要。

認知神經人因工程之定義與目的

本次課程從認知神經人因工程觀點揭開駕駛員人為績效表現與限制。認知神經人因工程（cognitive neuroergonomics）為一個跨領域之新興領域，將神經科學、心理學、醫學及人因工程學等領域之專業知識應用於探究人類大腦與心智運作如何與實體工作環境、軟硬體、系統介面及其他個體互動，最終目的在提升人為績效表現、工作者身心健康，並達到安全之目的。因此，認知神經人因工程研究成果，可用於

優化系統與介面設計，使其更符合使用者在訊息處理、決策與判斷等特性需要。講師提出，要從此觀點切入探究運輸安全，則必須要先瞭解人類（含駕駛員）之心智狀態及大腦功能如何運作，以及哪些情況會出現限制。

駕駛員訊息處理及其生理運作機制

講師將駕駛員操作運具涉及之認知運作分為知覺(perception)、決策(decision-making)及行動(action)等三階段(圖 3-1)，而其生理結構與大腦在不同階段處理訊息有其特殊區域，學理稱之功能特化(functional specialization)，且有其限制存在。

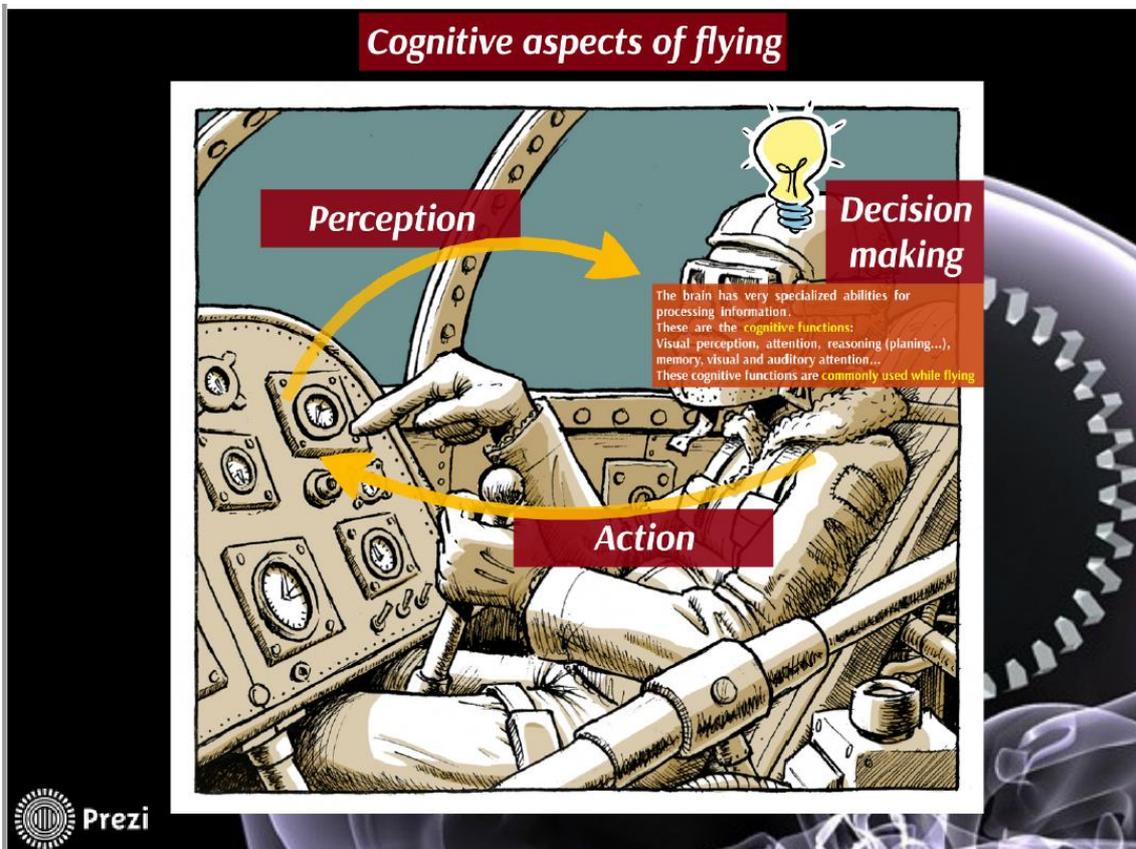


圖 3-1 駕駛員訊息處理歷程

以視覺訊息為例，駕駛員主要靠眼睛（視覺系統）接收外界儀表資訊，而視覺系統之視網膜上的錐桿細胞分佈因存在密度差異，使駕駛員只能清晰看見位於中心視野（中央窩）2度內之物體（件）的色彩與細節資訊（圖 3-2）。隨物體與中心視野距離越遠，駕駛員對物體色彩與細節覺察能力隨之下降，但同時對物體之移動更加敏感。此時，若要清楚識別細節，則必須讓物體落至中央窩附近，而產生眼動中所謂之跳視（saccades）。然而值得注意的是，視覺系統在處理外界訊息之範圍有其限制存在，當超過 30 度，則必須有更頻繁或更大幅度之跳視才能覺察到物體的細節資訊，而在執行跳視之過程，另存在有視覺資訊無法被取得之限制，學理稱之視覺抑制（vision suppression）。

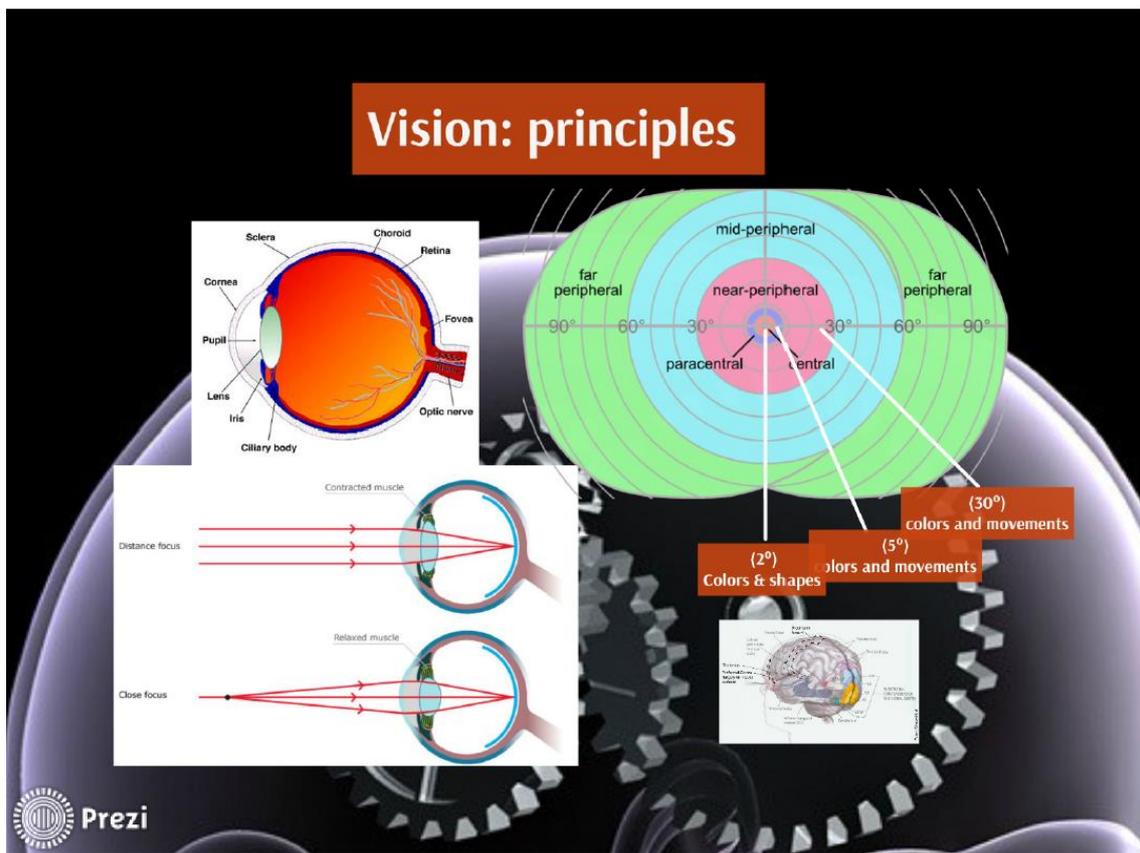


圖 3-2 視覺系統在訊息處理之特性與限制

在實務上之應用

在人機介面設計上，若從認知神經人因工程觀點考量，則應盡量將駕駛室關鍵之視覺訊息放在駕駛員中心視野 30 度內，如航空器主要飛航顯示器(primary flight display, PFD) 設置位置，以確保駕駛員能獲取所有航空器運作時之重要狀態資訊，同時可避免駕駛員為獲取資訊而有過多跳視，使其在有限時間內因跳視產生視覺抑制而無法獲得足夠訊息進行決策與判斷。

另，駕駛員視覺活動 (ocular activities) 特性亦可應用在運具操作實務。當駕駛員於模擬器或運具操作中配戴眼動儀，若眼動資料出現凝視與跳視比例相當，則隱含駕駛員在運具操作中獲取之資訊量應受到相當限制，換言之有較高機會使其喪失良好之情境覺察 (situation awareness) 而影響人為績效表現；而對運具狀態喪失情境覺察為重大運輸事故中駕駛員人為錯誤或疏失之常見重要局部條件。

其他常見之訊息處理限制

本次課程提及飛航駕駛員處理訊息時可能出現之限制或瓶頸，整理如下：

- 前庭覺錯覺：當航空器持續緩慢轉彎，如傾斜角持續 20 度一段期間，駕駛員內耳前庭系統 (半規管) 內淋巴液會達到平衡，使神經細胞活動因神經習慣化反應而弱化，讓駕駛員誤以為航空器為水平姿態飛行。另外，當航空器瞬間加速，則會讓駕駛員產生航空器在抬頭之錯覺，稱之體重力錯覺 (Somatogravic Illusion)；講師提到：2019 年亞特拉斯航空 (Atlas Air) 3591 號貨機之重大航空事故，經美國國家運輸安全委員會調查後發現，事故副駕駛員於該班機進場時因不經意之重飛模式啟動而產生體重力錯覺並受其影響，作出將操縱桿往前推之不安全行為。

- 不注意視盲：知覺至決策階段，駕駛員開始受到由上而下（top-down）及由下而上（bottom-up）之訊息處理的交互影響（圖 3-3）。對此，講師以不注意視盲為例來解釋。不注意視盲（inattention blindness）為人類注意力控制過程常有之限制，係指對於人們來說一個很顯著的刺激物，即使眼睛盯著看也可能出現視而不見之現象。以駕駛員而言，當其因受到某項作業要求或指示（即 top-down 歷程）而注意特定事物或目標時，對於和目標物特徵相似或符合之事物較容易被注意到，而不符合者，即使出現在駕駛員中心視野、物體面積占比很大、或特徵顯著（即 bottom-up 歷程），也很容易被駕駛員忽略。

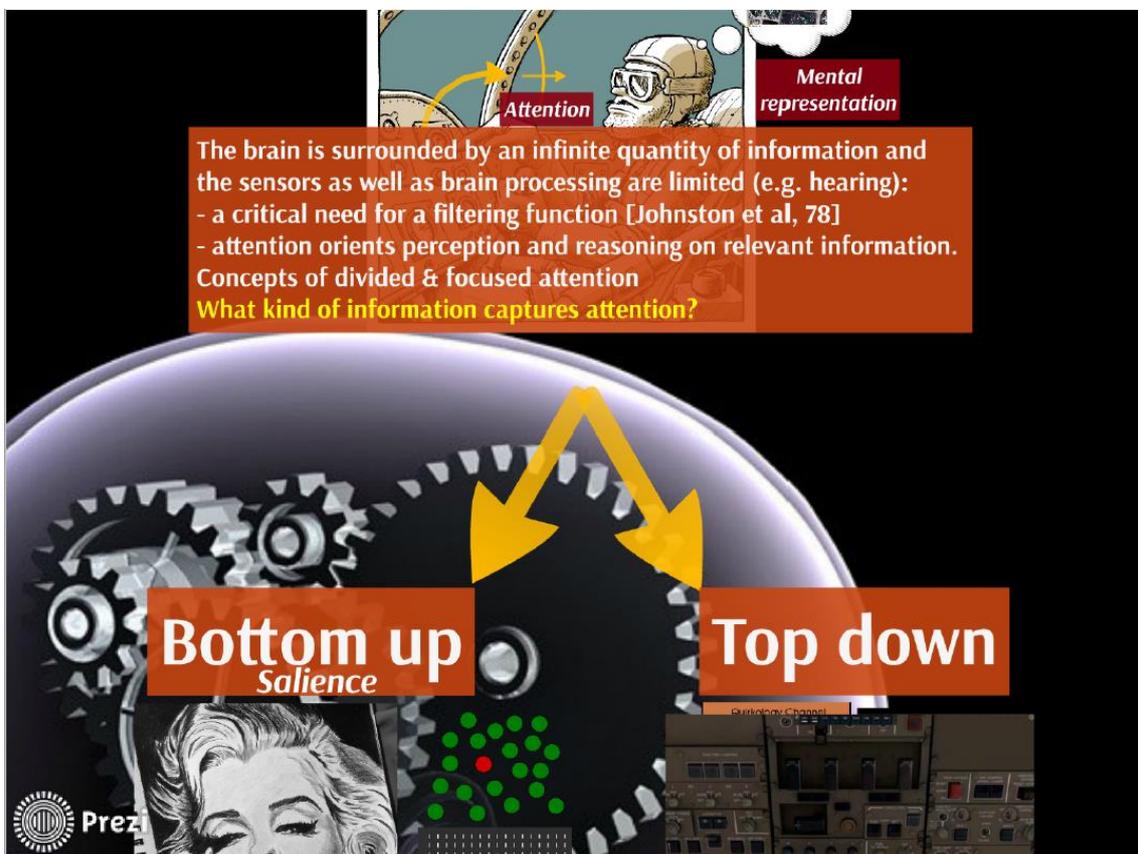


圖 3-3 兩種人類注意力控制之兩種主要歷程

- 記憶限制：駕駛員在操作運具時，其記憶限制常見於處理非預期或處理緊急時，包括：檢查表未完全執行完畢（do not end the checklist）、遺忘某些步驟（forgetting）或為了節省時間而重組某些項目（regroup some items）等。
- 決策限制：駕駛員進行決策與判斷時常見之限制包括僅蒐集和自己假設或信念相符之確認性偏誤（confirmation bias），或是僅依賴自己過去累積之知識與經驗進行判斷，而非理性邏輯的進行推演，稱之信念偏誤（belief bias）等。講師提出，決策與判斷偏誤相當影響駕駛員人為績效表現與操作行為，此種偏誤甚至難以透過良好人機介面設計來改善。

在提升運輸安全上之應用

講師指出，據其經驗：許多運輸事故發生前，駕駛員常處在高壓、高作業負荷，或充斥著資訊不一致或彼此衝突之情境，使其作出錯誤決策及不當行動而產生嚴重後果；而認知神經人因工程技術對於運輸安全提升之助益，主要在此技術可提供駕駛員在操作過程面對衝突情境或資訊時，或高壓、高工作負荷下之生理狀態與反應資料，並作為瞭解駕駛員內在看不見之認知運作之客觀證據；而在識別這些狀態與反應，透過系統、程序、作業等方面之改良或優化後，亦可使用相同方法再次蒐集駕駛員操作時之生理資料進行評估，以瞭解這些改善措施對於人為績效表現之影響，達到運輸安全提升之目標。

以目前法國駕駛員對於將認知神經人因工程技術導入實務作業，支持與持保留態度之人數大約各半。抱持正面態度且願意積極參加認知神經人因工程測試之駕駛員認為，既然過去已接受良好訓練且被認證，可藉此機會從科學實徵角度檢視自己之技術與訓練成效；持保留態度之駕駛員則主要考量提供自己運具操作過程之生理資料對於個人權益之潛在影響，以及個人資料保護等隱私議題。

以下介紹四項可用於蒐集與分析駕駛員生理狀態之技術，以及這些技術於人為因素及運輸安全領域之應用。考量本會目前已建置整合式眼動儀系統且累積一部分能量與使用經驗，另 113 年起本會科研計畫規劃建置之駕駛員生理行為分析系統，將以駕駛員心跳變異率為其中一項發展之分析技術，故以下先介紹眼動追蹤與心跳變異率。眼動追蹤將著重實務應用層面介紹，心跳變異率則針對基本原理與分析方式，以及於駕駛員心智作業負荷之應用實例進行介紹。另兩項技術：腦波及大腦近紅外光血氧監測之分析，亦將介紹基本原理與訊號分析方式，以及這些技術於運輸人因之應用，作為本會未來評估導入腦波及大腦近紅外光血氧監測分析技術之參考。

2. 眼動追蹤 (eye tracking)

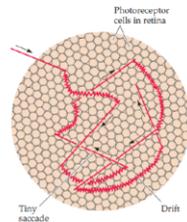
基本概念

人類眼動依類型可分為凝視 (fixation)、跳視 (saccade)、平滑追蹤 (smooth pursuit) 等不同方面，以認知人因工程領域，常用之眼動指標為凝視與跳視。跳視是指人類為使眼球中央窩注視外界刺激而產生快速移動眼球之現象；凝視則是介於跳視間眼球相對靜止之狀態，主要目的在蒐集與處理外界訊息 (圖 3-4)。

不過，凝視與跳視皆由眼動最基本單位：注視點 (gaze point) 組成，其意義為人類在某一時間點於一平面上注視的點，以 x、y 坐標軸表示。學理再將平面上鄰近之許多注視點界定為凝視，凝視之間則為跳視；有些學者則會進一步將相近之凝視界定為較大之注視範圍 (gaze)，或是在平面上界定出幾個感興趣範圍 (AOI)，以計算受測者在 AOI 內之凝視或注視指標，以及在 AOI 之間的轉換 (transition)，相關資訊如圖 3-5 所示。

Fixational eye movements

- The eye is « motionless »
- The information is acquired
- Average duration: 50-600 ms
- 90% of viewing time



Saccadic eye movements

- Change of focus (fovea)
- Can be triggered voluntarily or involuntarily
- Saccade planning is task-dependent
- Average duration: 20-40 ms
- Main sequence: linear relationship between the duration and the amplitude
- Ballistic movements
- The information is not acquired (vision suppression)

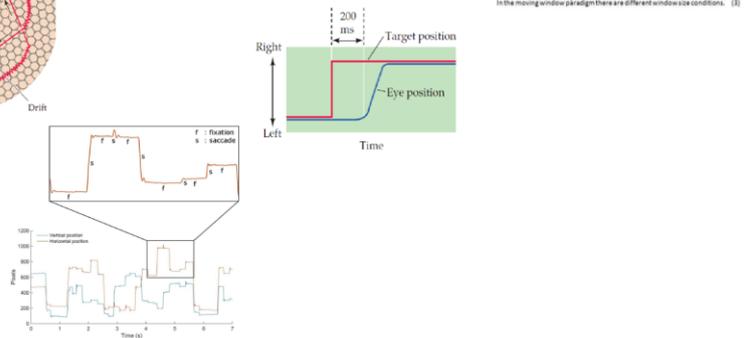


圖 3-4 人類眼動之凝視與跳視

Basic elements visualization

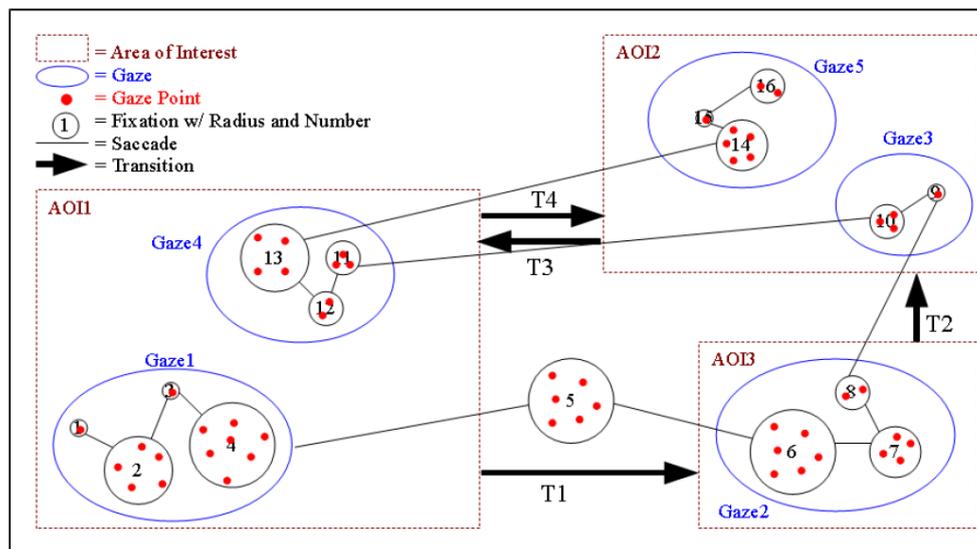


圖 3-5 眼動指標基本介紹

眼動在動作執行之角色

駕駛員操作涉及一連串動作執行步驟，而眼動在動作執行中扮演重要角色。如圖 3-6 所示，眼睛通常在採取下一步步驟或動作前就已移至該目標或物件上，而執行某項操作或步驟時，凝視為一項關鍵的眼動行為。凝視之主要功能如下：

- 定位 (locating)：協助人員識別各物件於空間中之配置，以利當前或未來使用；
- 指示 (directing)：協助人員在作出動作前，確認物件之方位；
- 導引 (guiding)：協助人員在處理一系列或涉及多項物件時能有效操作；
- 核對 (checking)：協助人員在終止一項動作或操作前，是否所有步驟皆已完成。

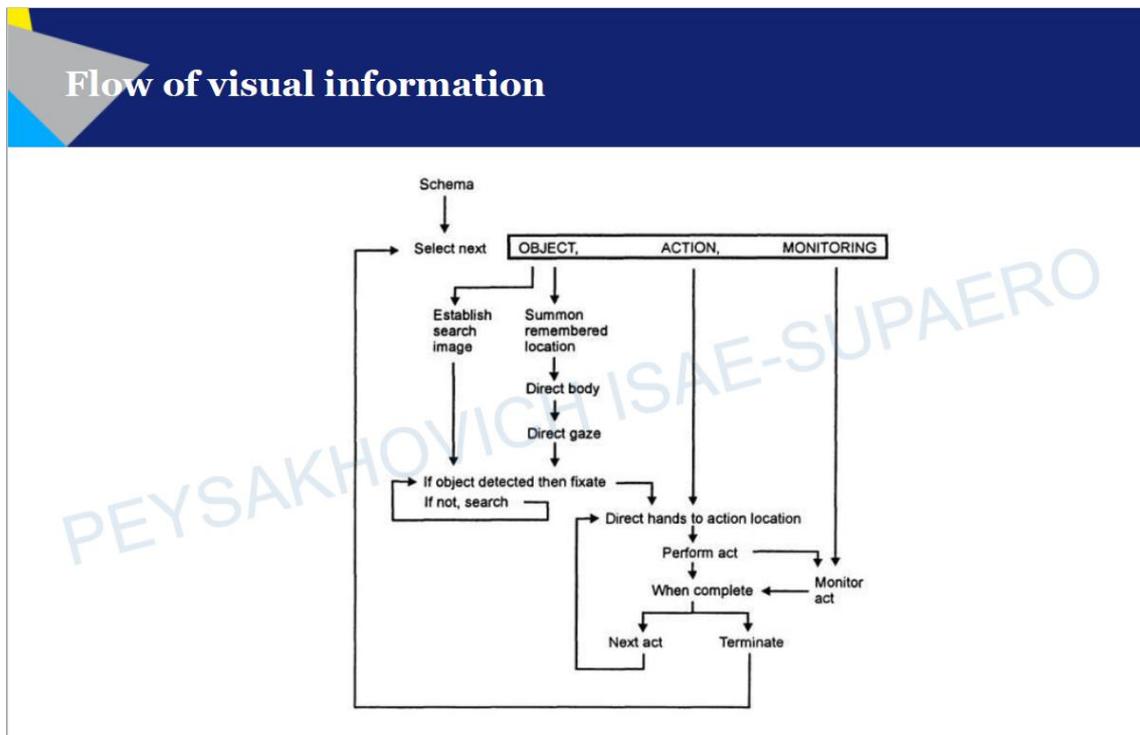


圖 3-6 眼動在動作執行之角色

駕駛員眼動與監控行為

駕駛員未有效監控駕駛艙儀表、飛航路徑等狀況以致喪失情境覺察為許多重大飛航事故常見肇因之一；線上安全查核（line operations safety audit, LOSA）亦發現：那些在監控與交互檢查表現被評為差或邊緣之駕駛員，亦有高出 3 倍之機會於飛航操作中出現對於飛航管理系統不當管理之人為錯誤。從威脅與疏失管理(threat and error management, TEM)之角度，良好之監控行為也被業界認為是可做為預防威脅與飛航組員疏失之核心防禦機制。

如前一小節所述，駕駛員眼動行為除了在飛航操作與動作執行扮演重要角色外，駕駛員眼動行為對於運具狀態之掌握，或是保持良好情境覺察等方面更為關鍵，因駕駛員可透過維持適當之眼動掃視型態，建立對於運具狀態之良好監控，以保持情境覺察能力。

講師提出，透過運輸事故調查或異常事件調查，雖有機會指出駕駛員存在未適當監控儀表之不安全行為，但事故調查結果較不易從正面角度提出良好監控儀表行為之內涵，而藉由蒐集駕駛員眼動資料，並建立眼動資料庫，則可提供駕駛員良好儀表監控之具體行為指標，甚至可據此建立飛航訓練標準，提升學員理解飛航操作中正確蒐集儀表數據資訊之方式。

講師於課程中提供兩本參考技術文件，內容皆與駕駛員監控技巧有關，可供本會後續在執行運輸人因與眼動相關研究與測試之參考，如圖 3-7。

Useful reading: aviation & monitoring



圖 3-7 駕駛員監控技巧參考文件

眼動資料分析及結果呈現

認知人因領域分析眼動資料主要以凝視與跳視為主，並以此為基礎進一步衍生各種相關分析方式。以圖 3-8 為例，常用分析指標包括：凝視次數百分比(% of fixation)、於 AOI 凝視平均停留時間 (mean dwell time) 等，或是將一趟飛航任務區分不同飛航階段，並於各階段分析駕駛員於駕駛艙不同 AOI 之凝視次數比例，或是將駕駛員原始眼動資料(注視點)座標值置於時間軸，分析駕駛員眼動與操作行為之關係。

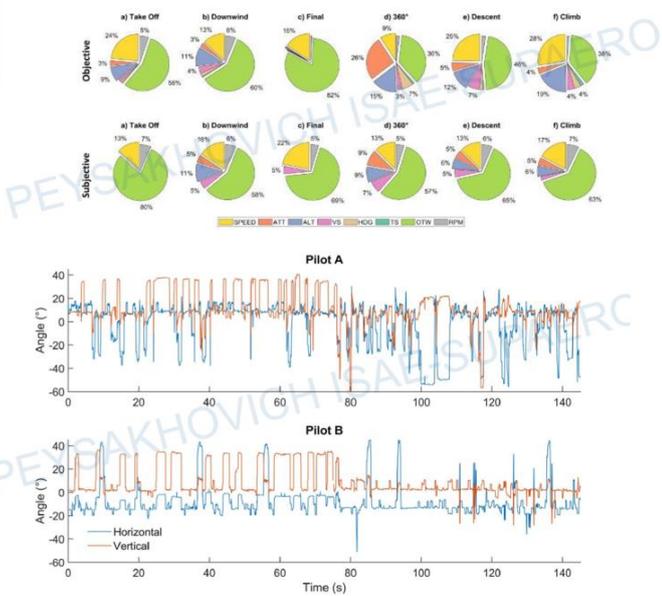
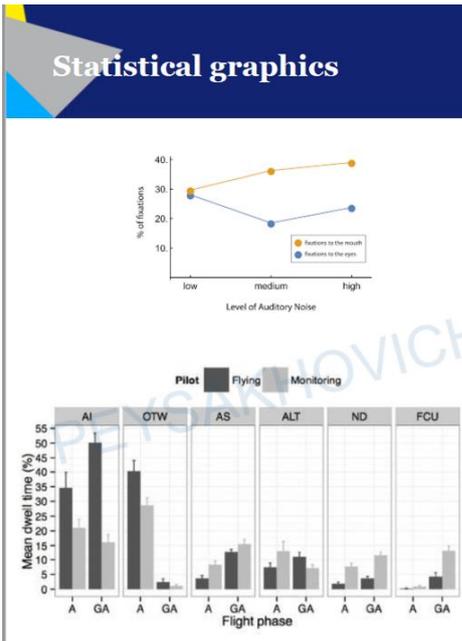


圖 3-8 眼動分析與結果呈現

除了基礎眼動分析技術，近年為了有效傳達複雜數據分析結果之意義，許多可視化技術（visualization techniques）相繼被發展出來，甚至結合視覺科學領域一些複雜的視覺分析技術（visual analytics）。一般常見之可視化技術主要有兩種：熱像圖（heat map）與軌跡圖（gaze plot），如圖 3-9 所示。

熱像圖可顯示駕駛員在特定區域如駕駛儀表之姿態儀、高度、速度等部分之凝視分佈情形，軌跡圖則可瞭解駕駛員對駕駛室各項重要儀錶之視線移動軌跡。一般而言，軌跡圖中之節點大小表示駕駛員在某區域凝視持續時間長短，節點內數字則表示駕駛員在不同儀錶之凝視順序，可做為瞭解駕駛員如何蒐集、處理資訊的歷程，以推估建構情境覺察的資料。然而，以複雜之飛航作業而言，軌跡圖呈現方式不易讓人短時間內掌握駕駛員眼動與認知運作之關聯（圖 3-9 右），因此近年開始有研究者導入複雜的視覺分析技術（visual analytics），如以屬性為基礎之邊緣網綁分析法（attribute-driven edge bundling, ADEB），說明如下：

Most common eye tracking data visualizations



圖 3-9 眼動資料之可視化呈現

講師與其他研究者曾使用以屬性為基礎之邊緣網綁分析法，即透過一系列複雜之數學公式（圖 3-10），分析駕駛員於模擬機中執行一項 15 分鐘之降落作業的眼動資料。此項作業之目的在於想瞭解導入一項新式降落輔助儀器（landing aid instrument, LAI）對於駕駛員執行降落作業之助益，亦即想瞭解駕駛員執行降落過程如何將 LAI 與主要飛航顯示器（PFD）、導航顯示器（ND）及飛航控制單元（FCU）搭配使用。15 分鐘降落作業共蒐集 1194 次跳視資料，以原始跳視軌跡圖呈現分析結果可見（圖 3-11），軌跡圖會因跳視數目過多而使圖片呈現之意義喪失，但透過以屬性為基礎之邊緣網綁分析法（ADEB）則可清楚顯示駕駛員在執行降落作業共有 5 條主要跳視軌跡路徑，包括：

- 由 LAI 至 FCU
- 由 PFD 繞過 ND 至 LAI
- 由 LAI 繞過 ND 至 PFD
- 由 FCU 至 PFD

- 由 PFD 至 FCU

此外，PFD 與 ND 之間的眼動行為，相較 PFD 與 FCU、PFD 與 LAI 之間的連結更為強烈且頻繁。這些結果顯示，駕駛員並未在航空器降落過程頻繁使用新式降落輔助儀器；配合訪談發現，駕駛員表示其在執行降落作業時須不斷由 PFD 與 ND 確認航空器狀態，且在 FCU 中輸入飛航參數後會立即從 PFD 顯示進行檢查。因此，駕駛員仍使用原有熟悉方式執行降落。講師指出，透過以屬性為基礎之邊緣網綁分析法的眼動分析結果，未來可提供研發者考量將新式降落輔助儀納入降落作業之程序與訓練，以利讓駕駛員在駕駛配有新式降落輔助儀的航空器時，知道何時應參考該儀器資訊執行降落作業。

$$\rho(\mathbf{x} \in \mathbb{R}^2) = \frac{1}{h^2} \sum_{i=1}^N \int_{\mathbf{y} \in e_i} K\left(\frac{\mathbf{x}-\mathbf{y}}{h}\right), \quad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \frac{h(t)\nabla\rho(\mathbf{x},t)}{\max(\|\nabla\rho(\mathbf{x},t)\|, \varepsilon)}, \quad \forall \mathbf{x} \in G, \quad (2)$$

$$\theta(\mathbf{x} \in \mathbb{R}^2) = \frac{1}{h^2} \sum_{i=1}^N \int_{\mathbf{y} \in e_i} \mathbf{d}(\mathbf{y})K\left(\frac{\mathbf{x}-\mathbf{y}}{h}\right), \quad (3)$$

$$\Omega_{\mathbf{x},c} = \left\{ \mathbf{y} \in \mathbb{R}^2 \setminus \ker(\theta) \mid \frac{\mathbf{d}(\mathbf{x}) \cdot \theta(\mathbf{y})}{\|\theta(\mathbf{y})\|} \geq c \right\} \subset \mathbb{R}^2, \quad (4)$$

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \frac{h(t)\nabla_{\Omega_{\mathbf{x},c}}\rho(\mathbf{x},t)}{\max(\|\nabla_{\Omega_{\mathbf{x},c}}\rho(\mathbf{x},t)\|, \varepsilon)}, \quad \forall \mathbf{x} \in G \quad (5)$$

$$\mathbf{t}_i^x(\mathbf{x}) = \cos\left(\frac{t_i(\mathbf{x}) - t_{min}}{t_{max} - t_{min}} \cdot \pi\right), \quad \mathbf{t}_i^y(\mathbf{x}) = \sin\left(\frac{t_i(\mathbf{x}) - t_{min}}{t_{max} - t_{min}} \cdot \pi\right) \quad (6)$$

圖 3-10 以屬性為基礎之邊緣網綁分析公式

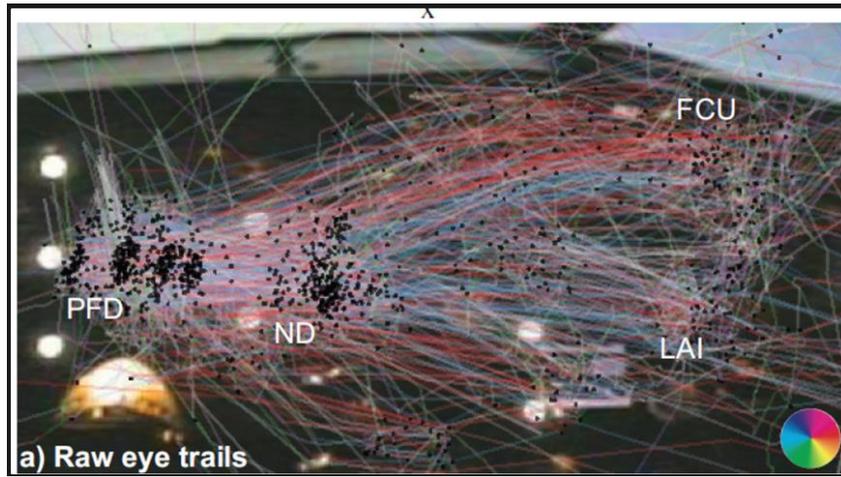


圖 3-11 原始軌跡圖

Attribute-Driven Edge Bundling in the cockpit: a complex case

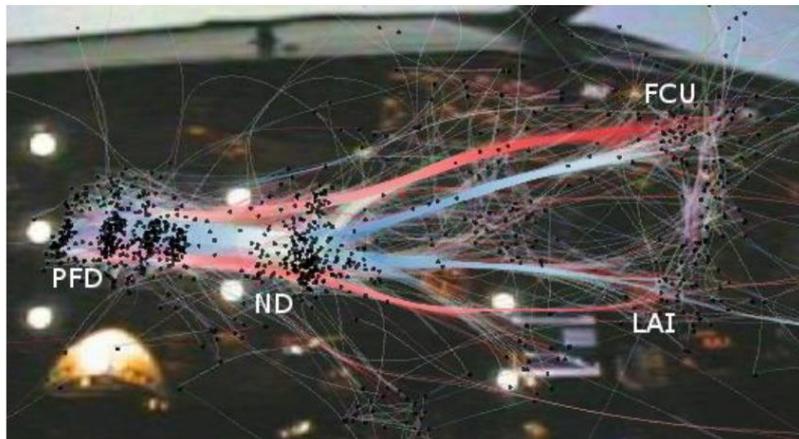


圖 3-12 以屬性為基礎之邊緣網綁分析圖

眼動追蹤系統於提升飛航安全之應用

目前眼動儀在國外航空領域與業界已朝向建置於飛航模擬器及航空器內之方向發展，如圖 3-13 所示。因此，未來眼動技術在飛航安全提升上應占有重要地位。



圖 3-13 眼動儀建置於飛航模擬器與航空器之實例

講師於課中提出一個眼動技術整合模式（圖 3-14），在建立眼動資料庫後，可將資料應用至人員訓練直至智慧型航空器，依駕駛員狀態提供即時協助或介入。

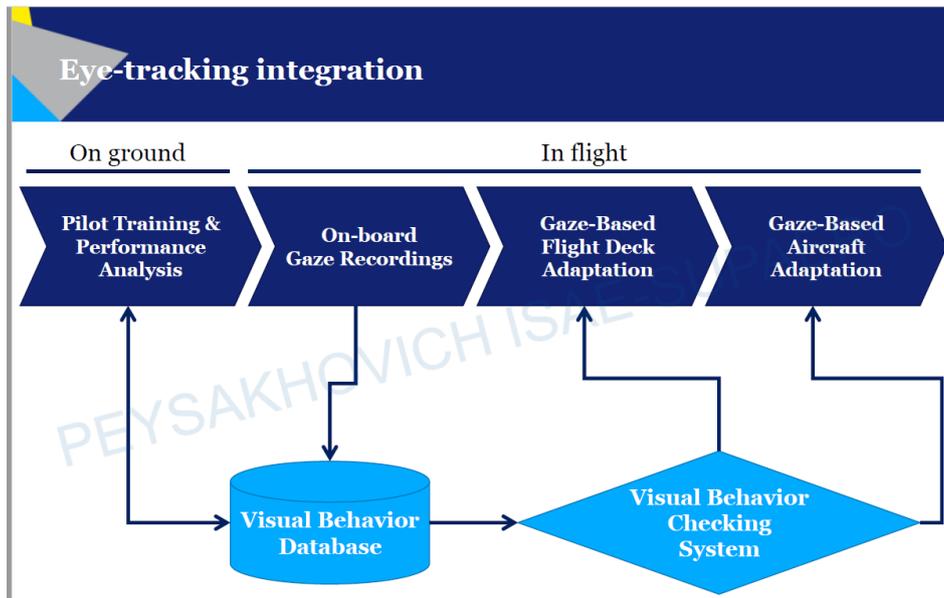


圖 3-14 眼動技術於航空領域之應用

3. 心電圖與心跳變異率分析 (electrocardiography & heart rate variability variability)

基本原理

人類心臟跳動具有周期與規律性，並於跳動過程傳遞電生理訊號，藉由心電圖 (electrocardiography, ECG) 儀器量測，則可顯示此過程展現之波型，如圖 3-15 所示之 PQRST 波。臨床上醫師則可藉由波型判斷受測者心臟健康情形。

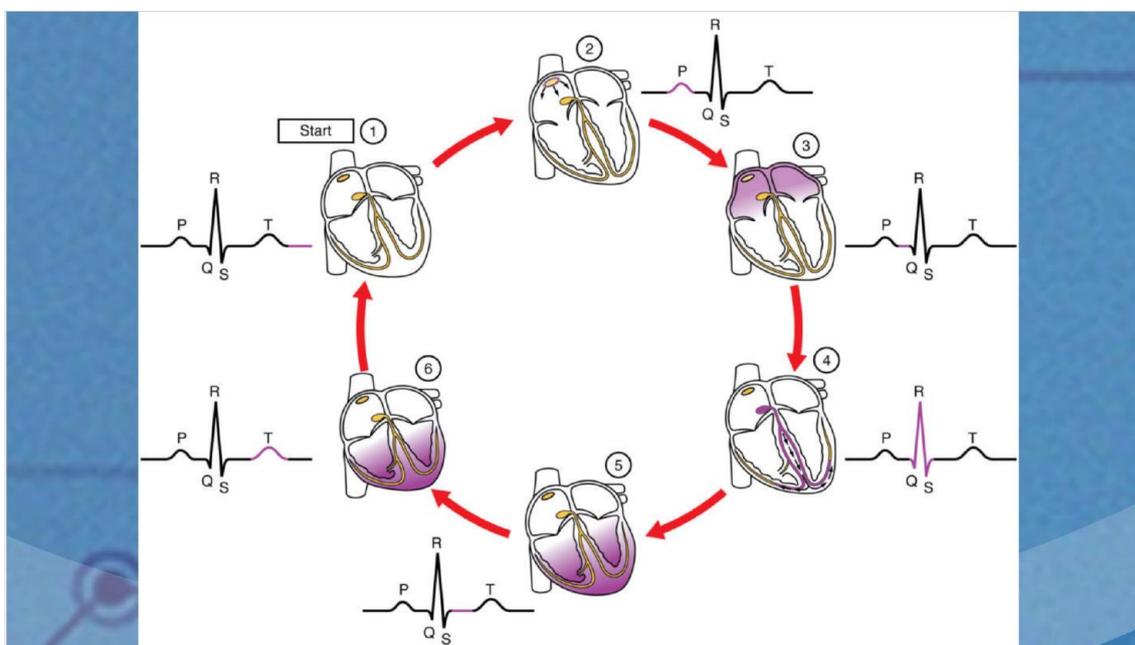


圖 3-15 心臟跳動過程電傳導與波型關係圖

在認知人因工程領域，使用心電圖瞭解駕駛員操作涉及之生理心理反應，主要使用 R 波；進一步而言，係使用心電圖中 R 波最高峰之間的距離 (R-R Intervals)，如圖 3-16。使用 R 波之主要原因，在於 R 波易偵測、準確率高，且有相當多的心跳變異率指標皆以 R 波為基礎進行換算。

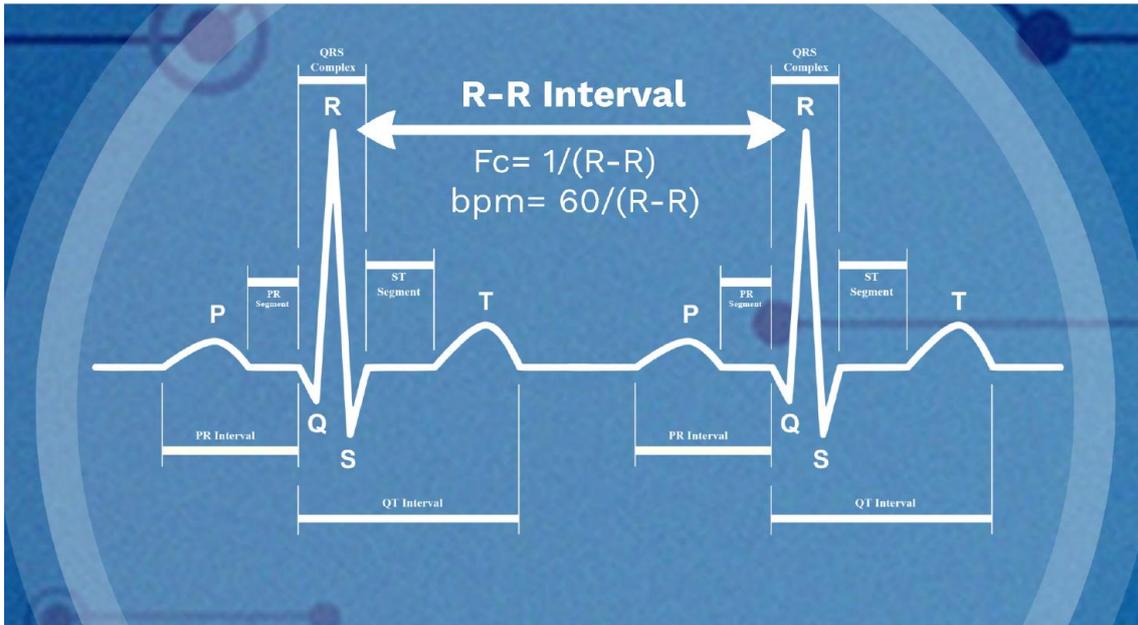


圖 3-16 心電圖中 R 波之距離

認知人因領域常用之心電圖設備

如前一小節所述，認知人因領域以心電圖 R 波為主要應用基礎，故在工具選用上須考量可精確量測 R 波之儀器。目前坊間推出許多以光體積掃描圖（Photoplethysmography, PPG）技術之儀器，可藉 LED 光源照射皮膚，量測隨心臟跳動產生之末梢血流光訊號微量體積變化以進行心率推估。講師指出，PPG 儀器在使用上雖有其便利性，如不須在受測者身上貼電極片，故無穿脫衣物之隱私性問題；然而，PPG 因使用光源技術、非電訊號量測，故量測結果可能出現誤差。因此，其建議心電圖設備之選用，仍以直接量測電生理訊號之儀器為佳。

課程中，講師介紹幾種認知人因領域常用之心電圖儀器，包括 Biopac、Procomp、Faros 及 Garmin，如圖 3-17 所示。

- Garmin 腕表雖有提供 GPS 座標位置資料，但僅能記錄心率數據，無法得到 R-

R Intervals 數據並進而轉換心跳變異率指標，故在應用上較受限制。

- Biopac 及 Procomp 則為兩種在生理訊號蒐集與分析技術較為成熟之儀器，其中 Procomp 可攜帶至運具駕駛室，在駕駛員於前座貼妥心電圖電極片並完成機器初始開機等設定後，研究者可在後座即時監視心電圖資料蒐集情形，並進行時間或事件標記。在資料蒐集方面，Procomp 除了可蒐集高取樣率（2000 赫茲以上）之心電圖資料，亦可同步蒐集其他如膚電、末梢血流量、呼吸速率、溫度等生理訊號，進行多項度生理訊號分析。
- Faros 則為便攜式心電圖紀錄裝置，使用藍芽傳輸訊號，取樣率亦可至 1000 赫茲，若自行撰寫 python 程式，則可線上監控駕駛員心電圖訊號，作為反映駕駛員即時心智工作負荷之工具。



圖 3-17 認知人因領域常用心電圖儀器

心電圖分析步驟

心電圖技術應用於認知人因領域，其主要分析步驟如下（圖 3-18）：

- 選擇可精確記錄 R peak 之心電圖儀器並在駕駛員操作運具過程中（實機或模擬機）蒐集心電圖資料；若事後在分析階段欲比較不同操作階段駕駛員心率或心跳變異率之差異或變化，須於資料蒐集過程針對不同事件進行標記（event marker）。
- 在駕駛員心電圖資料蒐集完成後，將其原始心電圖資料，以及資料過程之不同時間與事件標記等輸出至心電圖分析軟體。
- 經心電圖軟體自動分析結果，得到駕駛員運具操作時之心跳的 R peak 資料。
- 檢視心電圖分析軟體所得之 R peak 資料，進一步針對非 R peak、漏失之 R peak、或因其他原因如大動作造成之偏誤資料，進行手動校正（ectopic correction & artifact correction）。
- 將校正完成之 R peak 資料，藉由分析軟體自動轉換為心跳變異率指標（R-R interval conversion）；
- 將所得之時域（time domain）或頻域（frequency domain）之心跳變異率指標，結合認知心理學、生理學等相關知識，解讀駕駛員心跳變異率與其駕駛操作、心智作業負荷、身心狀態等因素間之關聯性分析。

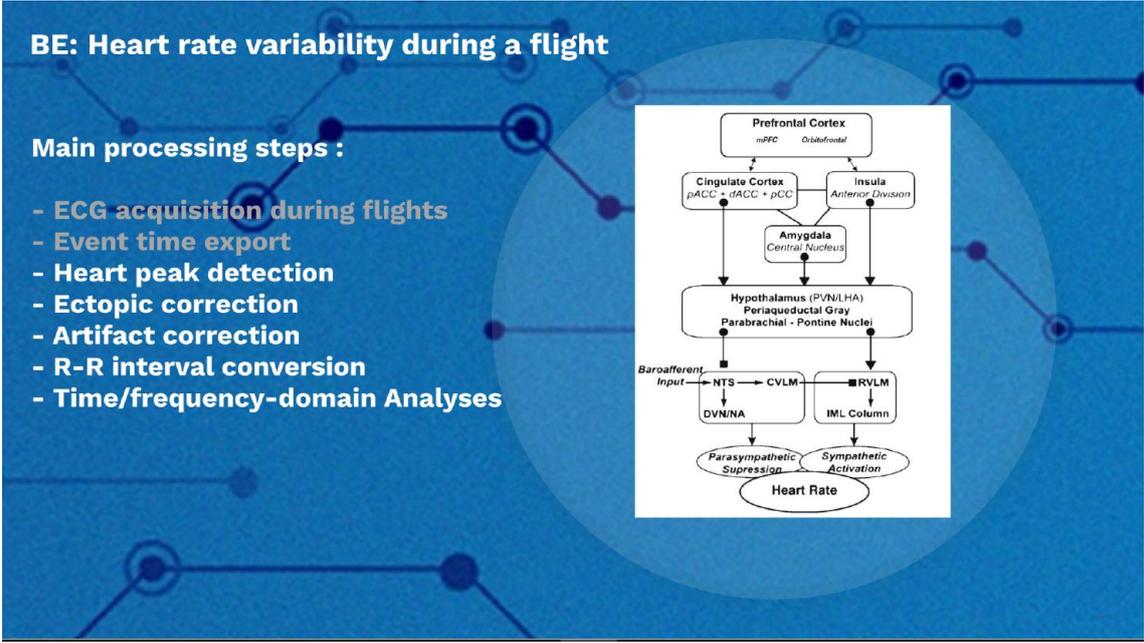


圖 3-18 認知人因使用心電圖分析步驟

心電圖數據在駕駛員飛航操作之分析與應用

認知人因領域使用心電圖數據對駕駛員操作進行分析，至少可從三方面著手：

- 心率分析

在駕駛員飛航操作過程中配戴 Garmin 腕錶蒐集心率，經資料讀出與分析後可得到不同飛航階段之飛行高度與心率變化分佈圖，如圖 3-19。

由此分佈圖可知：不同飛航階段之心率變化有顯著差異，特別在駕駛員執行降落至觸地重飛階段，其心率有顯著上升後再下降之趨勢，這主要係因駕駛員於此階段需執行並設定多項降落作業項目而增加心輸出率。

然而，值得注意的是：當比較幾次降落與觸地重飛階段駕駛員心率最大值會發現，其心率最大值呈現隨時間逐漸降低之趨勢，顯示駕駛員可能因已熟悉降落

作業而出現習慣化反應使其最大心率值降低。鑒於駕駛員降落所需執行作業項目並未因不同時間而異，惟最大心率卻隨時間與熟悉性而降低，顯示駕駛員心率變化和其執行降落作業之實際工作負荷量之關聯性較低；反之，心率變化和其所經驗之壓力程度或心智作業負荷量之關聯性較高。

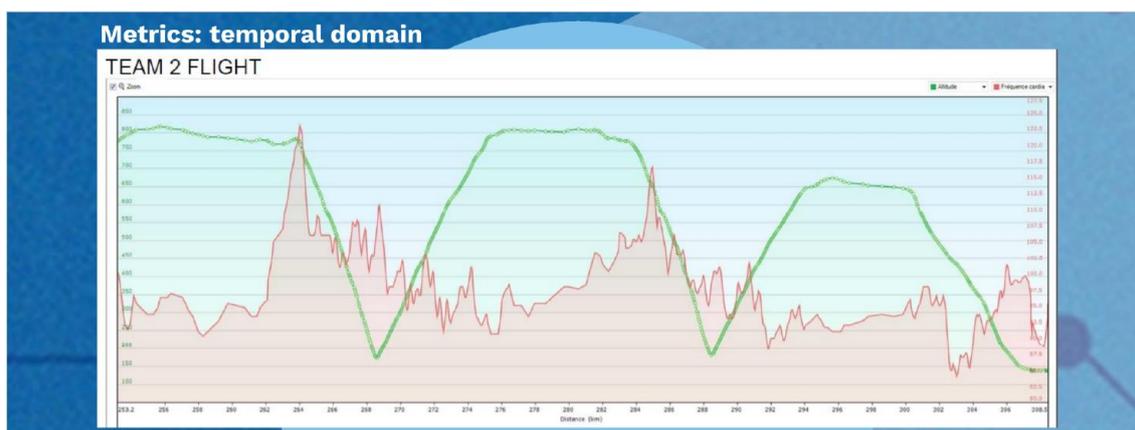


圖 3-19 不同飛行階段之心率與心跳變異率（時域）變化

- 心跳變異率之時域分析

使用可記錄 R peak 之心電圖儀器，如 Faro，並於駕駛員運具操作中配戴儀器，則可得到運具操作過程之 R-R interval 資料，此種資料為一種隨時間呈現 R 波之間變異情形之分析方式。以圖 3-20（上）為例，駕駛員在起飛前，其 R-R interval 約在 900 毫秒左右，換算心率約為 66.7，其數值落在常態範圍。然而起飛階段可見，駕駛員之 R-R interval 開始顯著下降，亦即心跳變異幅度開始大幅下降，約降至 700 毫秒左右，此時換算心率約為 85.7。

從學理角度，當個體承受較高心智工作負荷，其心輸出量會加大；但從心跳變異率（heart rhythm variation）之角度則可見，其變異範圍隨心智工作負荷量上升而下降。因此，心率與 R-R interval 之時域分析，可作為駕駛員評估心智作

業負荷之重要指標。

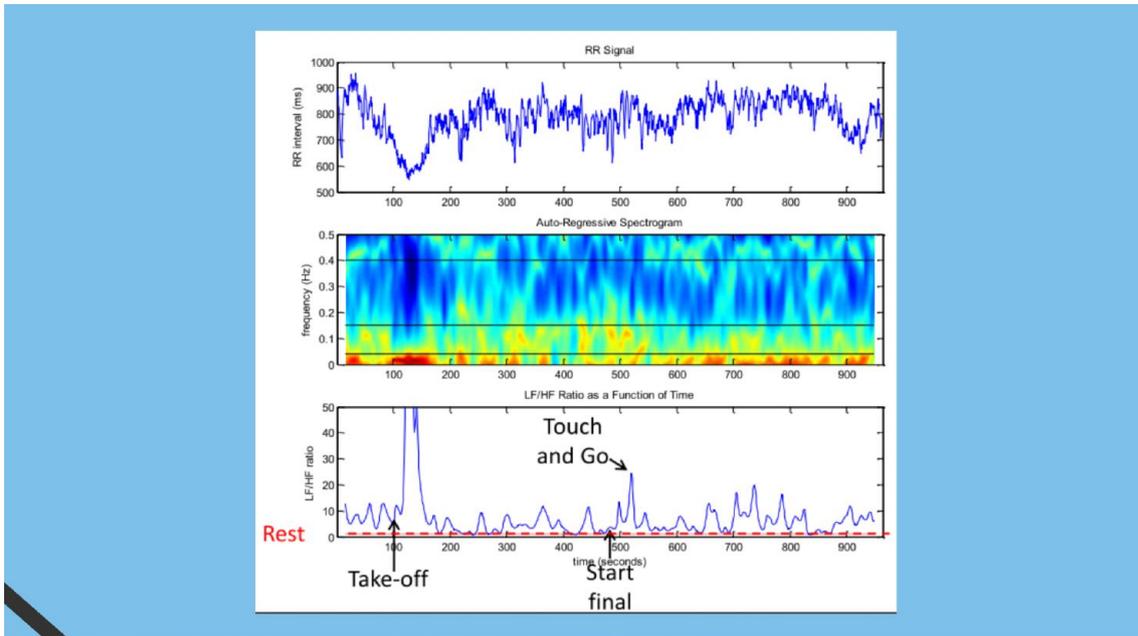


圖 3-20 駕駛員運具操作時心跳變異率分析

- 心跳變異率之頻域分析

除時域分析，亦可透過頻域分析反映駕駛員操作運具時之心智作業負荷。頻域分析最常用低頻與高頻比率作為指標，其中低頻數值（low frequency band）與駕駛員交感神經系統活化較有關連，高頻數值（high frequency band）則和副交感神經系統作用較有關連。如圖 3-21。

對照駕駛員在起飛階段、心智作業負荷相對較高之 R-R interval 資料顯示心跳變異率降低，其在低頻頻譜（0.04-0.15 赫茲）則顯示有強化效果，而高頻頻譜（0.15-0.4 赫茲）則有顯著之弱化效果，如圖 3-20（中）所示。

轉換為低頻與高頻比率（LF/HF）則可發現，駕駛員在起飛階段、觸地重飛等

階段之 LF/HF 數值較高，其中首次起飛階段又比觸地重飛階段之 LF/HF 數值更高，顯示駕駛員於首次起飛所經歷之心智作業負荷亦相對更高。

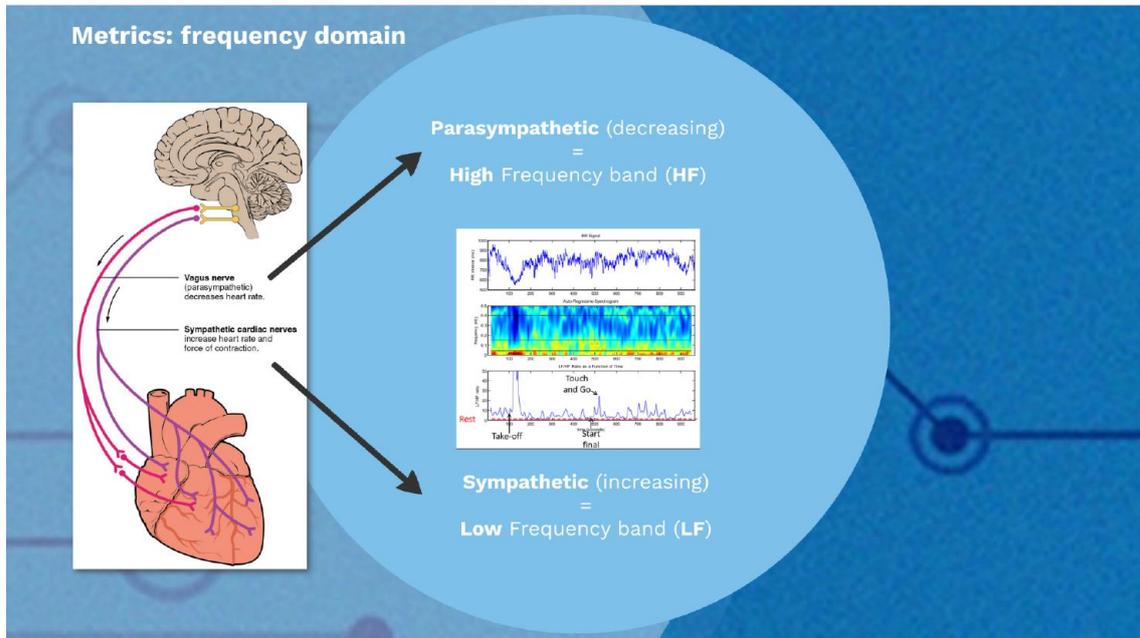


圖 3-21 自主神經系統與心跳變異率之關係圖

4. 腦波 (electroencephalography, EEG)

基本概念

人類舉凡思考、判斷、行動，或從事其他認知活動與操作，其大腦亦同步運作，藉神經元電訊號傳遞訊息；腦波儀則是一種根據電極間之電位差 (electric potential differences) 來蒐集傳導至頭皮之電位活動的儀器。關於腦波儀所蒐集之大腦電訊號來源，並非來自強度較高之動作電位訊號 (約 100 毫伏)，反倒是強度較弱之突觸後電位訊號 (約 10 毫伏)。主要原因在動作電位訊號速度過快 (1-3 毫秒) 而無法被儀器記錄，故在訊號蒐集上採用強度較弱、但持續時間較長之突觸後電位 (20 毫秒)。為解決電訊號強度過低之問題，腦波儀利用大腦錐體神經元結構所形成之

猶如電極導體的空間特性強化訊號蒐集。因此，腦波儀蒐集之電訊號，最終由時間（temporal summation）與空間（spatial summation）等兩項特性加總所形成之訊號集合，如圖 3-22 所示。

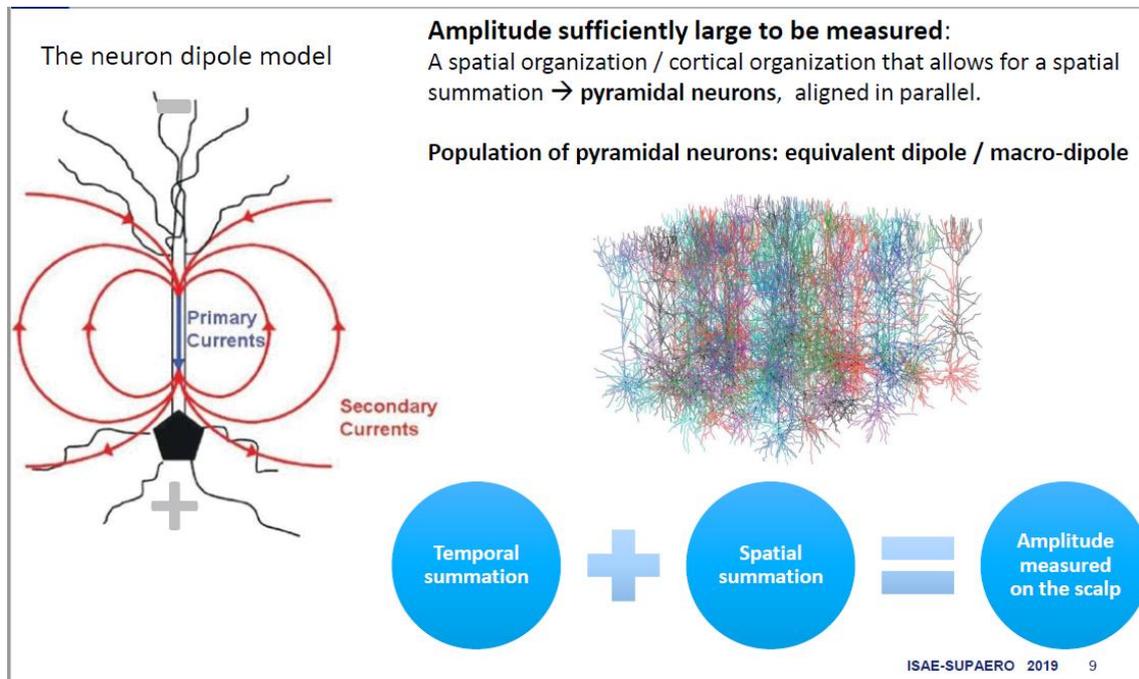


圖 3-22 腦波儀訊號蒐集基本原理

腦波技術在認知神經人因工程應用之優勢

近年來隨著硬體工程技術與軟體與分析方法日趨成熟，腦波技術已開始被應用至認知神經人因工程領域，包括提供駕駛員疲勞、心智作業負荷等飛航安全與人為因素議題分析之關鍵資料。綜合而論，腦波技術因具備下列優勢，而在認知神經人因工程領域被廣為應用：

- 提供高時間解析度之認知運作生理資料，其精確性可達毫秒層次；
- 屬於一種非侵入性技術，受測者接受度高；相較其他技術，如磁振造影等儀器，

腦波價格相對低廉、且各式攜帶型腦波儀技術已發展相當成熟；

- 非常適合作為人（腦）機互動之應用；結合其他如近紅外光血氧偵測等技術，可探究許多重要之認知人因議題，如疲勞、壓力、心智作業負荷等。

腦波帽與電極配置

臨床上使用腦波儀對患者進行大腦與心智功能檢查，主要使用溼式電極。溼式電極之使用，因為需於受測者頭皮接觸面塗上導電膠，以利導電與訊號偵測，而使得配戴過程耗時、使用期間也需定時補充導電膠，另每次使用後皆需清洗腦波帽並清潔電極，較不利於認知人因或運輸人因實務領域之應用。不過，近年來各式乾式電極技術推陳出新，訊號傳遞效能在藍芽技術進步下亦可達到高速資訊傳遞，故攜帶型乾式電極之腦波儀技術（圖 3-23）相當利於用於認知人因工程領域。

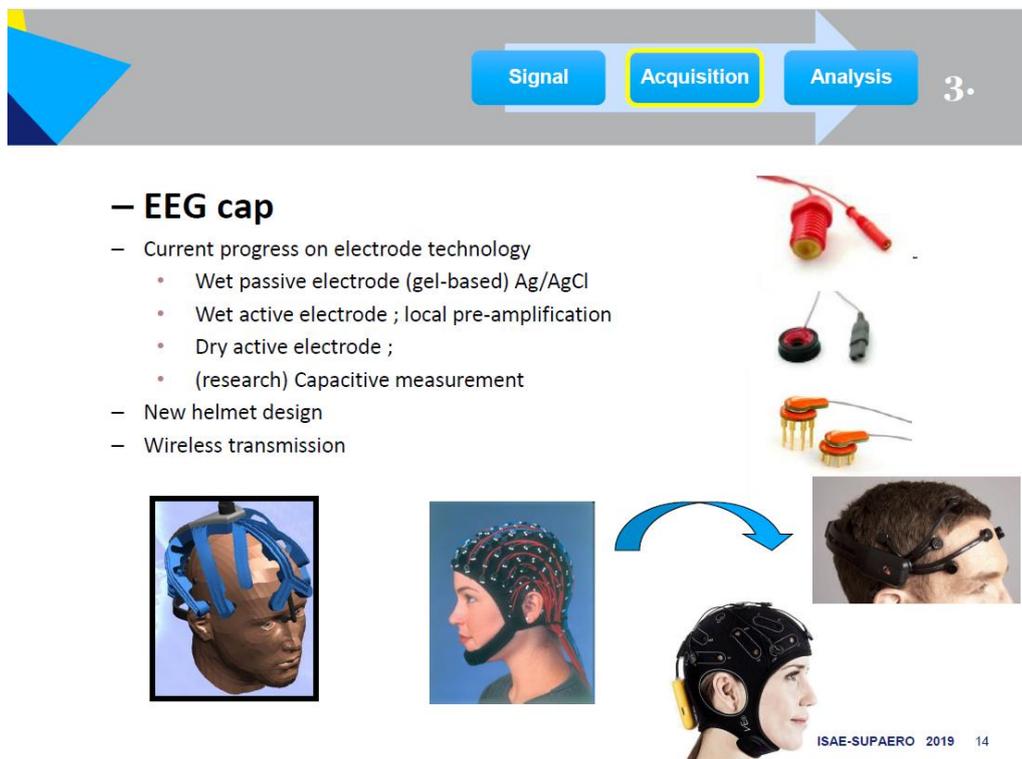


圖 3-23 認知人因工程領域常用之乾式電極腦波帽

有關腦波電極配置，目前最常使用之方式係依據 1958 年國際腦波學會公布之 10-20 系統。10-20 系統的定位方式，是以鼻樑為起點，至枕骨突隆止這段距離，按 10%-20%-20%-20%-20%-10%之比例劃分，並以不同英文代號作為區域標記，如額葉（frontal）標示為 F、中線（central）標示為 C 等。另，通常將耳朵後方的乳突（mastoid）作為參考電極，如圖 3-24 所示。

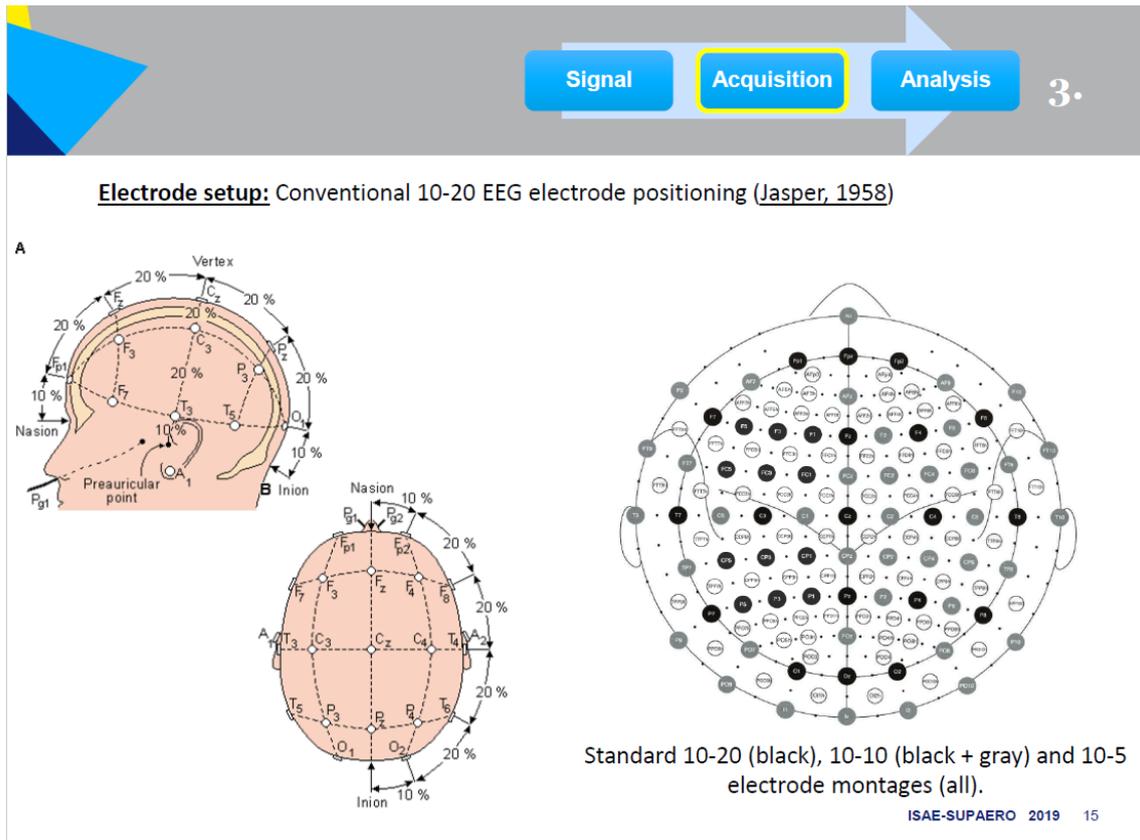


圖 3-24 腦波電極配置 10-20 系統

腦波資料處理步驟

如同前述，腦波技術利用了時間與空間特性加成強化傳遞至頭皮之電訊號，促使腦波分析應用於駕駛員心智運作所涉及之腦功能成為可能。然而應留意的是，突觸後電位活動傳遞至頭皮過程，因受層層腦組織阻隔，故儀器蒐集之原始腦波訊號在強

度上仍相對微弱，且易受到其他臟器，如心臟跳動之電訊號干擾。因此，腦波資料分析前仍須經過一系列資料處理，方能獲得與駕駛員心智運作或操作相關有意義訊息。以下介紹兩種重要的資料處理項目：雜訊處理、特徵擷取。

雜訊處理與原則

雜訊處理為腦波資料分析之重要步驟，又稱資料前處理（pre-processing），其目的在提高腦波訊號雜訊比（signal-to-noise ratio, SNR）。當訊號雜訊比越高，表示有用之訊號越強，雜訊對訊號之影響越小；換言之，也越有機會進一步對訊號進行處理和解釋意義。一般而言，腦波雜訊常來自環境（如電源、電磁波場域）與人員本身（心跳、眨眼等）等兩方面之干擾，如圖 3-25 所示。

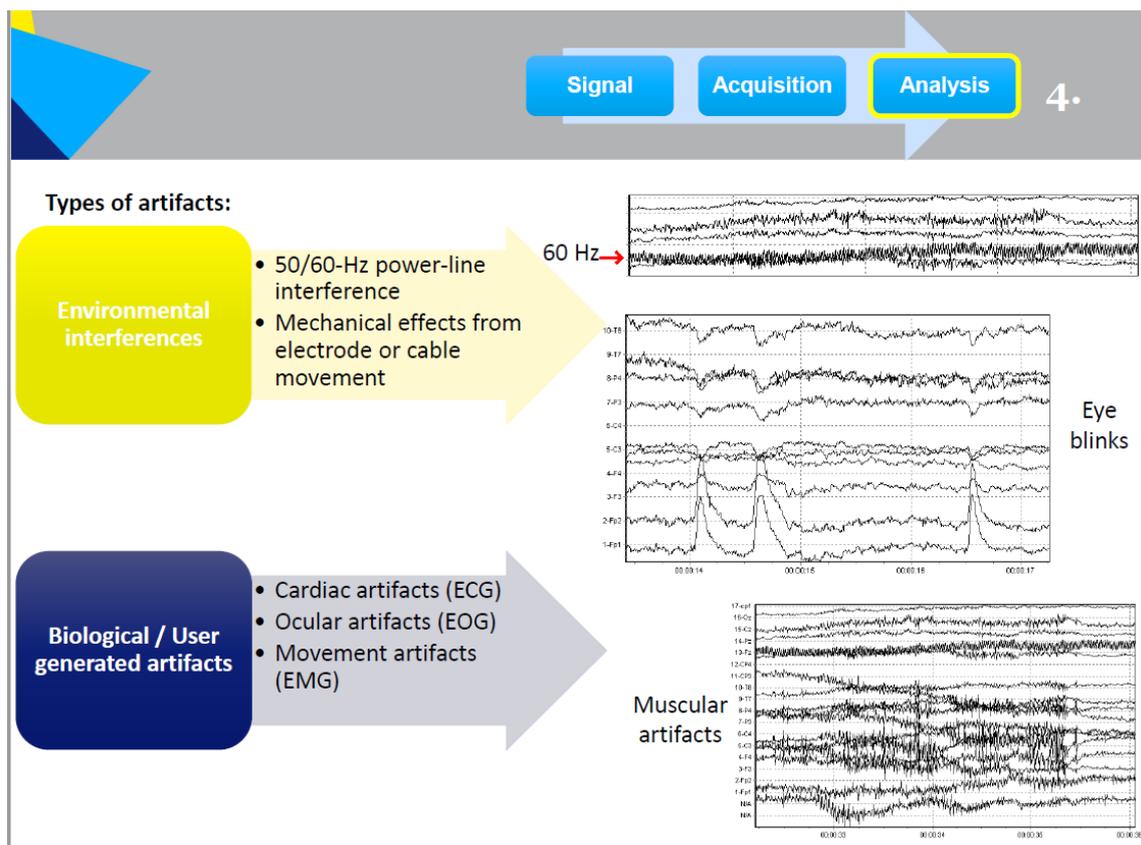


圖 3-25 腦波雜訊來源

有關雜訊處理原則，一般採以下三種原則進行處理：

- 第一，透過實驗設計避免受測人員產生雜訊（**avoidance**）相關行為。例如：要求受測人員避免眨眼或做出頭部移動等動作。然而，此法較適合實驗室情境之研究，對於認知人因研究多在實務工作場域進行而言，是較少使用此法處理腦波雜訊。
- 第二，將受到雜訊干擾之資料區段刪除（**rejection**）。例如：透過檢視腦波原始資料並將雜訊手動刪除，或透過電腦程式設定特定閾值將雜訊刪除。此法可部份解決真實場域蒐集之雜訊資料，但對於要分析連續性操作歷程之腦波資料則較不適用。
- 第三，使用如 **notch filter** 等方式將非生物訊號過濾（**elimination**）。此法係將原始腦波資料重建成無雜訊資料，再進一步分析處理。另外，亦可使用演算法，以不失去任何腦波資料之前提下降低雜訊之干擾。相較前面兩種方式，認知人因工程領域較常使用第三種方式處理腦波雜訊。

雜訊處理雖為腦波資料處理之一項重要步驟，惟值得注意的是：雜訊為一種相對概念，並非所有雜訊皆須處理。以受測者眨眼動作為例，傳統腦波實驗分析通常會將眨眼視為一種必要處理之雜訊；然而，在運輸人因領域探究駕駛員疲勞議題時，眨眼所產生電生理訊號則為一種分析疲勞的重要指標。事實上，依國際民航組織對疲勞之定義可見，疲勞為一種生理狀態，和認知神經科學研究指出人類於疲勞且閉眼時，於腦波訊號出現明顯 **alpha** 功率之大腦狀態改變相呼應。

特徵擷取與駕駛員心智狀態分析應用

腦波資料經雜訊處理後，下一關鍵分析步驟則是從訊號中擷取特徵（**feature**

extraction)。所謂特徵擷取，係指從腦波訊號中提取有意義訊息之過程，這些被識別之特徵可用於建立腦波分析模型，或進一步分析駕駛員對外界訊息處理情形或當時之心理狀態。實務上常用來擷取腦波訊號特徵之方式，包括時域特徵、頻域特徵、時-頻域特徵、網絡連結特徵等。

本次課程主要介紹時域及頻域特徵之基本概念，分述如下：

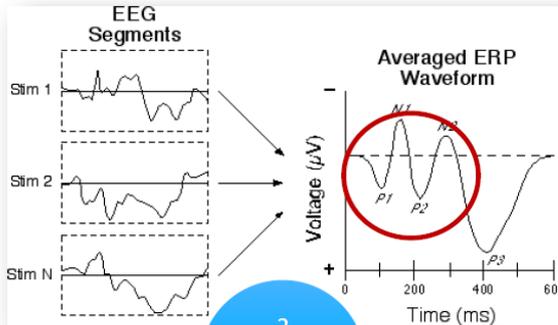
- 時域特徵 (temporal features)

此種方式係利用疊加技術，將駕駛員在特定時間進行之認知作業時之大腦電位活動提取出事件相關電位 (event-related potentials, ERP)。事件關聯電位為一種藉電生理測量來研究人類大腦如何處理外界訊息之技術，其測量的標的是當特定刺激於特定時間出現後，如運具系統在某時刻發出告警音後，人類對此刺激之腦波反應的紀錄。

一般而言，事件關聯電位資料之獲得，是將多次相同刺激或嘗試呈現後受測人員對此刺激之腦波反應數據進行平均計算後而得。透過測量受試人員對不同刺激之腦波反應，可增進瞭解人員對刺激處理之認知歷程。其中，早期波 (early waves) 與晚期波 (later waves) 是事件關聯電位作業中之主要組成部分。

早期波是指刺激出現 100 毫秒至 200 毫秒間之波形，其意涵是人類對刺激在感知覺早期處理之反應。早期波通常反映受測人員對刺激之物理特徵，如形狀、顏色、音調等處理。例如，P1 波是受測人員看到視覺刺激後約 100 毫秒左右出現之波型。晚期波則是指刺激出現後 300 毫秒至 800 毫秒間之波形，反映受測人員對刺激進行更高層次之認知處理。例如，P300 波通常反映受測人員對刺激投注一定之注意力或進行更高階之認知處理 (圖 3-26)。

Temporal features: e.g. event-related potentials (ERPs)



- Very small voltages in response to specific events/stimuli (Blackwood & Muir, 1990).
- EEG changes that are **time locked** to sensory, motor or cognitive events (Sur & Sinha, 2009).
- **Averaging** of many trials → reduce noise & reveal only the event-related activity. **Latency & amplitude.**

2
categories
(Sur & Sinha,
2009):

Early waves (first 100 milliseconds): 'sensory' or 'exogenous', depend largely on the physical parameters of the stimulus.

Later waves: 'cognitive' or 'endogenous', reflect the manner in which the subject evaluates the stimulus

ISAE-SUPAERO 2019 23

圖 3-26 腦波之時域分析

在運輸人因領域，當想釐清駕駛員在運具操作過程未對告警做出處置之原因，則可應用事件關聯電位資料進行推論。若駕駛員在告警出現後僅顯示早期波，則可有相當證據指出駕駛員確實在感知覺層次有處理告警，故可初步排除因音量過低或配置不當等設計不良使其未偵測。此外，鑒於駕駛員只顯示早期波，未有其他和注意力相關之晚期波出現，此時則可納入多重作業、壓力、高心智作業負荷等認知識題作進一步分析。當然，若發現早、晚期波皆有顯示，但仍未見駕駛員有所作為，則協助排除一些如感知覺處理、分心或未投注認知資源於告警等因素，並協助導引至更後端之訊息處理，如決策與判斷等認知因素進行釐清與分析。

- 頻域特徵 (spectral features)

頻域特徵擷取，指的是將腦波訊號轉換為頻譜分析，以提取特定頻段相關特徵。一般而言，頻譜分析使用傅立葉轉換（Fourier Transform）來獲取訊號之頻域訊息。頻域訊息可分為不同頻段，如 delta 波（0.5-4 Hz）、theta 波（4-8 Hz）、alpha 波（8-13 Hz）、beta 波（15-30 Hz）和 gamma 波（>30Hz）等，如圖 3-27 所示。

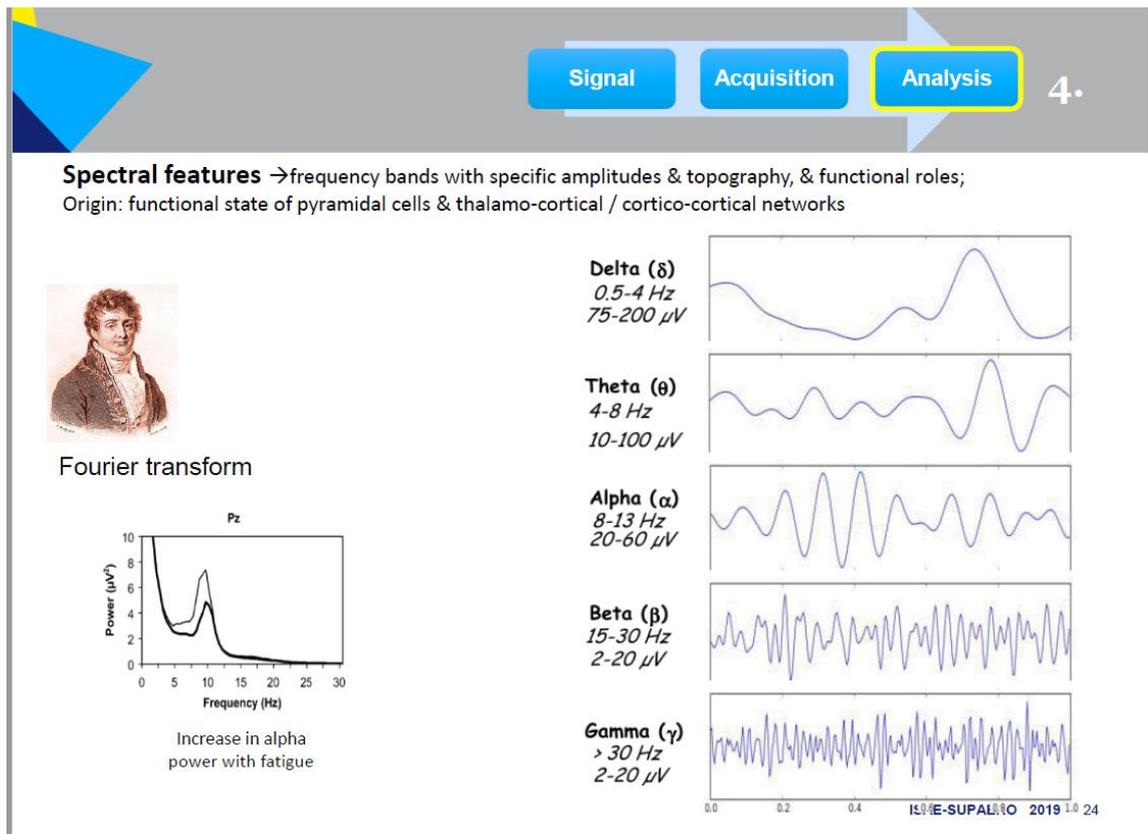


圖 3-27 腦波之頻域分析

如同時域分析在運輸人因之應用，頻域分析亦可提供駕駛員於不同頻段腦波特徵及其與認知與行為之關聯性資料。例如，theta 波主要和駕駛員專注及作業投入程度有關；beta 波與清醒與警覺程度相關；alpha 波則與放鬆、疲勞程度有關。當大腦未在處理與作業相關之內容時會進入所謂的預設模式（default mode），此時在腦波頻譜上亦可見明顯的 alpha 功率的上升。

以正副駕駛員於模擬機執行起飛作業為例，副駕駛員由於擔任監控駕駛員（PNF），於起飛階段須檢查諸多駕駛艙儀表狀態，接收大量視覺輸入，故相對於正駕駛員，其在大腦頂葉與枕葉出之出現顯著之 **theta** 波；隨著應執行之作業項目增加，亦可在副駕駛員之額葉發現明顯之 **theta** 波出現，如圖 3-28 所示。

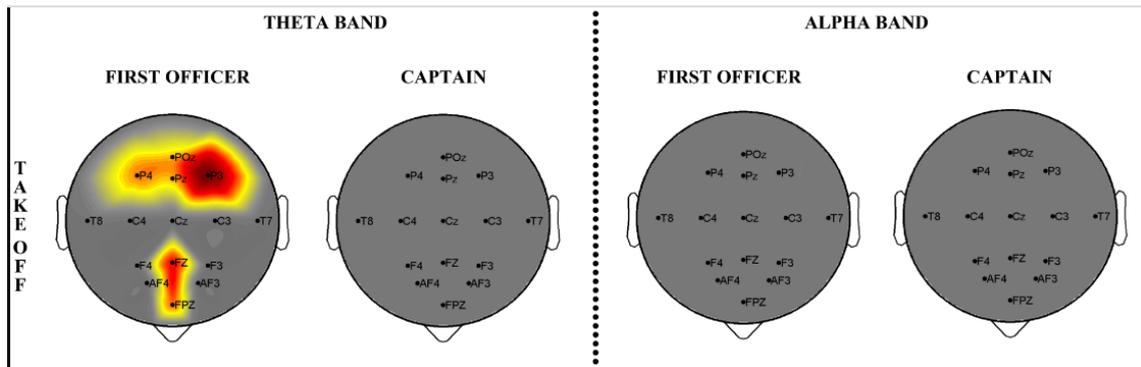


圖 3-28 副駕駛員於起飛作業之腦波頻域分析

腦波實作練習

本次課程實作階段，講師提供 8 頻道無線乾式電極腦波系統讓學員練習腦波儀之操作，並以 EEGLab 軟體進行資料處理與分析。本次練習由本會參訓人員擔任受測人員，配戴腦波儀進行數字心算與閉眼放鬆作業（圖 3-29），並在資料蒐集與另一學員共同完成資料處理與分析，其中頻域分析結果顯示：本會人員在執行完心算作業後，於閉眼放鬆階段顯示明顯之 **alpha** 功率，對照當時生理上尚因處於時差調整而處於疲勞狀態確實相符。另一值得注意的是：圖 3-29 顯示之頻域特徵亦可見 **beta** 波功率亦有上升之情形。比對當時內在心智狀態雖處於閉眼放鬆階段，但仍未完全停止回想心算階段表現情形之思考活動，因此，**beta** 波功率之上升提供了本會參訓人員於放鬆階段未停止內在思考活動之客觀證據。



圖 3-29 本會人員腦波實作練習成果

5. 大腦近紅外光血氧監測（near infrared spectroscopy, NIRS）

基本概念

近紅外光血氧監測，是一種基於光學影像原理（light imaging），透過安裝在受測人員頭部之紅外線發射器（light source）和接收器（light detector）（圖 3-30），測量紅外光在腦組織中之吸收和散射情形，據此計算大腦不同區域之血氧濃度變化，進而推測人員在執行某項作業或操作時之大腦神經活動，如所圖 3-31 示。由於近紅外光血氧監測技術具有非侵入性、易操作、可即時監測、且不受駕駛艙環境佈滿電磁波干擾訊號影響、或較不受到人員頭部動作干擾訊號影響等優勢，在認知神經人因工程與運輸人因領域越受重視且被使用。



圖 3-30 近紅外光血氧監測設備圖

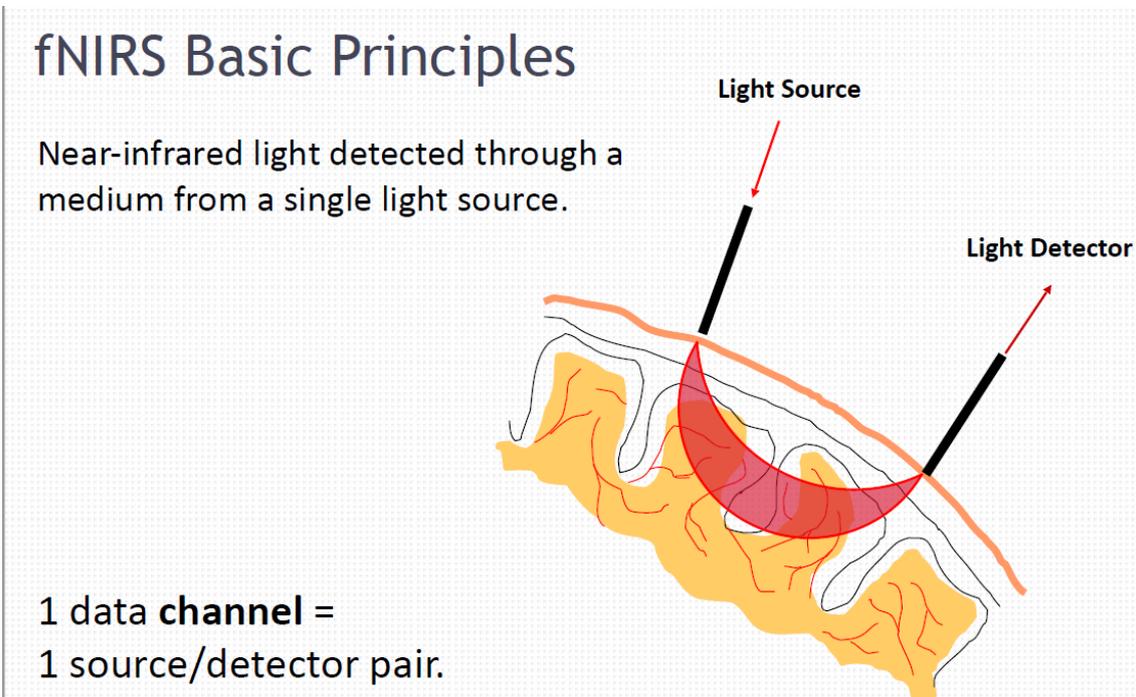


圖 3-31 近紅外光血氧監測基本原理

進一步而論，近紅外光血氧監測技術著重在對血液中血紅素之分析。血紅素為紅血球主要成分，佔紅血球 90%，又稱之血紅蛋白（Hemoglobin, Hb），負責運輸氧氣和二氧化碳。當人員從事作業或操作時，大腦會同步產生神經電生理活動，致該區域氧氣與葡萄糖代謝增加，使局部腦血流量增加而產生帶氧血紅素（oxy-hemoglobin）增加、去氧血紅素（deoxy-hemoglobin）下降之現象。近紅外光血氧監測技術則是利用帶氧血紅素與去氧血紅素對不同紅外光波長之不同吸收特性，並轉換為濃度比值（delta concentration）來反映人員作業時之腦部血氧變化（圖 3-32），作為人員經驗不同心智作業負荷程度等資料推測依據。

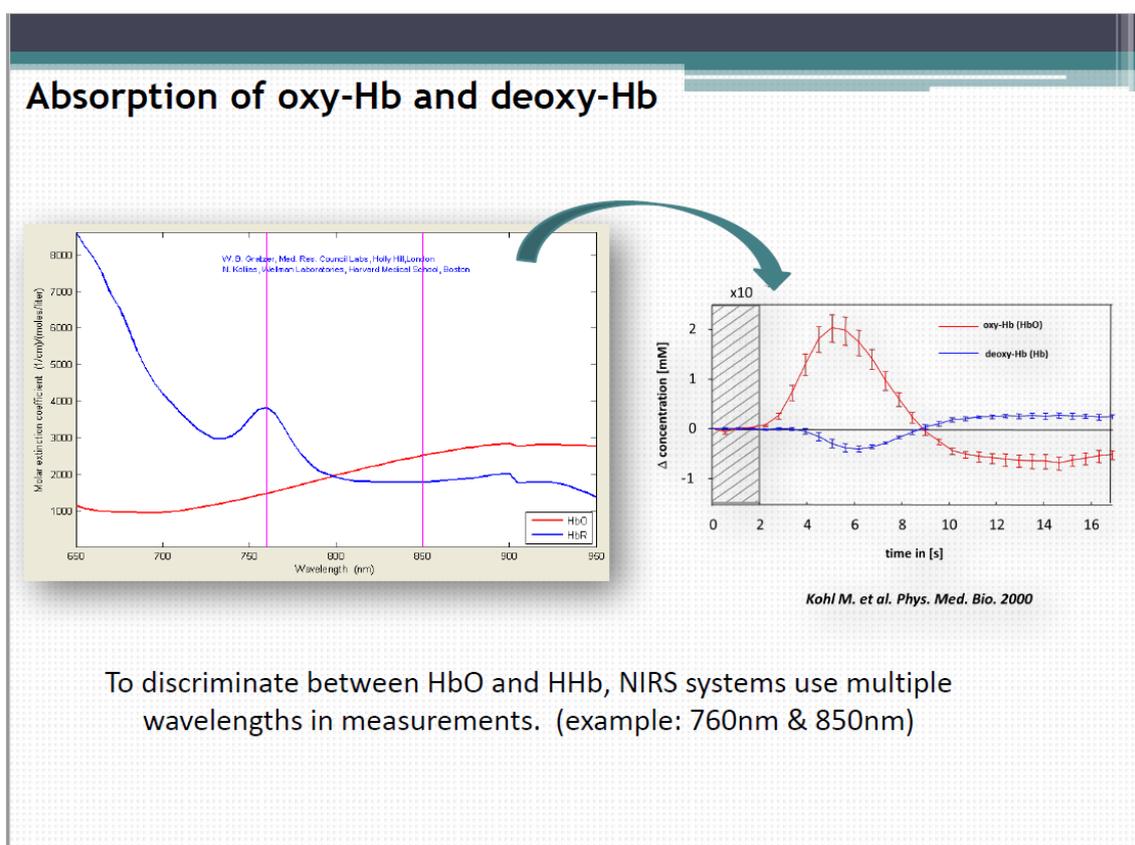


圖 3-32 近紅外光血氧監測運作機制

近紅外光血氧監測儀操作

如同腦波儀之操作與設置，近紅外光血氧監測儀亦有類似腦波電極帽之配件讓受測人員配戴。講師提到：受測人員配戴近紅外光血氧監測帽時，須確認有符合國際腦波學會公布之 10-20 系統標記位置，且在配戴後應確認紅外線發射器與接收器有良好接觸於頭部，才能正確量測大腦血氧濃度變化值。

不過，在訊號偵測上則有別於腦波使用電極間之電位差方式，而是使用近紅外線發射器 (light source) 和接收器 (light detector) 所組成之頻道蒐集腦部血氧活動訊號。實務上配置發射器與接收器以 3 公分間距為原則，以取得近紅外光照射最大深度，並使近紅外光不因過度散射致後續資料分析難以定位特定腦區活動 (圖 3-33)。

fNIRS Basic Principles

fNIRS functional images: Topography

- Uses a 'fixed-distance' measurement.
 - Generally 3cm to maximize depth of penetration
- Functional neural activation image without depth discrimination
- Spatial resolution ~1.5-2cm

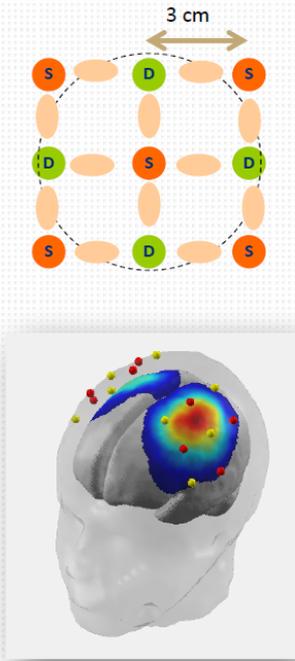
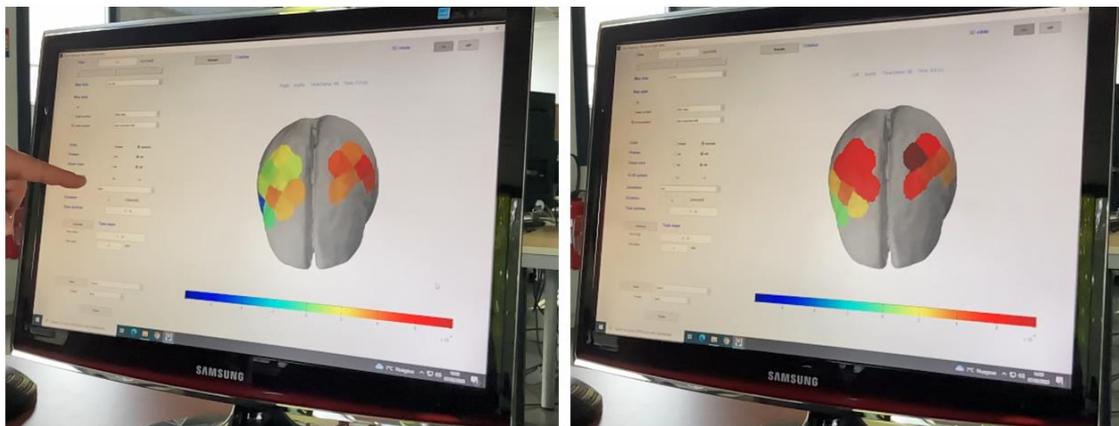


圖 3-33 近紅外線發射與接收器之空間配置

近紅外光血氧監測儀實作練習

本次課程實作階段，講師以 NIRSPort 近紅外光血氧監測儀進行實際演示，讓學員瞭解儀器操作過程，並以專用軟體進行資料分析。本次演示之 NIRSPort 儀器是由 8 個近紅外線發射器與 8 個接收器組成之頻道來蒐集受測人員腦部血氧活動訊號，發射器與接收器皆為乾式感測器，不須打膠且攜帶方便，相當便於實務場域使用。講師邀請 1 位慣用右手之學員擔任受測（圖 3-30），學員配戴近紅外光血氧監測帽後執行一項動作作業（finger tapping），作業完成後由講師操作專用軟體，分析受測人員執行動作時之腦部血氧訊號。

資料分析結果顯示：學員使用右手執行動作作業時，可在左側大腦運動皮質區觀察到明顯之血氧訊號變化。然而，當其改以左手執行操作時，則可發現血氧訊號變化同時出現在雙側大腦運動皮質區；此項實作練習結果和神經科學對人類腦功能側化（functional lateralization）與動作執行相關研究發現一致。



右手執行作業時之大腦血氧變化

左手執行作業時之大腦血氧變化

圖 3-33 近紅外光血氧監測儀實作練習成果

近紅外光血氧監測技術於運輸人因之應用

近紅外光血氧監測技術因具備非侵入性、攜帶與操作方便、即時資料紀錄等多項優勢，至今已廣為應用至不同領域，包括用於瞭解人員認知與情緒狀態、溝通與合作等社會互動行為、動作操作與執行、自然真實情境下之行為等方面，以及各式精神與神經系統疾病之症狀學研究，如圖 3-34 所示。當然，此技術亦廣為應用在認知神經人因工程與運輸人因領域。以下舉一駕駛員飛航操作應用例子。

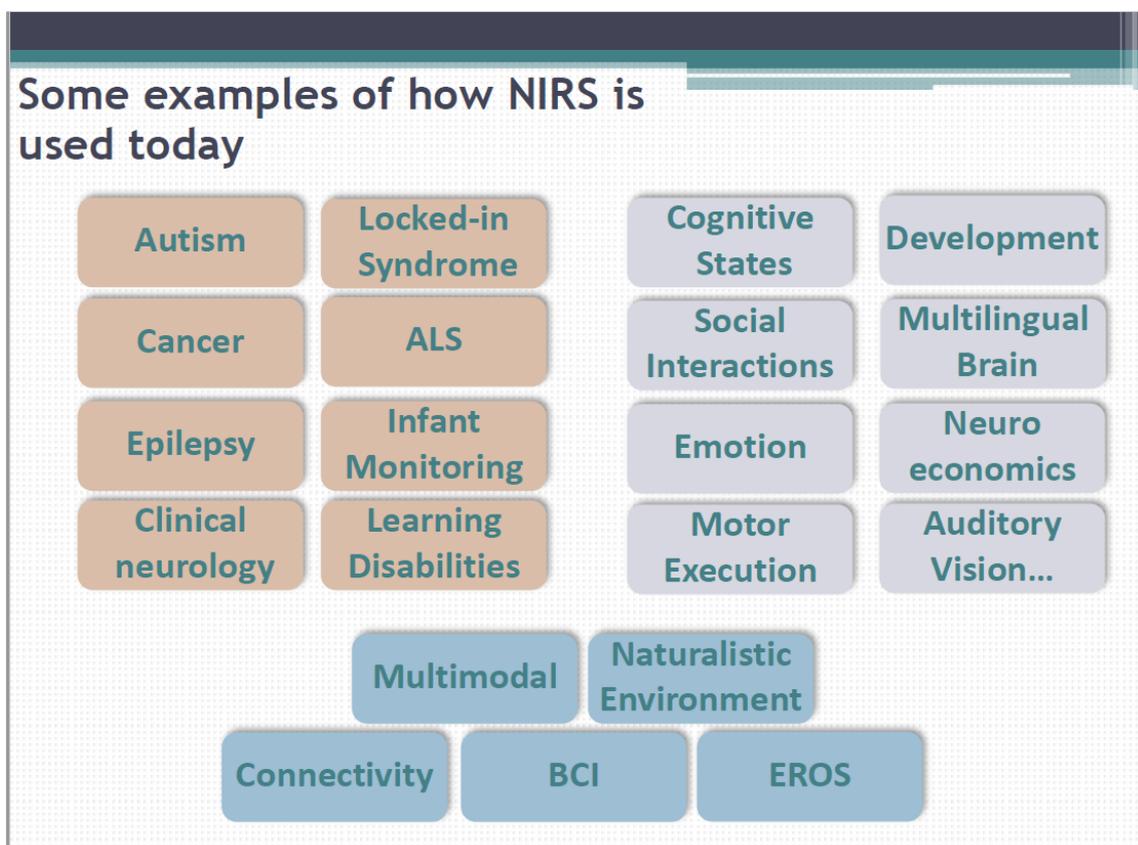


圖 3-34 近紅外光血氧監測技術應用領域

法國國立高等航太工程學院（ISAE SUPAERO）邀請 26 位自訓駕駛員（平均飛時 53 小時）參加一項 A300 型動態模擬機之飛航操作試驗，包括兩種不同難度降落作業；一種為能見度良好且無側風之降落（低難度）、另一種為密雲、強側風降落

情境(高難度)。駕駛員於模擬機執行降落過程配戴由 4 個近紅外線發射器與 10 個接收器組成之 16 頻道近紅外光血氧監測儀蒐集其腦部血氧活動訊號，如圖 3-35 所示。

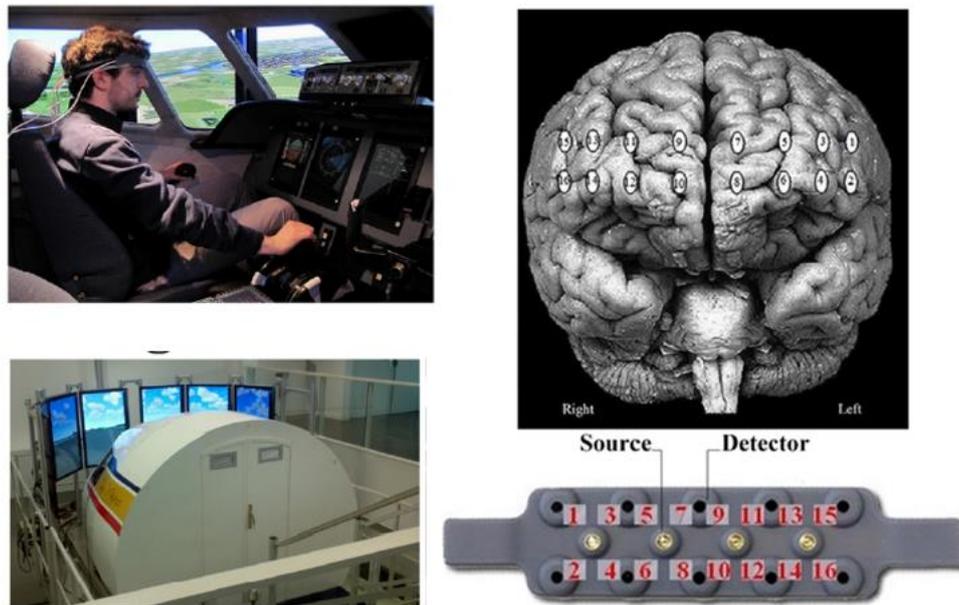


圖 3-35 16 頻道近紅外光血氧監測儀之訊號配置

試驗結果發現(圖 3-36)：駕駛員於高難度降落作業，其在帶氧血紅素之增加量顯著高於低難度之降落作業；此外，相較於 final approach，駕駛員於 short final 之帶氧血紅素濃度顯著更高，且主要在高層次認知處理相關之右側背外側前額葉區域。對照駕駛員於 NASA-TLX 評估之心智作業負荷程度及預設飛航軌跡之偏離幅度，駕駛員隨著心智作業負荷程度越高，須投注更多認知資源處理當前作業情境與需要，大腦前額葉亦更高度之運作。

因此，近紅外光血氧監測技術可作為駕駛員心智作業負荷程度之重要生理指標，未來結合機器學習等資料科學技術，將可進一步線上即時提供駕駛員心智負荷數據，再透過整合至自動化系統或主被動告警設計，應能有效提升駕駛員人為績效及安

全操作表現。

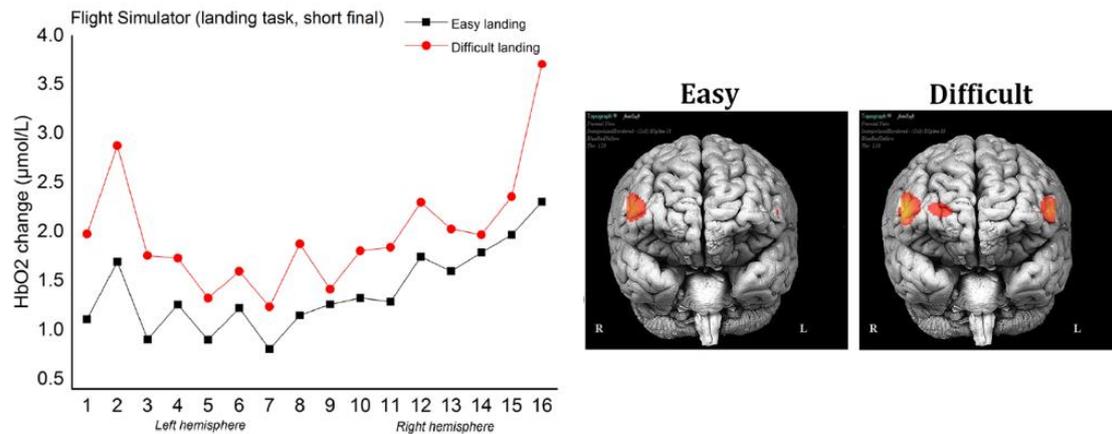


圖 3-36 近紅外光血氧監測技術於飛航領域之應用結果

6. 實驗設計與倫理

本次課程除介紹四項駕駛員生理狀態分析技術及其於認知人因與運輸安全應用之實例，亦介紹實驗設計方法與研究倫理，以讓學員對於實驗設計基本架構與倫理有基本認識。本會雖非科學研究專責機關，但在事故調查執行測試與研究時，若有應用認知神經人因工程技術釐清駕駛員操作與人為錯誤議題時，實驗設計與倫理相關概念仍有其參考價值。因此，以下摘要本次課程在實驗設計與倫理之重點。

實驗設計

實驗設計第一步在於提出符合科學化之研究問題（scientific question），問題本身應包括以下基本要素：

- 提出問題應簡要、明確（simple and precise）
- 提出之問題應可被回答（real answers）

- 可用實驗或其他方式驗證（testable）

舉例來說，「某項告警是否可縮短駕駛員在操作上之反應時間」，比「某項告警是否對駕駛員有助益」來得更為明確、且可被驗證。

實驗設計第二步在於將科學問題轉換為研究假設。研究假設應包含獨變項與依變項，其中獨變項應設計為可被操弄（manipulated）或可被比較（compared），依變項應可被測量（measurable）。以「A 型機翼是否比 B 型機翼穩定性更高」為例，此研究假設已包含兩種機型比較之獨變項，以及可被量化為依變項之穩定性指標。

有關研究變項，亦應考量其他可能影響獨變項對依變項之影響的變項，如混淆變項。混淆變項通常與獨變項相關，故也同時影響依變項之改變。以「A 型機翼比 B 型機翼穩定性更高」之研究結果為例，其中一項可能之混淆變項為機型。亦即，A 機型由於在設計上本身就比 B 機型穩定性更高，使得研究結果發現之 A 型機翼穩定性更高並非機翼設計不同，而是機型不同所致。

實驗設計之第三步，在於應掌握或使用隨機取樣（random sampling）、隨機分派（random assignment）、對抗平衡設計（counterbalance）等方式降低研究誤差。

- 隨機取樣是指從研究母群體中隨機選抽取樣本，以代表整個母群體。此種方法可減少樣本選擇偏差並提高樣本代表性。例如，為研究駕駛員受新冠肺炎疫情對身心健康之衝擊，可用隨機取樣方式，從國內幾家主要航空公司駕駛員族群中隨機選取一定數量之樣本，以獲得代表性之樣本進行研究。
- 隨機分派是指將受測人員隨機分派至不同實驗情境或組別，以確保各情境或組別在依變項之差異是由於獨變項之操弄或不同所致，而非其他因素所致。
- 對抗平衡設計，只要用在每位受測人員會先後接受不同的實驗情境，如圖 3-36 之飛航操作實驗，駕駛員會先後執行高難度或低難度之降落作業，為降低

其他因時序造成之影響，如熟悉性、疲勞等，每位駕駛員會被隨機分配至不同處理條件（高、低難度降落作業），以不同處理順序對於實驗結果（大腦血氧濃度變化、心智作業負荷）之影響。

研究倫理

研究倫理（ethics）係指執行研究過程中應遵守之道德標準及規範，包括受測人員之尊嚴與權益、確保研究執行過程具科學性與可靠性等。國際上常以赫爾辛基宣言（Declaration of Helsinki）作為人體研究之標準和原則，我國則訂定有人體研究法作為保障研究對象權益之法源依據。

依我國人體研究法，人體研究是指從事取得、調查、分析、運用人體檢體或個人之生物行為、生理、心理、遺傳、醫學等有關資訊之研究。研究執行過程應尊重研究對象之自主權，確保研究進行之風險與利益相平衡，對研究對象侵害最小，並兼顧研究負擔與成果之公平分配，以保障研究對象之權益。

本會雖非研究專責機關，惟在運輸事故調查中執行涉及駕駛員操作與認知人因議題之測試與研究，或執行運輸安全人因研究時，會涉及取得、調查與分析測試人員之生物行為、生理、心理等資訊，故建議仍應留意參加測試之駕駛等人員之權益與可能遭受之風險是否符合人體研究法相關規定。

肆、 建議

- 本次課程雖已涵蓋認知神經人因工程應用運輸安全領域之最新技術介紹，但受限課程時間短暫僅能觸及各項技術基礎概念；考量本會規劃 113 年起於科研計畫建置駕駛員生理行為分析系統，為精進同仁在特定技術，如駕駛員心跳變異率監測之專業知能，建議日後可派員參加國內、外相關研討會或專業訓練，

以提升本會同仁在駕駛員生理與行為狀態監測技術於運安研究及事故調查之應用能量。

- 本次課程從認知神經人因工程觀點，介紹駕駛員人為錯誤、訊息處理，以及大腦與生理運作機制之間關聯，助於本會調查技術人員對人為錯誤發生原因之理解與解釋；另本課程於眼動追蹤介紹相關學理與資料分析方法，以及推薦之參考書目亦對本會人員在解讀駕駛員眼動與認知有所幫助；建議可將相關內容納入本會建置之駕駛員知覺與認知調查指引手冊。
- 本次課程已見腦波、大腦血氧變化等腦功能監測設備可在模擬機，甚至運具駕駛艙等真實場域應用，顯示這些設備在軟硬體技術已逐漸克服來自真實場域之限制，如駕駛員操作時之動作、駕駛艙電磁波等人員與環境干擾。鑒於駕駛員認知處理、行為及人為績效表現和其腦功能運作密切相關，建議未來可持續關注腦功能監測設備在國內運輸人因領域之發展，並評估本會與產、學界在技術交流與合作之可行性。

赴法國土魯斯參加認知人因工程訓練

服 務 機 關：國家運輸安全調查委員會

出 國 人 職 稱：運輸安全組調查官

姓 名：李苡星

出 國 地 區：法國

出 國 期 間：民國 112 年 2 月 4 日至 2 月 13 日

報 告 日 期：民國 112 年 4 月 25 日

建議事項：

	建議項目	處理
1	建議日後可持續派員參加國內、外認知神經人因工程研討會或專業訓練，以提升本會同仁在駕駛員生理與行為狀態監測技術於運安研究及事故調查之應用能量。	<input type="checkbox"/> 已採行 <input checked="" type="checkbox"/> 研議中 <input type="checkbox"/> 未採行
2	建議可將本次課程內容納入本會建置之駕駛員知覺與認知調查指引手冊，以提升本會調查技術人員執行運輸事故人因調查及運安研究時之專業知識與技能。	<input type="checkbox"/> 已採行 <input checked="" type="checkbox"/> 研議中 <input type="checkbox"/> 未採行

3	<p>考量駕駛員認知處理、行為及人為績效表現與腦功能運作密切相關，建議持續關注國內運輸人因領域在駕駛等人員腦功能監測技術之發展，並評估本會與產、學界在技術交流與合作之可行性。</p>	<input type="checkbox"/> 已採行 <input checked="" type="checkbox"/> 研議中 <input type="checkbox"/> 未採行
---	---	---