

眼球追蹤技術結合飛行訓練之可行性初探：以T-34C初教機為例

游重山博士 蘇國璋博士 林伯鴻博士 王心靈博士

提 要

本研究乃應用眼球追蹤儀(Eye Tracker)蒐錄飛行學員於T-34C模擬機操作「起落航線」課目之眼球活動(eye movements)資訊，於完成實驗前測後，提供受試者一位飛行教官同樣操作起落航線課目之眼動影片，做為學員心智飛行(mental flight)模擬時可揣摩教官看哪裏、如何看、何時看及如何修正等操作重點。於72小時後，再進行相同課目之眼動實驗後測，以比較前測與後測之飛行成績與狀況警覺績效(performance of situational awareness)，同時針對眼球追蹤技術結合飛行模擬機之先進飛訓模式，請受試者以學習者為中心填答相關問卷，並於完成實驗之後，賡續追蹤受試者在基本組的飛訓表現。研究發現受試學員前測與後測飛行成績與狀況警覺績效均有極顯著差異($p < 0.01$)；即由模訓組帶飛教官依據常態飛訓課次考評學員成績，發現後測比前測成績平均高出5分，而狀況警覺績效更從前測的43%進步到後測93%之合格率。若不計身體因素(體停)與意志因素(意停)停止飛訓之學員，則14位實驗組學員有84.5%(11/13)之單飛達成率；若與同班開訓但未參與眼動實驗之另外16位學員(對照組)比較，則實驗組之航線單飛達成率高過對照組69.2%(9/13)有15.4%之多。另不論實驗組或對照組，發現只要通過航線單飛考核的，均能完成基本組訓練；換言之，若要提高基本組完訓率，則應置重點在如何提高學員航線單飛的達成率。而有關眼球追蹤技術結合飛行訓練之先進構想，14位極資淺飛行學員與另一眼動研究案之8位正換裝勇鷹號的資深飛行學員(平均飛行總時數近1,700小時)比較，持正面肯定看法實不謀而合。因此，研究結果顯示飛行模擬機訓練若能與眼球追蹤科技結合，除可提高學員習飛信心與成效，對降低意停與技停機率進而通過航線單飛考核與完成基本組訓練均有實質效益。

前 言

空軍飛行訓練指揮部基本組之「航線單飛」對空軍飛行員而言，雖只是飛行生涯的一小步，卻是檢視飛行學員是否具

備獨力操作初級教練機之能力的重要考核；亦即「起落航線」是決定學員能否繼續飛訓的關鍵課目。故「航線單飛」考核前的飛訓階段，向來是飛行初學者首次感到操作節奏快速、心理負荷增大、壓力指

數提高之時。此階段若要突破學習瓶頸，除了飛行教官的適性教導與傾囊相授外，學員須將教官在空中的教學、指正與地面的歸詢講解加以有系統、按程序具體化與圖像化，並且透過持恆反覆的心智飛行與應用模擬機驗證練習後，方能在空中經由大腦認知系統快速處理、有效整合座艙內外複雜的動態資訊，以適時、適量反應在當下飛機狀態之敏銳感知、迅速理解、預判軌跡與提前量修正的操作過程中；若能如此，則學員通過首次航線單飛考核不遠矣。因此，學員若能理解教官操作飛行課目時的思考重點，進而仿效教官的操作模式，則可預期學員在既定的標準操作程序、有限的航線空間及快速推進的時間軸上，按著ETCA原則掌握飛機動態，如此應可展現出良好的學習績效(註：Establish建立姿態、Trim調整姿態、Cross-check交互檢查、Adjust校正姿態)。基於上述飛訓觀點，本研究乃將航線單飛考核前的飛訓階段做為實驗背景，並導入眼球追蹤科技至飛行模擬訓練，以觀察學員參與實驗後之航線單飛達成率與基本組完訓比例，進而探討眼球追蹤科技結合模擬機訓練模式之可行性。

文獻探討

人類對周遭事物之注意力投射、分配與聚焦程度等，往往可從眼睛注視的位置、次數、頻率與時間長短等予以觀察並理解，若再經由當事人的外在反應與回饋行為來加以核對，則更能明白其注視的目

標之吸引強度、理解程度，以及相對應之判斷與決策。因此，眼球追蹤技術已廣泛應用於廣告行銷(Simmonds et al., 2020)、網頁設計(Liu et al., 2021)、人機介面(Li et al., 2022)、醫學教學(Katz et al., 2019)、航空安全(Behrend and Dehais, 2020)、消防搶救(Mossberg et al., 2021)、核安監控(Yan et al., 2017)、高鐵駕訓(Deng et al., 2020)、運動科學(Wang et al., 2022)、刑事現場鑑識(Chang and Tsai, 2022)等等領域之研究。由於透過記錄眼球運動(eye movement)的訊息，可評估受試者的刺激、察覺、領悟(Pinheiro et al, 2016；Li et al, 2016)，藉此給予適時的導正以達事半功倍的學習效果，故眼球追蹤技術對改善教學策略和提升學習績效具有顯著效益(Martinez-Marquez et al., 2021)。此外，眼球運動具有連續、真實與客觀性，透過眼動儀器在不中斷、不干擾受試者操作活動下進行自然蒐錄，可做為飛行決策(aeronautical decision making)之前哨--狀況警覺績效之觀察視窗。故應用眼球追蹤技術以探索飛行員訊息處理與認知決策行為之研究至為普遍(Peisl et al., 2018；Kuo et al., 2009；Ahlstrom and Friedman-Berg, 2006；Wiggins, 2006)。

由於人類眼睛的物理結構，大多數的視覺資訊都是從中央眼凹(fovea)精確提供，眼動追蹤系統僅記錄中央眼凹約2°視角(Wickens and Hollands, 2021)，離開中央眼凹愈遠，則感知的資訊就愈模糊，故人類為看清楚中央眼凹以外目標

物，會藉由頭部上下左右之調整配合得到清楚確認(Manhartsberger and Zellhofer, 2005)，否則僅能應用週邊視覺(peripheral vision)做非精確性或概略性的感知。儘管Shinar(2008)曾以「look but didn't see (視而不見)」形容眼動儀器記錄的注視點，有時不一定是注意力投射之處，單靠眼球追蹤技術是無法清楚確認的。Shinar觀察到的，確實是目前眼動科技亟待克服之處，但由於人類注意力多落在中央眼凹的區域，而此區域正是眼球追蹤記錄之處，故記錄得到的眼動資訊數值仍有其可茲參考的學理基礎。事實上，據研究顯示，資深的飛行員比資淺的飛行員更多使用週邊視覺(眼睛餘光)來獲取環境線索與監管飛行動態；即經驗豐富的飛行員雖正操作主要任務，於此同時，仍能兼顧週邊動態(Kasarskis et al., 2001)。故眼球追蹤技術亦有應用於攸關飛行安全之注意力窄化(channelized attention)議題上(Mumaw and Billman, 2023)。

飛行員操作飛機之依據，包括機內儀表數據、機外環境動態與管制單位指令等，而這些飛行必要資訊多數經由視覺掃描得之。飛行所需資訊之獲得、整合與應用，不論是經由內在主動與計畫性作為的「由上而下(top-down)」選擇性注意力(selective attention)之視覺掃描行為或是被外界突然動態吸引的「由下而上(bottom-up)」非計畫性注意力轉移之投射模式，在飛行員按程序、具系統的操作內容與資訊擷取過程中均隨處可見；故飛行操作

績效之展現首重視覺注意力分配與整合(Peisl et al., 2018)。眼球追蹤技術所記錄下來的眼動影片，多是透過眼動儀器附屬的分析軟體，先就研究者欲觀察的區域或儀表進行若干AOIs(area of interested)劃分與標示，再以自動或手動比對(mapping)進行影片分析與記錄受試者在各個AOI內的眼動參數之數值；例如凝視點(fixation)多寡、凝視時間(fixation duration)多長、從凝視點A跳至凝視點B之視跳(saccade)的速度、距離等等。而各眼動參數均有其背後操作意義，亦是諸多眼動研究者經常探討並賦予操作意義之標的。例如凝視次數(fixation count)與視覺注意力停留在具有訊息意義或感興趣的區塊上具關聯性(Salvucci and Goldberg, 2000)，可就此內涵推論受試者的注意力投射與分佈狀況(Johnson and Proctor, 2004；Yu et al., 2014)；而視跳時間(saccade duration)是凝視點之間快速移動所需的時間(Rognin et al., 2004)，就Rognin等人(2004)研究，發現視跳時間愈短，心智負荷程度愈高。然而，美國太空總署之研究指出飛行眼動資訊在解讀或應用上必須嚴謹看待，不能單一認定，而要多方整合與交互確認；例如凝視點並不一定是注意力焦點，因維持15分鐘以上的注意力後，內在認知負荷增加，可能產生眼球追蹤記錄到凝視點在某儀表上，但實際上，其內在注意力已渙散，伴隨而來的是狀況警覺績效降低(Randall and Dorrit, 2023)。

就已發表或出版的文獻資料，學術

界對眼球追蹤技術應用在飛行訓練是樂觀以對的，除有助於了解飛行學員操作當下之視覺注意力分佈，對課目結束後之任務歸詢或優缺講解，眼球追蹤影音記錄可做為教官講解與學員檢討改進之最佳與客觀教材(Skvarekova et al., 2020；Ryffel et al., 2019；Yu et al., 2016)。然而，對於飛行眼動參數統計樣態(statistical pattern)與操作意義雖有諸多研究論述，但對眼球追蹤技術之應用多流於概念性建議，至於如何將眼球追蹤技術與實際飛行訓練結合，或以飛行學員角度評估此眼動科技對習飛者助益程度之研究至為罕見；故本實驗設計即是針對這些不足之處加以改進，並就研究結果提出具體可行的建議。

研究方法

本案為空軍軍官學校(航空管理學系)向國防部(軍備局)提出之研究需求，並核准由國立高雄科技大學所組團隊執行之「國防先進科技研究計畫-空軍新型教練機編成轉換訓練之人因工程輔助系統建置案」，計畫編號：146. 計畫期程111-113年」，置重點於未來勇鷹號高級教練機全面取代F-5E/F與AT-3後之「三階段二機種」全新飛訓模式之有關飛航人因工程研究，故首以T-34C初級教練機為前置研究標的，以循序銜接進入勇鷹號高級教練機之後續研究。本研究除應用眼球追蹤技術之儀器蒐集客觀眼動資訊與評量狀況警覺績效外，亦採用主觀問卷調查與後續績效追蹤(follow up)等方法，以對應用眼動科

技結合飛行訓練之可行性探討更具體化，相關研究方法詳述如后。

一、受試者

志願參與本研究之受試者包括T-34C飛行教官3位(飛行老師、中校教官與上尉教官各1位)及基本組某年某班之飛行學員12位(男性11位、女性1位)。為能配合實驗情節想定，12位學員必須已通過第10課交互帶飛考核並預備進入第11課者，即起落航線單飛考核前之階段，以儘量排除飛行企圖心薄弱及未能適應三度空間動態等可能影響實驗結果之因素。

二、實驗裝備

(一)模訓組之T-34C模擬機。

(二)眼球追蹤儀(含分析軟體)：採用瑞典製「Tobii Pro Glasses 3」穿戴式眼鏡型眼球追蹤儀(eye tracker)，重量與一般眼鏡相同(約75公克)，不會影響飛行操作(如圖1)；取樣頻率為100Hz(註：每秒可擷取100個畫面，意即每10毫秒取一筆視覺數據)，並且以停留在目標物件上超過60毫秒定義為一凝視點(fixation)。

三、實驗情節

(一)正常航線操作

本研究以實際飛訓內容為主並配合正常進度，以使實驗與真實狀況結合，故以岡山基地36跑道起落航線操作為實驗情節(如圖2)。操作概要為：

- 1.進跑道後，按程序執行起飛前檢查；
- 2.起飛後爬升至1500呎改平並加入外三邊；



圖1 「Tobii Pro Glasses 3」可攜式眼鏡型眼球追蹤儀



9.操作第二次落地程序即全停結束實驗情節。

全程皆依飛行教範相關數據操作，並力求與平時飛訓相同，口誦所有動作、程序與檢查項目。

(二)狀況警覺考驗

於前測與後測之「起飛」或「五邊」設定「起落架狀態指示斜紋(未收妥當或未放妥當)」，以觀察飛行學員有無確遵「心到、口到、眼到、手到」之外型檢查原則。

四、回饋問卷

本研究以使用李克特選項(Likert item)之五項回應等級設計封閉式問卷二題，期以「飛行學員為中心」蒐集眼球追蹤科技應用在飛行訓練之主觀評量，問卷題目如下：

(一)「眼球追蹤儀」收錄的眼球資訊影片，若能應用於飛行訓練，例如落地後任務歸詢，有助於提升教與學的效果嗎？

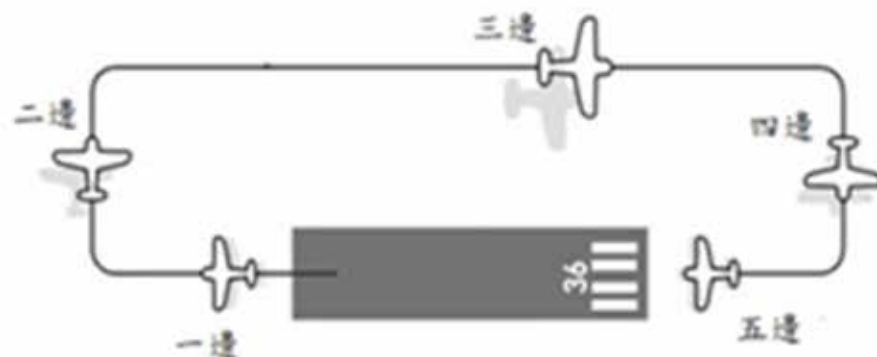
☐完全無助益 ☐沒有助益 ☐還好
☐有助益 ☐非常有助益

(二)若「眼球追蹤儀」能與飛行模擬機結合，對提升訓練成效之效果如何？

☐完全沒幫助 ☐沒有幫助 ☐還好
☐有幫助 ☐非常有幫助

- 3.依進場程序至楠梓IP點右轉進入本場高一邊，同時下降高度至1000呎衝場；
- 4.於AT-3停機坪上空解散，轉入航線內三邊，執行落地各項外型準備；
- 5.跑道於4點半位置時鬆機頭、壓坡度、收油門下滑轉彎；
- 6.轉進四邊後檢查外型並以無線電呼叫塔台申請「Touch-and-Go」落地；
- 7.攔截五邊1哩300呎之下滑道，進而仰轉與落地操作；
- 8.完成落地操作後，加滿油門再起飛，於18跑道頭上空操作Close加入內三邊；

圖2 起落航線示意圖



五、實驗程序

(一)飛行學員均遵循以下程序，約40分鐘可完成。

1.研究者朗讀實驗說明，以簡要介紹實驗目的與實驗過程後，由受試者簽署參與實驗同意書(約2分鐘)。

2.填寫個人基本資料，含受試者編號、階級、職稱、年齡、性別、教育程度、主要機型、主機種時數、總飛行時數(約3分鐘)。

3.受試者坐進模擬機配戴眼球追蹤儀，進行凝視點焦聚校準(約5分鐘)。

4.受試者操作既定的實驗情節(約10分鐘)。

5.受試學員完成實驗後，由模訓組教官如常考核學員整體飛訓成績及狀況警覺績效後做歸詢與講解，並給學員觀看與比較自己及飛行教官之眼動影片(約20分鐘)。

(二)受試學員之「前測」：均安排在週五下午實施，之後受試學員必須以教官眼動影片做為學習模擬教具，並與平日準備飛訓相同，利用接下來的週六或週日到模訓組做自主訓練一架次，於完成自主訓練後輸出航跡圖，在週一下午進行「後測」時，交給模訓組帶飛教官暨研究助理做為佐證。

(三)受試學員之「後測」：均在週五完成「前測」後第三日之週一進行，程序如下：

1.學員坐在模擬機內配戴眼球追蹤儀，進行凝視點焦聚校準(約5分鐘)。

2.學員操作既定的實驗情節(約10分鐘)。

3.學員完成實驗後，填寫回饋問卷(約2分鐘)。

(四)飛行教官僅填寫個人基本資料與蒐錄操作實驗情節之眼動影片。

研究結果

從三位飛行教官的眼動影片篩選出一位口誦各程序、檢查項目與地標參考點等最清楚明白的，以做為受試學員前測後之模擬飛行與學習揣摩依據。而為提高飛行績效評分之理解度與易讀性，於實驗時，即請模訓組帶飛教官將平時飛行訓練五級評分轉換成滿分100分。

一、前測與後測之成績

表1 前測與後測之差異t檢定(N=14)

向度	平均值 (標準差)		自由度	t	p	效果量 (d)
	前測	後測				
飛行操作成績	75.71(5.37)	81(3.68)	13	-5.36	0.000	-1.17
狀況警覺績效	0.43(0.51)	0.93(0.27)	13	-3.61	0.003	-1.28

以相依樣本t檢定分析發現，受試學員前測與後測飛行操作成績平均值有極顯著差異， $t(13)=-5.36$ ， $p<0.001$ ， $d=-1.17$ ；而前測與後測之狀況警覺績效亦有極顯著差異， $t(13)=-3.61$ ， $p<0.01$ ， $d=-1.28$ (如表1)。前後測統計差異敘述如下。

(一)前測

受試學員之前測平均飛行操作成績75.71分(SD=5.37)，其中6位通過狀況警覺績效考核者之平均飛行操作成績78.33分(SD=1.75)，另8位未通過狀況警

覺績效考核之平均飛行操作成績73.75分(SD=6.41)；亦即前測之狀況警覺考核通過率為43%。

(二)後測

受試學員之後測平均飛行操作成績81分(SD=3.68)，其中13位通過狀況警覺績效考核之平均飛行操作成績81.46分(SD=3.38)，另1位未通過狀況警覺績效考核之飛行操作成績為75分；另後測之狀況警覺考核通過率為93%。

二、眼動熱像圖

圖3為學員於眼動前測實驗後，以教官眼動影片做為心智模擬飛行參考與練習揣摩後，再進行眼動後測實驗所得之眼動熱像分佈情形，經與教官眼動熱像比較後，有下列發現：

(一)起飛操作階段：學員在速度表注意力停留時間長，有交互檢查較慢的狀況。

(二)Close爬升轉彎操作階段：學員有埋首座艙與過度依賴狀態儀現象。

(三)三邊操作階段：學員有注意力分配凌亂無章法之現象。

(四)四邊操作階段：學員有依賴地標找跑道與檢查儀表較少之現象。

(五)五邊操作階段：學員以跑道接近率做為進場高度判斷的能力尚待加強。

三、問卷調查結果

14位受試學員均繳回問卷並做主觀判斷。

(一)第一題有關「眼球追蹤儀」收錄的眼球資訊影片應用於飛行訓練，認為對提升教與學的效果「有助益」者計11人，而回答「非常有助益」者計有3人。

(二)第二題有關「眼球追蹤儀」若能與飛行模擬機結合，認為對提升訓練成效覺得「還好」者1人；「有幫助」者8人，而回答「非常有幫助」者計有5人。

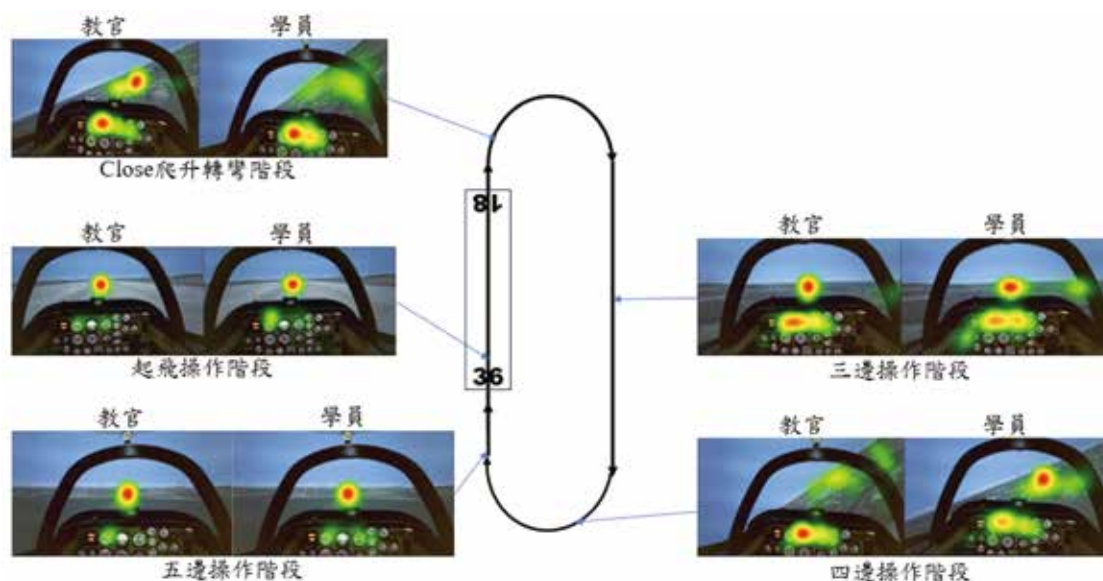


圖3 教官與學員於「起落航線」各操作階段之眼動熱像圖比較(高科大期末報告, 2023)

四、參與實驗學員之後續追蹤

眼動技術對學員在基本飛行訓練是否具有正面影響效果，則追蹤參與實驗之受試學員後來是否通過航線首單考核，甚至基本組完訓與否，應是可茲參考的指標。追蹤結果為14位參與實驗之學員，有1位身體狀況不符空勤要求及2位技術無法通過單飛考核而停訓。換言之，若不計身體因素停飛者，則有84.5%(11/13)通過技能考核完成航線單飛；而根據追蹤統計，只要有完成航線單飛者，最後亦全數通過基本組訓練(如表2)。

討 論

40年來，儘管空軍培育飛行員的初

級/高級教練機(如T-34C初級教練機取代中興號、AT-3高級教練機取代T-33A)、模擬機(如增設二維仿真互動之廣角螢幕)、飛行管理系統等硬體/軟體均因應裝備壽期、科技發展與訓練需求而更新，但飛行學員(生)將空中飛行操作時，教官指導糾正與機內外通話做全程錄音，以為落地後歸詢、教官講解及撰寫該架次心得講評單之主要參考的學習模式完全不變。

不論軍航或民航領域，隨著模擬飛行系統仿真度之提升，地面模訓的學習績效與空中術科的表現已具有緊密關聯，在最少成本達到最佳訓練效益的原則上，地面模擬訓練的角色是日益重要。然而，模訓裝備數量畢竟有限，對飛行學員而言，

表2 參與眼動實驗學員之測試成績與後續飛行績效追蹤

受試學員編號	前測成績	後測成績	前測狀況警覺	後測狀況警覺	航線單飛	基本組完訓
1	80	85	通過	通過	有	有
2	70	75	未過	未過	有	有
3	80	83	未過	通過	有	有
4	60	75	未過	通過	體停	
5	75	77	未過	通過	有	有
6	78	83	通過	通過	有	有
7	77	84	未過	通過	有	有
8	79	79	通過	通過	有	有
9	79	84	通過	通過	有	有
10	73	79	未過	通過	技停	
11	76	78	未過	通過	有	有
12	79	83	通過	通過	有	有
13	75	85	通過	通過	技停	
14	79	84	未過	通過	有	有
平均	76	81	通過率 43%	通過率 93%	若體停不計，則84.6% 單飛	通過單飛考核者，100% 完訓

更多時候是在模擬機教室以外，不論任何場地，多藉由心智飛行來強化操作程序、交互檢查、適時適量修正的熟練度。因此，本研究乃基於傳統習飛模式上，試將單純語音(飛行教學錄音)外，再增加教官在模擬機操作課目時所蒐錄的眼動影片，以為學員做心智飛行模擬時，可揣摩教官在操作岡山本場起落航線各階段程序時，究竟在看什麼、檢查什麼、參考什麼與如何修正(註：以教官在三邊操作的眼動影片截圖為例，學員可聽到、看到教官如何交互檢查與修正，如圖4)。這攸關飛行操作之ETCA原則可透過教官眼球追蹤影片，讓學員更加容易明白教官所云所指，同時掌握教官注意力投射重點。

經比較參與實驗學員之前測與後測飛行成績(如表2)，在與前測相隔72小時之後，再進行起落航線相同課目與狀況警覺績效實驗，模訓組帶飛教官給予學員的評量成績平均進步5分，而狀況警覺績效更從前測的43%進展到93%之合格率。此外，相較於已在國際期刊發表的飛行員眼動相關論文，本研究更擴充觀察時間，以



圖4 教官於航線三邊之機內外交互檢查示意圖
(高科大期末報告, 2023)

追蹤參與實驗的14位學員之後續飛行績效，即航線單飛考核在不計那位身體因素停止飛訓之學員，則有84.5%(11/13)之達成率；若與基本組同班受訓但未參與眼動實驗之另外16位學員(對照組)比較，則實驗組之航線單飛達成率高過對照組(69.2%)有15.4%之多。而從表3可發現，不論是實驗組或對照組，只要能通過航線單飛考核的，均能完成基本組訓練；換言之，若要提高基本組完訓率，則應置重點在如何提高學員通過航線單飛的達成率。

此外，因學員飛行意志不堅定而主動提出停訓之「意停」，其發生時間多為第十課(架次)之前；這也就是為何要律定參與本研究實驗之飛行學員的基本組飛訓進度必須是第11課開始之時，此即在於預先排除意志不堅之因素，而能單純聚焦在眼動科技導入飛行訓練是否對學員飛行技能有所助益之探討。而對於「意停」這種停訓類型，在某些意涵上應與「技停」有若干重疊，只差別於「意停」屬主動型停飛，但「技停」屬被動式停飛；即被評定技停者，無法在既定架次內達到單飛程度。所以，就表3所呈現的訊息，可看出「實驗組」沒有「意停」，而「對照組」有二位，且「實驗組」技停人數亦比「對照組」少，此是否意味著教官的眼動影片對「實驗組」學員產生某種程度的學習信心，而都願意繼續拼搏到最後的決定點。

再就參與實驗學員對「眼球追蹤儀」導入飛行訓練的主觀問卷結果觀之，對提升教與學的效果均持正面看法(11人

表3 參與實驗學員(實驗組)與未參與實驗學員(對照組)之飛行績效比較

組別	意停	體停	技停	航線單飛	基本組完訓	備考
實驗組 (N=14)	0	1	2	11/13=84.6%	11/11=100%	意停與體停均不列入計算
對照組 (N=16)	2	1	4	9/13=69.2%	9/9=100%	

回答「有助益」、3人回答「非常有助益」)；而對於「眼球追蹤儀」與飛行模擬機結合，使教官控制台上多一部觀察學員操作狀況的螢幕(如圖5)，以適時指正學員是否「心、眼、口、手」均到位的狀態，以提升訓練成效之看法，14位學員多持肯定看法(1人覺得「還好」、8人回答「有幫助」、5人認為「非常有幫助」)。以此14位學員的問卷調查結果，再就他們的飛行操作成績與單飛達成率觀之，眼球追蹤技術導入飛行訓練之概念確實是高度可行的。

此外，研究團隊配合勇鷹高級教練機換訓期程進行數位座艙介面之眼動研究時，亦對8位曾是F-5E/F飛行教官的換裝學員進行相同問題之調查，其結果是不謀而合。即眼動影片對提升教與學的效果之問題，計1人回答「還好」、7人回答「有

助益」；而對於眼球追蹤科技與飛行模擬機結合是否能提升飛訓成效之問題，計4人回答「有幫助」、4人認為「非常有幫助」。因此，不論是飛訓部基本組未首次航線單飛的飛行初學者，或是平均總飛行時數近1,700小時的資深換裝勇鷹號學員，對眼球追蹤技術應用在飛行訓練的構想均表認同的。

儘管眼球追蹤技術在過去15年已有顯著進步，可捕捉飛行員在某些重點時刻的凝視點、視跳與瞳孔收縮，且透過眼動資訊可分析飛行操作時之注意力分佈、注意力移轉(attention shift)、判斷、決策與心理負荷等認知狀況(Yu et al., 2016；Lu et al., 2021)，同時就實驗情節設計可察驗飛行員狀況警覺之感知、理解與反應三階段績效程度(Schwerd and Schulte, 2021；Yu et al., 2014)，但眼動技術仍有尚待突破之處。例如飛行員可在不移動眼球的情況下轉移注意力(Posner, 2016)，此即有關週邊視覺之應用，而此形態視覺行為尚無法被眼動技術偵知(Yu et al., 2016)。換句話說，即使在影片當中沒有記錄到凝視點，但透過飛行員的連續操作行為仍可判斷他/她有注意力在那區塊或AOI上，尤其若能配合口語複誦所檢查的標的物與所操作的動作或程序，則更能知道是否心、



圖5 眼球追蹤技術(虛線處)結合飛行模擬機之教官控制台示意圖(註：本圖為AT-3模擬機，原圖取自https://www.ncsist.org.tw/csistdup/products/product.aspx?product_Id=34&catalog=25)



眼、口、手均一致到位。故眼球追蹤技術與飛行模擬機之結合，不僅僅是為飛行學員在技能上精進，亦可建立個人良好飛行習慣與增進組員資源管理觀念，此均與飛行安全息息相關，在關鍵時刻可發揮其效益，例如E-2T與E-2K未伸放起落架即落地之飛安事件。此外，本研究團隊在研究過程中，亦發現具有抬頭顯示器(head-up display)的機型，對飛行員當下的凝視點是落在HUD的數位顯示面板上，亦或者聚焦是在座艙外，當前眼動技術仍未能達到即時辨識的程度，唯一能彌補這科技限制的，與前述相同，只能倚賴飛行員在操作模擬機之同時，亦複誦出眼睛檢視的項目或操作的動作。如此，不論是模擬機訓練現場的帶飛教官或實驗後做眼動影片分析的研究者，才能從影片得知飛行員真正的操作動機與目的。

結論與建議

就國際期刊已發表有關飛行眼動之研究，多在模擬機內進行眼動數據蒐集與分析(Li et al., 2019；Yu et al., 2016；Jungkunz and Darken, 2011；Sarter et al., 2007；Kasarskis et al., 2001)，僅有極少數在真實空中飛行時進行，且使用機型為一般民用輕航機(general aviation)，如Cessna 172 (Dehais et al., 2020, Ryffel et al., 2019)，研判原因可能是基於軍航的機敏性或配戴氧氣面罩時通話聲音不易收錄等。然而，就模擬機座艙內外之仿真程度已接近實機操作，故包括本實驗在內，多

數飛行眼動研究只要其實驗情節能符合實際操作課目內容，並且受試者均為飛行線上之飛行員或學員，則其研究結果仍具有相當程度之應用價值。

空軍飛行員之人力資源獲得極為不易乃眾所皆知。除個人意願強烈、家人同意支持、通過空勤體檢、合格學科成績之必要入學基本條件外，當進入飛行訓練後，尚有身體因素、心理意志與技能門檻等考驗，故最後能掛上飛鷹成為飛行員者，就國家總人口數而言，實可謂鳳毛麟角。此刻各級學校均正面臨少子化之衝擊影響，對空軍官校招募新血以蓄積優質飛行人力之挑戰勢必復加嚴峻，故就本研究成果，飛行模擬機訓練若能與眼動科技結合，判能提高學員習飛信心與成效，對降低意停與技停機率應有所助益，最終使完訓比例能符合預期需求。事實上，筆者於「2024第31屆中華民國人因工程學會年會暨國際學術研討會」中，從新加坡籍的亞洲人因工程與設計協會(Asia Council on Ergonomics and Design)理事長鄧教授得知，星國空軍考量地狹人稠、訓練空域不足之特殊地理環境，飛行學員在基本組第一階段均以模擬機結合眼動科技進行訓練數月，此期間亦有航空生理與航空心理專業協助綜合研判並篩選合格學員，再派赴澳洲進行第二階段之空中術科飛訓。據鄧理事長所述，此訓練模式之完訓率與本研究之「實驗組」相似。

由於眼球追蹤儀已設計輕巧如一般眼鏡重量，且為非侵入式之技術，對飛行

操作亦不會造成干擾影響或不適感，除了可提供模訓組教官即時觀察學員注意力分佈、狀況警覺與認知處理狀況，且可透過特別情境設計，從眼球追蹤設備觀察學員對不正常狀況之應處作為。然而，本實驗設計受限時間與實際飛訓進度，無法邀集更多飛行教官或學員參與，統計量難免不足，此為本研究最大限制因素。未來空軍官校(航空管理學系)或可就此相關議題結合飛行訓練指揮部課程，持續進行相關眼動實驗與研究，除可更多驗證眼球追蹤科技對提升飛訓品質之可行性外，對空官成為國內飛航人因工程研究與教學重鎮更兼具實質效益。

參考文獻

- 1.國立高雄科技大學112年期末報告(2023).國防部軍備局「國防先進科技研究計畫-空軍新型教練機編成轉換訓練之人因工程輔助系統建置案」，計畫編號：146。計畫期程111-113年，高雄，台灣。
- 2.Ahlstrom, U., and Friedman-Berg, F. J. (2006). Using eye movement activity as a correlate of cognitive workload. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 36(7): 623-636. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2006.04.002>.
- 3.Behrend, J. and Dehais, F. (2020). How role assignment impacts decision-making in high-risk environments: Evidence from eye-tracking in aviation. *Safety Science*, 127, DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104738>.
- 4.Chang, R.-C. and Tsai, M.-J. (2022). Visual behavior patterns of successful decision makers in crime scene photo investigation: An eye tracking analysis. *Journal of Forensic Sciences*, 67(3), 1072-1083. DOI: <https://doi.org/10.1111/1556-4029.14970>.
- 5.Dehais, F., Juaneda, S., and Peysakhovich, V. (2020). Monitoring eye movements in real flight conditions for flight training purpose. In: 1st International Workshop on Eye-Tracking in Aviation - ETAVI'20 Conference, March 2020 - March 2020, Toulouse, France. DOI: <http://doi.org/10.3929/ethz-b-000407652>.
- 6.Deng, T., Yan, H., Qin, L., Ngo, T. and Manjunath, B. S. (2020). How do drivers allocate their potential attention? Driving fixation prediction via convolutional neural networks, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 21(5), 2146-2154. DOI: 10.1109/TITS.2019.2915540.
- 7.Johnson, A., and Proctor, R.W. (2004). *Attention: Theory and Practice*, Sage Publications, Inc.: London. DOI: <https://doi.org/10.4135/9781483328768>.
- 8.Jungkunz, P. and Darken, C. J. (2011). A computational model for human eye-movements in military simulations. *Computational and Mathematical Organization Theory*, 17(3): 229-250. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10588-011-9091-9>
- 9.Kasarskis, P., Stehwien, J., Hickox, J., Aretz, A., and Wickens, C. (2001). Comparison of expert and novice scan behaviors during VFR flight. In: *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Aviation Psychology*. Columbus: OH., U.S.A.

- 10.Katz, T. A., Weinberg, D. D., Fishman, C. E., Nadkarni, V., Tremoulet, P., te Pas, A. B., Sarcevic, A., and Foglia, E. E. (2019). Visual attention on a respiratory function monitor during simulated neonatal resuscitation: an eye-tracking study. *Archives of Disease in Childhood - Fetal and Neonatal Edition*, 104(3), DOI: <https://doi.org/archdischild-2017-314449>.
- 11.Kuo, F. Y., Hsu, C. W., and Day, R. F. (2009). An exploratory study of cognitive effort involved in decision under Framing-an application if the eye-tracking technology. *Decision Support Systems*, 48: 81-91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dss.2009.06.011>
- 12.Li, W-C., Wang, Y. and Korek, W. T. (2022). To be or not to be? Assessment on using touchscreen as inceptor in flight operation, *Transportation Research Procedia*, 66, 117-124, DOI:<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.12.013>.
- 13.Li, W-C., Yu, C-S., Braithwaite, G. and Greaves, M. (2016). Pilot's Attention Distributions between Chasing a Moving Target and a Stationary Target. *Aerospace Medicine and Human Performance*, 87(12):1-7. DOI:<https://doi.org/10.3357/AMHP.4617.2016>.
- 14.Li, W.-C., Zhang, J., Le Minh, T., Cao, J., and Wang, L. (2019). Visual scan patterns reflect to human-computer interactions on processing different types of messages in the flight deck. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 72, 54-60. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ergon.2019.04.003>.
- 15.Liu, W., Cao, Y. and Proctor, R. W. (2021). How do app icon color and border shape influence visual search efficiency and user experience? Evidence from an eye-tracking study. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 84, 103-116. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ergon.2021.103160>.
- 16.Lu, T., Lou, Z., Shao, F., You, X. and Tang, M. (2021). Attention allocation in pilots based on climbing and circling mission behavior. *Psychological Research*, 85, 1136-1145 (2021). DOI: 10.1007/s00426-020-01324-1.
- 17.Manhartsberger, M., and Zellhofer, N. (2005). Eye tracking in usability research: What users really see. *Usability Symposium*, 198: 141-152.
- 18.Martinez-Marquez, D.; Pingali, S.; Panuwatwanich, K.; Stewart, R. and Mohamed, S. (2021). Application of eye tracking technology in aviation, maritime, and construction industries: A systematic review. *Sensors*, 21, 4289. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21134289>.
- 19.Mossberg, A., Nilsson, D. and Andree, K. (2021). Unannounced evacuation experiment in a high-rise hotel building with evacuation elevators: A study of evacuation behavior using eye-tracking. *Fire Technology*, 57, 1259-1281. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10694-020-01046-1>
- 20.Mumaw, R. J., and Billman, D. (2023). Limitations on the use of eye-tracking data to understand operator awareness. In: *14th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE)*. DOI: <https://ntrs.nasa.gov/>

- citations/20230002611.
21. Peisl, S.; Wickens, C.D.; Baruah, R. (2018). Eye-tracking measures in aviation: A selective literature review. *The International Journal of Aerospace Psychology*. 28, 98-112. DOI: <https://doi.org/10.1080/24721840.2018.1514978>.
22. Pinheiro, R.; Pradhananga, N.; Jianu, R., and Orabi, W. (2016). Eye-tracking technology for construction safety: A feasibility study. In: *Proceedings of the ISARC-International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Auburn, AL, USA, 18-21 July 2016; 282-290. DOI: [10.22260/isarc2016/0035](https://doi.org/10.22260/isarc2016/0035).
23. Posner, M. I. (2016). Orienting of attention: Then and now. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32:3-25. DOI: <https://doi.org/10.1080/17470218.2014.937446>.
24. Rognin, L., Grimaud, I., Hoffman, E., and Zeghal, K. (2004). Assessing the impact of a new instruction on air traffic controller monitoring tasks. In: *Proceedings of the International Conference on Human-Computer Interaction in Aeronautics*. AAAI Press: Toulouse, France.
25. Ryffel, C. P., Muehlethaler, C. M., Huber, S. M., and Elfering, A. (2019). Eye tracking as a debriefing tool in upset prevention and recovery training (UPRT) for general aviation pilots. *Ergonomics*, 62(2), 319-329. DOI: <https://doi.org/10.1080/00140139.2018.1501093>.
26. Salvucci, D. D., and Goldberg, J. H. (2000). Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols. In: *Proceedings of the Eye-tracking Research and Application Symposium*. Palm Beach Gardens: FL., U.S.A. 71-78. DOI: <https://doi.org/10.1145/355017.355028>.
27. Sarter, N. B., Mumaw, R. J., and Wickens, C. D. (2007). Pilots' monitoring strategies and performance on automated flight decks: An empirical study combining behavioral and eye-tracking data. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 48(3): 347-357.
28. Schwerd, S. and Schulte, A. (2021). Situation awareness adaptive alerting in an aircraft cockpit: A simulator study, DOI: <https://doi.org/10.31224/osf.io/9gmnv>.
29. Shinar, D. (2008). Looks are (almost) everything: Where drivers look to get information. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 50: 380-384. DOI: <https://doi.org/10.1518/001872008X25064>.
30. Simmonds, L., Bellman, S., Kennedy, R., Nenycz-Thiel, M., Bogomolova, S. (2020). Moderating effects of prior brand usage on visual attention to video advertising and recall: An eye-tracking investigation. *Journal of Business Research*, DOI: [10.1016/j.jbusres.2019.02.062](https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.02.062).
31. Skvarekova, I., ; Azaltovic, V.; Pecho, P. and Kandra, B. (2020). Eye track technology in process of pilot training optimization. 2020 *New Trends in Aviation Development (NTAD)*, Stary Smokovec, Slovakia, 2020, pp.206-210, DOI: [10.1109/](https://doi.org/10.1109/)

- NTAD51447.2020.9379071.
32. Wang, T.-C., Tsai, C.-L. and Tang, T.-W. (2022). Visual responses of patients with generalized anxiety disorder who cycling in the virtual sportscares with different tree cover densities, *Frontiers in Psychiatry*, 13, 1-13. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpsyt.2022.880586>.
33. Wickens, C. D., and Hollands, J. G. (2021). *Engineering psychology and human performance*, 5rd Edition. Routledge: NY., U.S.A., DOI: <https://doi.org/10.4324/9781003177616>.
34. Wiggins, M. W. (2006). Cue-based processing and human performance. *International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors - 3 Volume Set*, 641-645. ISBN: 9780429134845.
35. Yan, S., Tran, C.-C., Chen, Y., Tan, K. and Habiyaemye, J. L. (2017). Effect of user interface layout on the operators' mental workload in emergency operating procedures in nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design*, 322, 266-276. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.07.012>.
36. Yu, C-S., Wang, E. M., Li, W-C., and Braithwaite, G. (2014). Pilots' visual scan pattern and situation awareness in flight operations. *Aviation, Space and Environmental Medicine*, 85 (7), 708-714. DOI: <https://doi.org/10.3357/ASEM.3847.2014>.
37. Yu, C-S., Wang, E. M., Li, W-C., Braithwaite, G., and Greaves, M. (2016). Pilots' visual scan pattern and attention

distribution during the pursuit of a dynamic target. *Aerospace Medicine and Human Performance*, 87 (1), 40-47. DOI: <https://doi.org/10.3357/AMHP.4209.2016>.

作者簡介

游重山博士，軍軍官學校77年班(69期)國立清華大學工業工程與工程管理所博士。曾服務空軍21年餘，經歷作戰、教育、軍史、駐外、計畫等職務、英國克蘭菲爾大學航空運輸系訪問學者。現任職於國立高雄科技大學博士後研究員、空軍軍官學校航空管理學系兼任助理教授、空軍飛行安全教育訓練中心「人為因素分析與歸類系統(HFACS)」講師。

蘇國璋博士，國立清華大學工業工程與工程管理所博士。曾任國立高雄科技大學資訊管理系(所)電子商務所主任暨所長、加拿大滑鐵盧大學客座教授。現任職於國立高雄科技大學資訊管理學系特聘教授、中華民國人因工程學會理事長、亞洲人因工程與設計協會副理事長、醫策會國家醫療品質獎智慧醫療規劃與審查委員。

林伯鴻博士，國立清華大學工業工程與工程管理所博士。曾任美國德州理工大學工業工程系訪問學者。現任職於國立高雄科技大學工業工程與管理學系副教授、中華民國人因工程學會理事。

王心靈博士，美國普度大學航太所博士。曾任中原大學機械系博士後研究、宏達科技公司航太專案經理。現任職於空軍軍官學校航空管理學系副教授兼系主任。