

出國報告（出國類別：進修）

遙控無人機事故調查技術專業訓練 出國報告

服務機關：國家運輸安全調查委員會

姓名職務：調查官／張國治

派赴國家／地區：美國洛杉磯

出國期間：民國 112 年 4 月 2 日至 4 月 9 日

報告日期：民國 112 年 7 月 7 日

目次

一、目的.....	5
二、過程.....	7
2.1 行程.....	7
2.2 課程.....	7
三、心得.....	10
3.1 遙控無人機標準與法規.....	10
3.2 於國家空域系統中作業.....	15
3.3 偵測和避讓.....	17
3.4 特定操作風險評估（Specific Operations Risk Assessment, SORA）.....	18
3.5 自動化與警覺.....	20
3.6 無人機操作中的人為因素調查主題.....	22
3.7 無人機事故調查案例.....	25
四、建議.....	27

一、目的

為持續提升本會遙控無人機事故調查能量，職奉派參加今（2023）年於美國南加州安全學院（Southern California Safety Institute）所舉辦為期 5 天之「無人機系統作業與調查（Unmanned Aircraft Systems Operations & Investigation）」專業訓練，圖 1 為學員與講師合照。

無人機相關之技術與應用為嶄新之領域，對現有民航作業之威脅亦隨著各種無人機應用需求而快速增加，最嚴重之威脅為與載人航空器之撞擊風險，目前全球各地都有無人機接近民航機之報告，且已發生過無人機與載人機空中相撞之事件。國際民航組織於國際民用航空公約第 13 號附約中明確將無人機造成之事故納入飛安調查的範圍，我國無人機調查能量之整備尚處於起步階段，亟需投注資源發展。

此課程著重於無人機法規、視距外無人機操作、人機界面的設計和功能、自動駕駛和自動化、GNSS 和其他技術、無人機中的人為因素與狀況警覺、安全管理和特定操作風險評估、事故調查與案例研究等。

講師 Nigel Breyley 先生曾服役於英國皇家海軍及皇家空軍，擔任直昇機及定翼機組員，負責空拍影像資料；曾任英國民航局飛航標準部門，在有人機和無人機之操作、監理和訓練方面擁有廣泛經驗；他有豐富之無人機系統飛測操作員和飛行營運管理經驗，目前從事視距外商業無人機操作員訓練，以及無人機事故調查員、CRM 和人為因素講師。

本訓練原有 14 位學員，其中 12 位為非洲國家民航監理機關無人機相關人員，但臨時於開課前 10 天取消行程，故參訓人員僅 2 位，另一位學員為巴西陸軍直昇機駕駛員。



圖 1 學員與講師合照

二、過程

2.1 行程

日期		起訖地點	詳細任務
月	日		
4	2	台北-美國洛杉磯	啟程
4	3-7	洛杉磯	訓練課程
4	8-9	美國洛杉磯-台北	返國

2.2 課程

4月3日課程

Time	Title
09:00-10:00	Introduction
10:00-10:15	Break
10:15-11:15	UAS Development
11:15-11:30	Break
11:30-12:30	UAS Types
12:30-13:30	Lunch
13:30-14:30	UAS Problems
14:30-14:45	Break
14:45-15:45	Detect & Avoid
15:45-16:00	Break
16:00-17:00	Matrice Case Study

4月4日課程

Time	Title
09:00-10:00	Airspace Integration
10:00-10:15	Break
10:15-11:15	Regulations
11:15-11:30	Break
11:30-12:30	Regulations
12:30-13:30	Lunch
13:30-14:30	Automation
14:30-14:45	Break
14:45-15:45	Nogales Case Study
15:45-16:00	Break
16:00-17:00	Nogales Case Study

4月5日課程

Time	Title
09:00-10:00	Hazard & Risk Management
10:00-10:15	Break
10:15-11:15	Hazard & Risk Management
11:15-11:30	Break
11:30-12:30	GNSS
12:30-13:30	Lunch
13:30-14:30	The SORA
14:30-14:45	Break
14:45-15:45	BVLOS Operations
15:45-16:00	Break
16:00-17:00	BVLOS Operations

4月6日課程

Time	Title
09:00-10:00	Autopilot
10:00-10:15	Break
10:15-11:15	HF Issues
11:15-11:30	Break
11:30-12:30	HF Issues
12:30-13:30	Lunch
13:30-14:30	Crash Scene use of UAS
14:30-14:45	Break
14:45-15:45	Investigation Considerations
15:45-16:00	Break
16:00-17:00	UAS Data Investigation

4月7日課程

Time	Title
09:00-10:00	Vapor Case Study
10:00-10:15	Break
10:15-11:15	GCS Design
11:15-11:30	Break
11:30-12:30	Penguin Study

三、心得

3.1 遙控無人機標準與法規

自從第 1 次世界大戰開始，便有國家開始研究將無人機運用於軍事用途，但直至通訊、導航、自動化系統及微晶片技術高度發展後，遙控無人機（以下簡稱無人機）才達到實用的階段。1995 年美國通用原子航空系統公司（General Atomics Aeronautical Systems, Inc.）製造之掠奪者式無人機（MQ-1 Predator）開始於美軍服役，並參與數個國家的軍事任務。近年來不同尺寸、分類的民用無人機在全球大幅增長，已成為商業、政府和消費應用的重要工具，廣泛使用於航拍、監視、建築、能源、農業、救災、物流等各個領域。由於無人機應用發展的速度遠高於相關法規的制定，國際間法規缺乏標準化，以致各國之監理存在差異，如：

- 操作員執照和資格
- 規範和認證
- 偵測和避讓技術
- 高度量測分歧
- 速度—哩/時與公尺/秒

無人機的規模、複雜程度等各不相同，影響無人機飛行安全的因素如下，重量並不是唯一的答案：

- 視距內/視距外操作
- 隔離空域/非隔離空域操作
- 飛越空曠地區/人口稠密區
- 飛行中止系統

- 備援系統
- 無人機結構的脆弱性/動能
- 複雜性

因為缺乏共同標準，導致各國無人機監理單位使用豁免和逐案處理，後果是利用操作限制來彌補技術缺陷，造成監理單位工作量增高，以及有監理不一致的風險。

傳統民用航空器的適航標準是為確保航空器的適航性所制定的最低安全標準，此標準只反應經證實的、成熟的技術，而非最新的發展，兼顧安全性與經濟考量並因應使用經驗、事故教訓而增修訂，為具有國際共識的標準。對於無人機，由於飛行時間短和飛行測試相對缺乏，可能幾乎沒有經過驗證的可用數據，因此需要使用模式，或是定性評估。

傳統民用航空器的認證係以定量的方法（應用數學方法評估系統和航空器安全的分析過程），依照公認標準，由經核准的機構設計、製造飛機，其零組件與系統有可追溯性，並在標準化條件下進行故障測試，民航主管機關方可頒發型別檢定證（Type certificate）。

無人機因無公認標準，故以定性的方法（以客觀、非數字方式評估系統和航空器安全的分析過程）規範，幾乎可由任何人建造，零組件無可追溯性且系統缺乏測試標準。目前各國無人機檢驗標準主要係參考無人系統規則制定協會（Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems, JARUS）與美國材料和試驗協會（American Society for Testing and Materials International, ASTM）的共識標準訂定。

國際民航組織（ICAO）現階段對於遙控無人機的管理架構係參照歐盟航空安全署（EASA）之規範，EASA 對於遙控無人機的操作基於其風險分為 3 類：

第 1 類為開放（Open）類，為遵守各項操作限制下的低風險飛行；不需要民航主管機關事先授權，也不需要無人機操作員在作業前進行聲明，但應保持在規定的操作限制範圍內（例如距機場、距人員的距離等）目視飛行，各個國家/地區的法規有所不同，但最常見的限制是：

- 飛行高度不得高於 400 英尺（或 120 或 150 公尺）。
- 必須保持在操作員的視線範圍內（通常為 500 公尺）。
- 不得在距離任何人或建築物 150 英尺/50 公尺的範圍內飛行。
- 其餘規則適用於任何航空器，例如不要危及人員並避免與其他飛機相撞。

第 2 類為特定（Specific）類，為主管機關核准排除相關操作限制後的中度風險飛行，需要民航主管機關事先授權，並考量操作風險評估中確定的緩解措施。

第 3 類為檢定（Certified）類，如先進空中運輸（Advanced Air Mobility, AAM），在過去無航空服務或航空服務不足的地方—本地、區域或城市之間運送人員和貨物，風險最高。考慮到所涉及的風險，需要無人機及其運營單位的檢定證以及無人機操作人員的執照。目前尚未有針對認證類別的規定。

以下提供無人機法規的網路資源，無人機的法規變化頻繁，無法保證所有的內容是最新的；有些內容也故意過時，以展示法規如何變化以及相關考量的因素。

- ICAO UAS Toolkit：網站提供各國的法規和實用的資料（主要是美國）

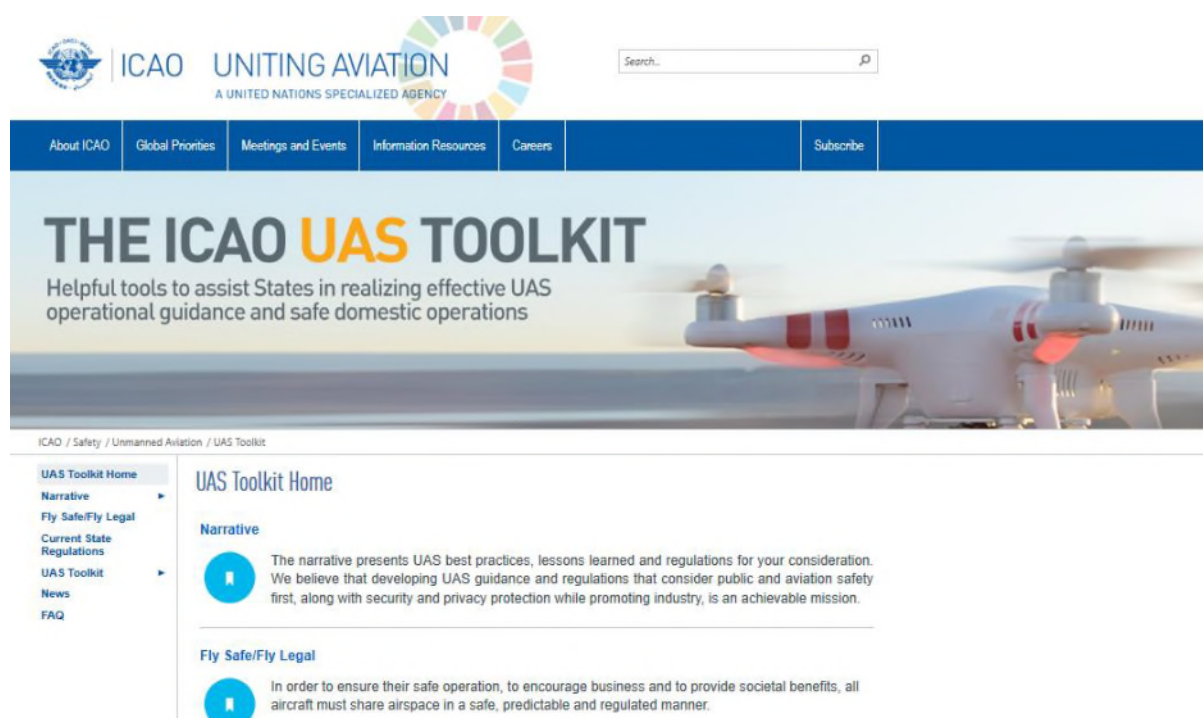


圖 2 ICAO UAS Toolkit 網站

<https://www.icao.int/safety/UA/UASToolkit/Pages/default.aspx>

<https://www.icao.int/safety/UA/Pages/default.aspx>

- JARUS：由來自各個國家航空當局和地區航空安全組織專家組成的團隊，其目的是為無人機系統的認證和安全整合到空域和機場，提出技術、安全和操作要求的建議。JARUS 的目標是提供指導材料，以協助每個機構編寫自己的要求並避免重複工作。JARUS 的產品具有：
 - 推薦的認證規範和操作規定。
 - 可供 ICAO、國家航空當局和地區當局等相關方參考和使用。
 - JARUS 不制定法律或強制性標準——國家航空當局和地區當局決定如何使用。

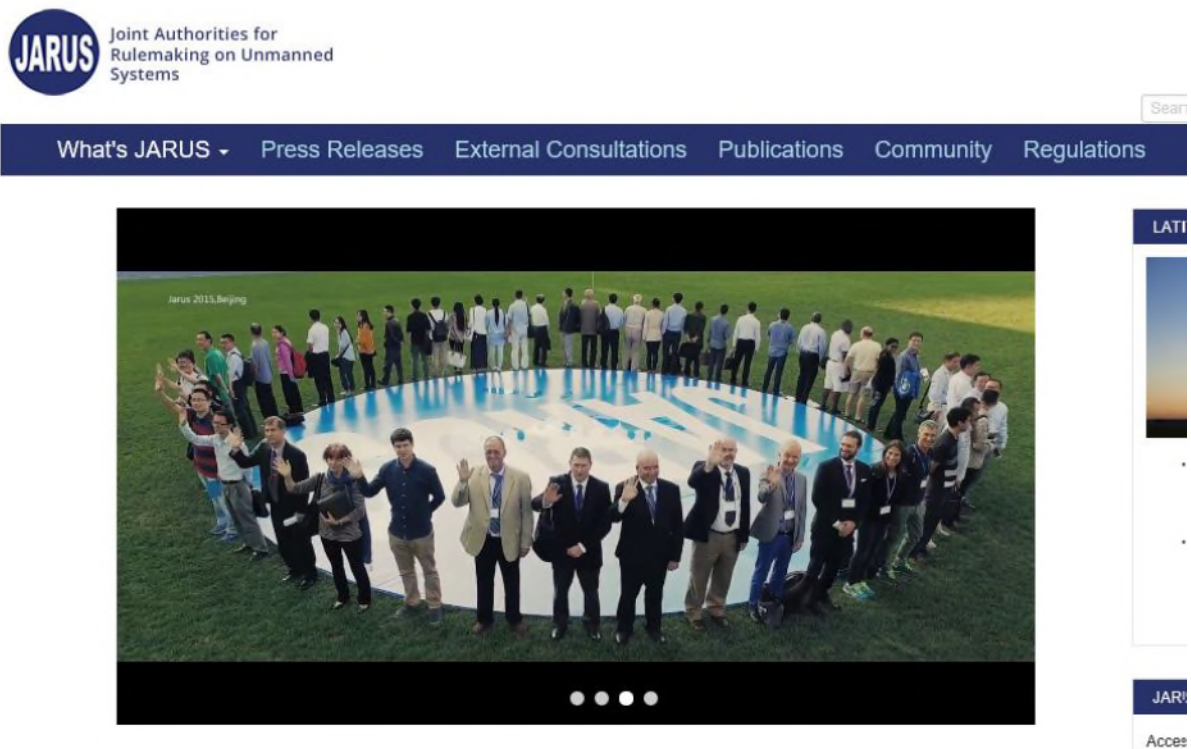


圖 3 JARUS 網站

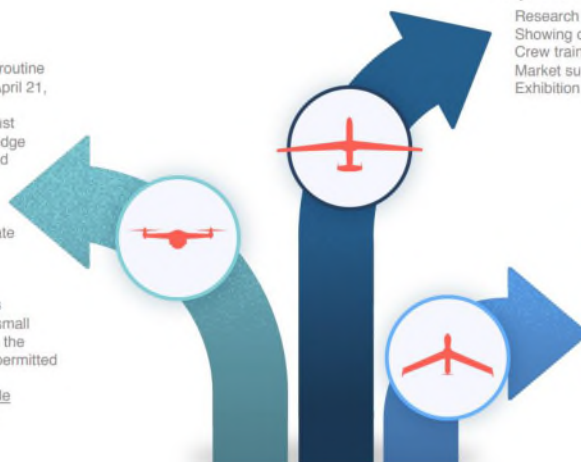
- 無人機航管通用高度參考系統（Eurocontrol 無人機資源網頁）：使用無人機的許多活動——從軍事到商業再到休閒，都可能導致它們與傳統飛機共享空域。為了保持該空域的所有用戶間的隔離，必須明確了解這些航空器的高度。然而，傳統載人航空使用從氣壓讀數獲得壓力高度，而無人機通常使用其他系統如衛星獲取的高度。雖然這些不同的系統中的每一個都可以單獨實現安全隔離，但提供彼此的高度值卻不同，需要建立一個通用的高度參考系統，此文件為討論此類系統提供了基礎。所有可用的高度測量系統在經濟和技術方面都有許多優點和缺點，Eurocontrol 提出了一種解決方案，使兩個不同的系統能夠安全共存。
- EASA：歐盟無人機實施規則（Implementing Regulation，直接適用於歐盟所有成員國，類似於國家立法）—— Commission Implementing Regulation (EU) 2019/947 of 24 May 2019 on the rules and procedures for the operation of unmanned aircraft 與授權規則（Delegated Regulation，用於補充或修改立法法案的某些非必要要素）—— Commission Delegated Regulation (EU) 2019/945 of 12 March 2019 on unmanned aircraft systems and on third-country operators of unmanned aircraft systems，各有許多輔助文件
- FAA：在美國有數種方式進行非娛樂用途的無人機作業，對於最大重量小於 55 磅（25 公斤）的無人機，符合相關操作限制（如於 G 空域飛行、目視、不高於 400 呎及時速 100 哩等）、操作人認證與無人機的要求，可進行類似 EASA 的開放（Open）類的低風險飛行，適用 FAR Part 107 之規定，另外，若符合要求，可豁免該規定的某些限制，如群飛、人上空飛行等。若超過 Part 107 最大重量限制的，或者無人機操作包含不可豁免的規則，則可以申請 49 U.S.C. § 44807 特別授權。上述之外的無人機則需適航認證。

Paths to UAS Flight Today

Multiple ways to fly UAS for non-recreational reasons

Part 107

- UAS < 55 lbs.
- Class G Airspace*
- Visual Line of Sight*
- At or below 400ft*
- Fly during day*
 - a. Night Operations: This rule allows routine operations of small UAS, beginning April 21, 2021, at night under two conditions:
 - i. The remote pilot in command must complete an updated initial knowledge test or online recurrent training, and
 - ii. The small unmanned aircraft must have lighted anti-collision lighting visible for at least three (3) statute miles that has a flash rate sufficient to avoid a collision.
- Fly at or below 100mph*
- No operations over people*
 - a. The ability to fly over people varies depending on the level of risk that a small UAS operation presents to people on the ground. Operations over people are permitted subject to the following requirements: [Operations Over People General Overview | Federal Aviation Administration \(faa.gov\)](#)



Airworthiness & Type Design

- Type certificate required for standard airworthiness certificate
- Standard airworthiness certificate allowed for carrying persons or property for compensation or hire (with appropriate operational approval)
- Experimental Airworthiness Certificate for:
 - Research & Development
 - Showing compliance
 - Crew training
 - Market survey
 - Exhibition

49 USC §44807

- The successor to 333 exemptions
- UAS ≥ 55 lbs.
- Pilot requirements on case-by-case basis
- Requires COA for airspace authorization
- Authority expires in 2023

* May apply for a waiver or airspace authorization to fly beyond requirement

圖 4 FAA 無人機作業相關規定

3.2 於國家空域系統中作業

無人機與一般航空器共享空域的主要困難，是無人機缺乏能採取避讓行動的駕駛員，然而駕駛員是否始終是有效的最後一道防線？難道不會低頭檢視儀表、閱讀文件，或因眩光而眯眼，但困難在於說服公眾相信電腦來管理飛機避讓系統是安全的，偵測和避讓能力，或是感知和避讓能力可以解決這個問題嗎？

以相對安全程度開始無人機操作的簡單方法是「隔離空域」（其他航空器不應進入的空域），一個簡單方法是設置臨時危險區域（Temporary Danger Area, TDA）。此方法無法解決下方地面可能發生的情況，亦需要考慮人口安全，而且通常每天和總持續時間都有限。TDA 的好處是可經由飛航公告（NOTAM）發布活動訊息，其缺點是缺乏持久性，並需要每天閱讀飛航公告；另一可能的替代方案為禁止空域或限制空域。

對於空域管理，關於無人機於空域中適當的隔離距離，需考量長久以來有人航空器的既定程序，及目前的空域類別要求（特定等級的飛行員專業知識，與特定的航空器設備/性能）。因為無人機種類繁多且能力參差不齊，Eurocontrol 的報告中，重點關注於避免碰撞的技術，以及其他飛航管制的問題，如在同一空域混合使用無人機和有

人駕駛航空器，以下是會影響管制員的因素：

1. 坐標參考系統和測量單位的使用：
 - 速度單位：公尺/秒與哩/時
 - 海拔高度單位：公尺與呎
 - 高度數據：氣壓與 GPS
 - 位置：十進制度與度分秒
2. 位置報告：有人駕駛航空器使用信標的距離和方位來報告其位置，但許多無人機地圖顯示缺乏這些功能，導致難以對航管報告位置。
3. 無人機操作人需要持有無線電執照，並使用術語與航管通聯。

無人機與其他航空器流量整合與協調作業，需要空中防撞系統（TCAS）、廣播式自動回報監視系統（ADS-B）與 MODE S 航管雷達迴波器等，但許多小型無人機製造商使用不符合技術標準規定（Technical Standard Order, TSO）的開放原始碼自動駕駛軟體與設備，如何證明並保證其安全性？另一方面是操作人員的表現問題，如果沒有執照，如何確定無人機操作員的專業和知識水準，是至關重要的安全要素。

FAA 預測到 2019 年底，美國的空域將有 7500 架大、小型無人機。FAA 的任務是在 2015 年 9 月之將無人機安全整合至國家空域，雖然沒有實現這一目標，但確認主要問題是缺乏防止與無人機失去訊號鏈接的技術，與對於關鍵無人機監管標準達成共識。建議是收集關鍵作業安全的數據、標準化訓練的時程和要求、管制員的自動化工具和程序，以及加速監管要求——尤其是小型無人機系統（最大起飛重量小於 55 磅或 25 公斤）。研究發現，缺乏成熟的偵測和避讓技術來避免碰撞，因此無人機的安全作業依賴於有效、穩健的技術來自動偵測在附近空域運行的其他飛機，並成功進行避讓，這是尚未緩解，最緊迫的技術挑戰。

FAA 尚未制定相關管制程序和管制員訓練，因此限制了管制員管理無人機在內的空中交通的能力。管制員提交了大量有關無人機操作管理問題的報告，在報告中表示，

目前為有人駕駛航空器設計的程序和隔離標準，對於無人機系統來說是不足的，而且由於異常大量的導航數據，飛行計劃工具無法充分管理無人機的飛行計劃，以致管制員被迫將無人機與其他航空器之交通流量分開。

無人機與其地面導控站之間，整合、穩定與安全的 C2 (Command & Control) 訊號鏈接對於無人機的安全作業至關重要，並且還需要足夠的無線電頻道以確保足夠的通訊鏈路。國際電信聯盟於 2012 年提供一些無人機專用無線電頻道，但對於所需頻譜、執照、C2 標準與安全漏洞仍存在許多未知數。

3.3 偵測和避讓

有人航空器飛行的一般規則是讓其他航空器很容易看到你，同時防禦性的搜尋對方來避免碰撞。傳統和法規的建立就是為了體現這種「看到並避免」的概念。但是當無人機上沒有任何人時，如何視距外飛行時看到並避免 (see-and-avoid)，故技術上必須提供偵測其他航空器並避免碰撞的方法 (detect-and-avoid, DAA)。

近年來，無人機的加速增長，突顯了迫切需要建立減輕空中相撞風險的機制，以實現視距外安全操作。此類作業需要平台和操作層面的高度自動化，因為它們通常在非隔離且可能不受控制的空域中進行。所需自動化的一個關鍵要素是無人機上提供的偵測和避讓 (DAA) 功能，這將使遠端操作員能夠意識到衝突的航空器，並採取適當的行動以保持適當隔離並避免碰撞。

DAA 系統可以分解為兩個主要功能，即「偵測」：旨在識別潛在危險（其他飛機、地形、天氣等）並通知適當的任務管理和導航系統；以及「避讓」：執行消除衝突的操作，並確定免於衝突。避讓功能可以分為兩部分：

- 確保隔離：用於防止航空器相互靠近的例程序和行動，此階段進行的任何操縱都必須按照飛航規則進行。然而，當管制員負責提供空域飛行的隔離時，遠端操作員必須按照管制員指令操縱飛機，就像有人駕駛飛機一樣。

- 避免碰撞：這是衝突管理的最後一層，為避免碰撞而必要的任何緊急操縱。雖然遠端操作員通常負責發起防撞操縱，但可能需要自動功能來滿足遠端操作員無法在足夠的時間內發起防撞操縱（例如，由於 C2 鏈路延遲問題）或失去 C2 鏈路的情況。

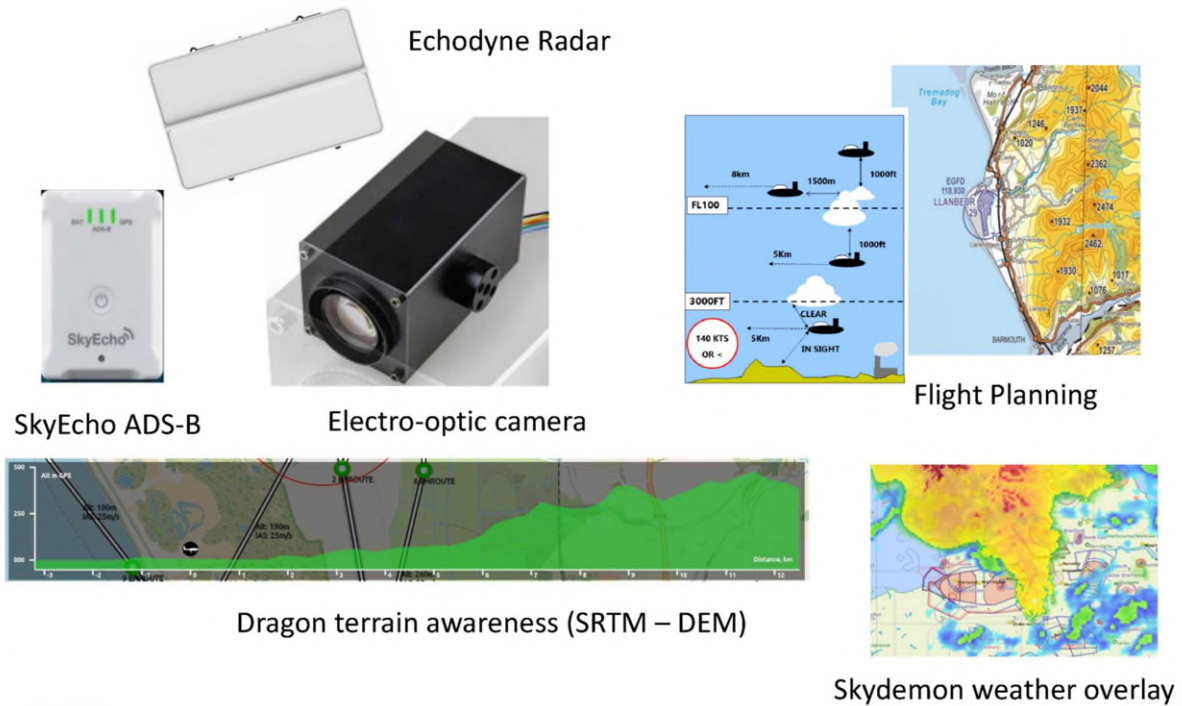


圖 5 偵測和避讓設備多層次做法

3.4 特定操作風險評估 (Specific Operations Risk Assessment, SORA)

SORA 是 JARUS 開發的一種用於 EASA 特定類評估無人機操作風險的方法。本質上 SORA 旨在指導無人機作業申請人和民航管理機關如何評估特定空域中，特定無人機作業的安全性。SORA 的風險定義參考 SAE ARP 4754A/EUROCAE ED-79A 中，「事件發生的頻率（機率）與其相關的嚴重程度組合」。SORA 通過地面和空中風險等級的評估，來應對這些風險：

1. 空中風險等級 (Air Risk Class, ARC)：ARC-a 至 ARC-d，其中 ARC-a 通常定義為無人機與傳統飛機之間的碰撞風險可以接受，且無需增加任何戰術緩解措施的空域。ARC-b、ARC-c、ARCd 通常定義空中碰撞風險增加的空域。ARC 可以被視為無人機

在特定空域環境中，遭遇傳統航空器比率的廣義定性分類。戰略緩解措施通過在起飛前對操作進行修改來降低風險，並且不需要緩解反饋循環（即基於偵測/觀察到的數據即時消除衝突）。相反的，戰術緩解措施在起飛後應用，以減輕殘餘風險，並需要反饋循環來反應即時觀察到的（視距內）或偵測到的（視距外）對隔離規定和避免碰撞的威脅，這些戰術緩解措施構成了 DAA 系統。

2. 地面風險等級（Ground Risk Class, GRC）：地面風險有兩個關鍵組成部分，無人機特徵尺寸，例如翼展或動能，以及操作場景，例如是在農村地區進行視距外操作，或是在人口稠密的地區和/或人群聚集的地方操作。SORA 流程要求申請人建立與計劃作業相關的內在（初始）地面和空中風險類別，然後確定戰略和戰術緩解措施的有效性。

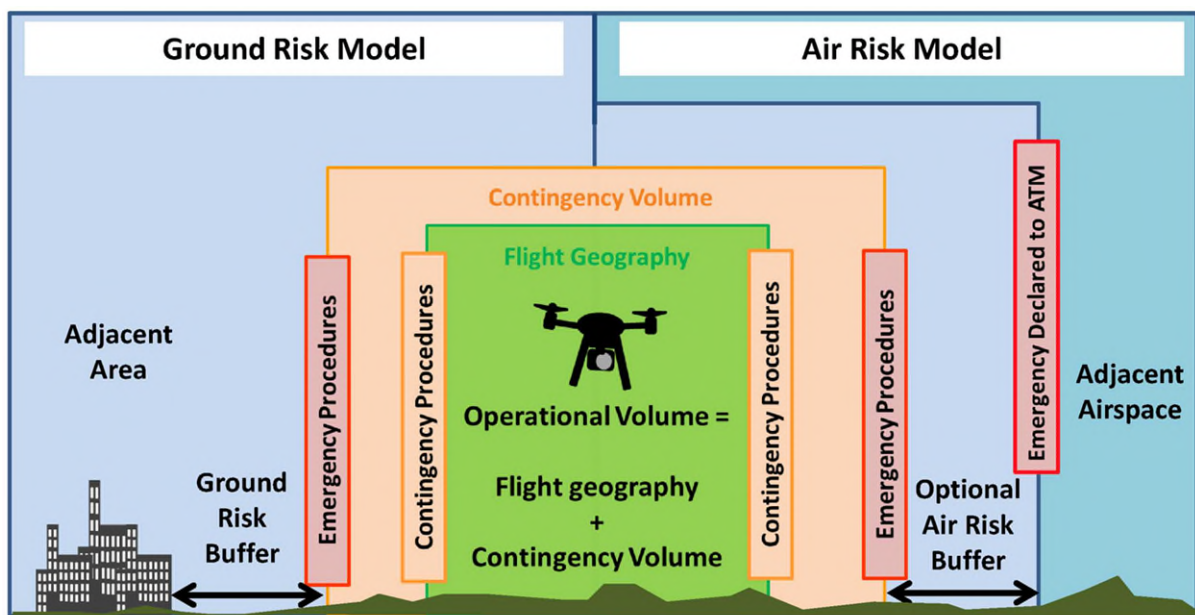


圖 6 空中風險及地面風險

特定無人機作業的申請人須考慮並準確描述該作業之緩解措施、空域注意事項、地面考慮因素，以及操作安全目標。另外還需考慮其他要求如安全、無線電頻率許可、隱私、環境保護等。申請人必須證明無人機可以控制在預期的操作空間內，並且存在足夠的緩解措施以達到可接受的風險——通過設計和操作緩解措施的結合來實現。

緩解措施必須具有一定程度的穩健性（Robustness，分為低、中、高），與地面和空中風險等級相稱。穩健性相當於完整性等級（Level of integrity，通過緩解措施實現

的安全增益)和保證等級 (Level of assurance, 顯示完整性等級已達到的方法) 的適當組合。

	LOW Assurance	MEDIUM Assurance	HIGH Assurance
LOW Integrity	LOW	LOW	LOW
MEDIUM Integrity	LOW	MEDIUM	MEDIUM
HIGH Integrity	LOW	MEDIUM	HIGH

圖 7 穩健性矩陣

若特定無人機作業經評估後，得到所需的穩健性是「低」，申請人僅需聲明已達到所需的完整性等級；若由穩健性是「中」，申請人須提供支持證據，證明已達到所需的完整性，通常通過測試（例如技術緩解措施）或經驗證明（例如與人相關的緩解措施）來實現；若由穩健性是「高」，申請人所達到的完整性要被有能力的第三方所接受。

我國民航法規定政府機關（構）、學校、法人為執行業務，可申請排除區域與操作限制，其操作風險較高（屬特定及檢定類）。目前民航局為增進國內遙控無人機物流發展及提升相關產業能量，明確遙控無人機載貨作業能力審查之評估標準，於「民航通告」AC 107-006C 中訂定「載貨運輸作業程序」，採用 SORA 做為作業風險評估工具。

3.5 自動化與警覺

無人機操作人必須了解若某些自動化系統失效，後果是什麼？需要考慮哪些因素？

- 失去 GPS 訊號：地面導控站畫面上，無人機的位置圖像可能會消失，若慣性測量單元 (Inertial measurement unit, IMU) 接管 GPS 的功能，無人機可繼續作業，但隨著時間的推移，IMU 導航的誤差會增加。失去 GPS 訊號後，無人機自動駕駛系統的正常行為是繞一個點飛行，等待恢復訊號，但盤旋時會隨風漂移；操作人或可改用鏡頭進行視覺導航或其他指令。如果設定自動駕駛系統於遭遇 GPS 故障時，無人機將立即著陸，那如何知道在哪裡落地、下方地面有什麼？是否須裝置降落傘等。
- 失去上傳鏈結：無人機收不到任何指令時，可能的做法是繞一個點飛行等待訊號恢復、爬升以獲得無線電訊號、繼續按原路線飛行、返回起飛地或緊急落地。後

續的問題是等待下一個動作多久可以接受、DAA 偵測後無法發出指令進行避讓、是否有預先設定返回高度。

- 失去下傳鏈結：地面導控站收不到任何訊息時會顯示什麼資訊？無人機如何知道發生問題？理論上無人機仍然可以被指揮，但操作人如何知道結果，如果有 ADS-B 或其他可用於指示位置的裝置或應答器，或可繼續操作。
- 低電量：低電量警告是否有不同階段還剩多少使用時間的分級如「LOW BATTERY」、「CRITICAL BATTERY」並以不同顏色顯示，且自動駕駛應考慮風的影響，並可規劃緊急著陸場所或降落傘。
- 其他故障模式：需要考慮的項目如電子圍籬的使用、無人機在懸停時是否會卡住而無法移動，地面區域的性質與相關風險、返航/緊急著陸/展開降落傘的時機（Land as soon as practicable、Land as soon as possible、Land immediately）

一個自動化系統設計問題導致的事故是英國陸軍 Thales Watchkeeper WK450 型用於全天候、情報、監視、目標獲取和偵察的無人機。2014 年 10 月 16 日 1113 時編號 WK031 之 Watchkeeper 無人機在西威爾士機場 26 跑道進場，高度 10 至 15 呎時，仰角快速向下並撞及地面，停止於跑道左側邊緣。地面導控站組員直到塔台通知，才知道發生事故。該無人機因設計可於半整修的跑道起降，所以該機之降落觸地感應裝置並非機械式，而是使用 2 種演算邏輯，第一種是使用雷射測高儀在距地 1 公尺高時作動，第二種是使用 GNSS 及加速度儀，因精確度較差，故此功能在距地 20 公尺高時作動，當加速度儀感應到主輪觸地震動後，制動 V 型尾翼降低仰角讓鼻輪觸地。當天該機進場前天氣正在惡化，雷暴風險從低升至中，進場時因雷射測高儀故障，故切換使用第二種觸地演算邏輯；當該機最後進場高度 10 至 15 呎時，因加速度儀偵測到雷暴亂流產生的震動時，自動駕駛系統以為該機主輪觸地，制動 V 型尾翼致仰角快速向下並撞及地面造成事故。



圖 8 事故之 Watchkeeper 無人機

3.6 無人機操作中的人為因素調查主題

根據統計，從事件發生到操作員無法再採取改正措施挽救無人機，平均時間大約只有 16 秒。操作員錯誤的安全感，主要是由於高度自動化和系統備援。內部操作員最容易受到狀況警覺（Situational Awareness）不足的影響，因為通過預先設定的功能駕駛無人機，從而失去了對真實無人機的狀況感知；在專注度低的階段，參數變化或異常的警告可能不會那麼快警覺，這可能會導致反應延遲，或者最糟糕的是，有時此類警告可能會被視為假警報或不被認為對系統性能有害而被擯棄，這種部分喪失狀況警覺可能會影響決策，在最壞的情況下，失去狀況警覺後無法做出任何決定，直到無人機受到危害。

感知（Perception）是自我對現實的解釋，當感知與現實相符時，便具備狀況警覺，及時了解所在的處境和環境，偵測並詮釋偏異，識別其潛在問題，以做出適當的動態決策。狀況警覺由觸碰、聽、看、聞、嚐獲得（再加上警告我們即將出問題的第六感）。航空器駕駛員可以看到、感覺到、嗅到等等，如感覺到失速的抖動、失效發動機的震動，電子設備燃燒的氣味等，一旦將它們排除在外，實際上會失去大約百萬個感應器

和一個數據處理器。當顯示和感官隔離、開始只依賴視覺信息時會發生什麼？



圖 9 地面導控站的顯示設備和畫面

Wickens & Hollands (2000) 提出航空顯示設計的 7 個關鍵原則，這些原則是通過對資訊處理心理學的理解而發展：

- 資訊需求原則：需求較頻繁的資訊應該顯示在最容易取得的位置。
- 易讀性原則：顯示內容必須易讀才有用，足夠大並且具有足夠的對比度、亮度、照明及音量等。
- 整合原則/就近兼容原則：需要整合或比較的資訊應位於物理上非常接近的位置。
- 圖示寫實原則：顯示應是其所代表資訊的圖像表現。
- 運動元件的原理：顯示器上的運動元件應與操作者心智模型中的運動元件相對應。

- 預測輔助原則：有關未來航空器狀態的預測資訊是有價值的（前提是準確且易於理解）。
- 可區分性原則：特定元素絕不應該看起來（或聽起來）與同一顯示內容中可能出現的另一個元素相似。

評估無人機地面導控站的顯示設計/設備布置規劃的標準為：解析或閱讀的速度/準確性、學習速度、舒適、長期使用不疲勞、惡劣環境條件下性能穩定，以及操作人表現的微小差異可以追溯到使用設備的差異。由於缺乏標準和指導，導致早期設計存在錯誤或配置不良的風險，而當製造商最終轉向行業標準時，熟悉舊型號的操作員由於對原始配置建立的心理定勢而對新型號產生了問題。無人機地面導控站的顯示設計運用改良之 Cooper Harper 航空器飛行測試評估量表，將其從飛機操縱特性更改為更高階的認知過程，例如資訊分析和決策，這種主觀顯示評估工具允許操作員評估顯示內容，將他們對潛在顯示與需求缺陷的判斷轉化為數字。

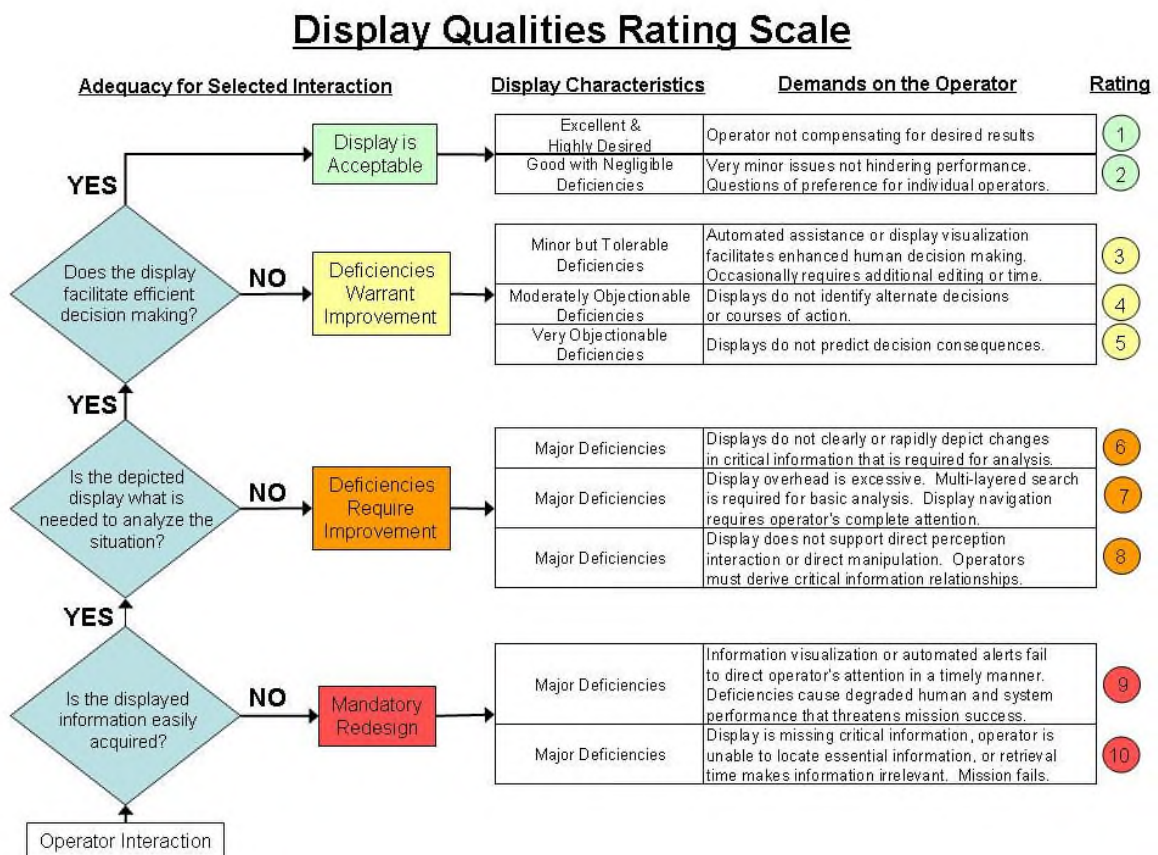


圖 10 改良 Cooper-Harper 無人載具顯示評估量表

3.7 無人機事故調查案例

失去狀況警覺一直是軍用航空事故的主要原因，就美國陸軍無人機飛行員而言，任務是遠程駕駛的，範圍為一到兩百英里，這種距離因素往往會增加了解無人機周圍環境和狀態的複雜性。事故之 Predator B 無人機機號 BP-101，美國海關與邊境保護局（CBP）所有；2006 年 4 月 24 日該機於亞利桑那州 Libby 陸軍機場起飛，預計在美國南部邊境執行 14 小時巡邏任務，進行夜間 VMC 儀器飛航規則之飛行，於當地時間 4 月 25 日 0350 時在亞利桑那州 Nogales 國際機場西北方約 10 哩處，發動機失去動力撞擊地障失事，無人機遭受嚴重損壞，地面無人員傷亡。



圖 11 事故之無人機殘骸

該機原定於 4 月 24 日 1700 時起飛，由於在初始啟動期間無法在無人機和 PPO-1（Pilot Payload Operator-1，詳圖 12）控制台之間建立通信鏈路而延遲，技術人員關閉無人機並下載系統狀態，重新啟動 PPO-1 和 PPO-2 的電源，但他再次無法在 PPO-1 上建立上行鏈路。他收集系統狀態數據並致電加州的主管，與他交談的人員以前從未見過此類問題，建議他在 PPO-1 和 PPO-2 之間切換主處理器卡，隨後建立了鏈接，並開始飛行，該技術人員於 2000 時下班。



圖 12 PPO-1（左）和 PPO-2（右）控制台

飛行期間，飛行員每 2 小時輪換一次飛行任務。起飛的飛行員不是事故飛行員。經過數次輪班後，事故飛行員於 0300 時接管，換班簡報正常，不久 PPO-1 的下部監視器屏幕一片空白，PPO-1 控制台被鎖定，飛行員隨後將控制權切換到 PPO-2。

關於發動機控制，控制台中的狀態桿（安裝在 PPO-1 和 PPO-2 控制台中）具有不同的功能，具體取決於該站是由有效負載操作員還是由飛行員使用。

- 有效負載操作員配置：狀態桿控制攝影機的光圈，向前移動可增大光圈，中間位置可鎖定光圈設置，向後移動可減少光圈。
- 飛行員配置：狀態桿控制發動機燃油閥和螺旋槳順槳伺服系統。

飛行員在將操作控制從 PPO-1 切換到 PPO-2 時未能使用檢查表程序，導致燃油閥無意中關閉，隨後發動機動力完全喪失。其他與可能肇因有關的原因為：地面導控站缺乏飛行教官、與事故相關的因素重複出現且未解決控制台鎖定問題、製造商執行的維護程序不充分，以及操作員對無人機作業的監控不足。

四、建議

1. 遙控無人機相關之技術與應用為嶄新之領域，對現有民航作業之威脅亦隨著各種無人機應用需求而快速增加，我國無人機調查能量尚處於起步階段，亟需投注資源發展，本會應積極參與相關訓練與交流活動，並持續精進提升遙控無人機事故調查能量。
2. 本會未來應持續關注國際上無人機產業、科技應用與法規之發展，以作為評估我國無人機相關法規、管理機制、安全改善及事故調查之參考。

遙控無人機事故調查技術專業訓練出國報告

服務機關：國家運輸安全調查委員會

出國人職稱：調查官

姓名：張國治

出國地區：美國洛杉磯

出國期間：民國 112 年 4 月 2 日至 4 月 9 日

報告日期：民國 112 年 7 月 7 日

建議事項：

	建議項目	處理
1	遙控無人機相關之技術與應用為嶄新之領域，對現有民航作業之威脅亦隨著各種無人機應用需求而快速增加，我國無人機調查能量尚處於起步階段，亟需投注資源發展，本會應積極參與相關訓練與交流活動，並持續精進提升遙控無人機事故調查能量。	<input checked="" type="checkbox"/> 已採行 <input type="checkbox"/> 研議中 <input type="checkbox"/> 未採行
2	本會未來應持續關注國際上無人機產業、科技應用與法規之發展，以作為評估我國無人機相關法規、管理機制、安全改善及事故調查之參考。	<input checked="" type="checkbox"/> 已採行 <input type="checkbox"/> 研議中 <input type="checkbox"/> 未採行