



財團法人國防安全研究院

2022 國防科技 趨勢

關鍵軍事科技
與台灣國防產業之整合

評估報告

主編——蘇紫雲 翟文中

序

2022年2月，俄羅斯入侵烏克蘭，原本外界預期很快結束的戰爭，卻在烏克蘭堅持反抗，陸續獲得外援下反守為攻，戰爭持續將進入2023年。這場戰爭對全球戰略環境與情勢造成極為深遠的影響，不僅戰爭結果將使東歐地緣戰略為之改變，連帶因為對戰爭立場不同、援助對象差異、抗衡與扈從的程度，而影響國際政治版圖的發展。例如，原本就已經存在的美中戰略對峙、科技制裁、區域影響力競爭，隨著俄烏戰爭的發展日益升高；中共習近平面臨二十大權力延續的關鍵，必須展現捍衛核心利益的態度，讓美中關係難以緩解；國防科技發展成果的日新月異也將成為大國藉以嚇阻他國軍事威脅的主要工具，並且從陸地、海洋、太空到無遠弗屆的網路空間，防範衝突的能力與準備更趨向精密與複雜。

基於上述國際情勢的發展，本院2022年的年報分別針對俄烏戰後的印太情勢、中共二十大後政經情勢、國防科技情勢發展等三大主題進行分析與觀察。首先在印太情勢方面，從川普時期開始，美國就將戰略重點放在印太區域，除調整兵力部署外，也強化四方安全架構（QUAD）的運作，甚至在印太區域建立美英澳聯盟（AUKUS）、經濟（IPEF）與科技（Chip 4）的合作機制，全方位遏止中共的擴張。俄烏戰爭後，印太原有政治與經濟情勢受到影響，原有的安全議題加上俄烏戰爭的衝擊，呈現複雜的發展趨勢。

雖然俄羅斯入侵烏克蘭引起國際社會譴責及制裁，但是個別國家的政策與態度差異，也反映出印太情勢的多變性，最明顯的就是中共與印度兩國的政策與方向。兩國基於自身利益與過去傳統，並未贊同對俄羅斯制裁，但也不敢公開地援助俄羅斯，中共希望強化與俄羅斯的同盟，但也覬覦俄羅斯因為戰爭失敗所遺留的全球戰略影響力。印度因為軍備後勤大量依賴俄羅斯，除了趁俄烏戰爭獲得俄羅斯廉價能源外，也在思考後俄羅斯

時代的戰略環境，並質疑俄羅斯發動戰爭的正義性。因此俄烏戰爭帶動了印太主要國家政策的轉變，主要國家之間的競爭與合作也連動變化。因此，《2022 印太區域安全情勢評估報告》乃著重在分析俄烏戰爭對個別國家及區域安全機制的影響與未來發展。

俄烏戰爭爆發時，中共社群媒體盛傳在美國自顧不暇之際，將藉機武力犯台，美國亦再三警告中國切勿對台動武，美國拜登總統也再三強調對台灣的保證與承諾。但是中共延續過去文攻武嚇的行動，在台灣周邊擴大進行演習行動。尤其在美國眾議院議長裴洛西訪問台灣後，對台灣周邊海空域進行擴大軍事演習，不僅演習區域接近台灣的領海範圍，在第一天的飛彈試射中，還有一顆穿越台灣北部上空。而後續的海空訓練中，船艦數量也打破過去的慣例與規模，外國媒體形容為「第四次台海危機」。

在中共 2022 年的第二十屆全國黨代表會議中，習近平成功地延續第三個任期，並且排除其他派系成員進入政治局常委會，獨攬黨政軍大權。當全世界在二十大會議中看到習近平將前任總書記胡錦濤請出會場的畫面，讓中共內部權力鬥爭的實況具象化後，中共在二十大後的動向也成為各界注目的焦點。2022 年可能成為中國歷史的重要轉捩點。在美中兩強對峙和俄烏戰爭的世局下，習近平在第三任期有何重要政策；新冠疫情對策堅持「清零防控」，造成中國經濟及社會的重大衝擊，甚至引發遍地開花的「白紙革命」；科技進展則使其完成「天宮」太空站基本建設，朝「科技強國」邁進。以上種種現象顯示中國大陸情勢即使在二十大後，仍然呈現複雜多變的情況。

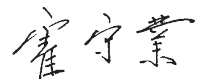
另在中國朝共產主義數位國家轉型之過程中，更需密切觀察其政治、外交、軍事、科技、經濟、社會等各領域之發展趨勢，依據紮實的研究成果，預作各種先期規劃及準備。本院出版《2022 中共政軍發展評估報告》，提出深入觀察與分析，以提供各界參考。

俄烏戰爭經驗充分表明，軍事劣勢一方藉由創意式運用現有科技，仍可對強勢一方形成威脅，並扭轉軍力不平衡態勢，贏得戰爭勝利。在本院的《2022 國防科技趨勢評估報告》中，對半導體的關鍵軍事技術，諸如

人工智慧、無人系統、精準彈藥、先進製造、擴增實境與軍用綠能等領域進行分析。由於當前軍事科技競爭係以「矽基技術」作為核心，台灣在半導體技術與產業上領先全球，加上在通訊電子領域亦有紮實的工業製造能力，這為台灣未來軍事科技研發提供了一個機會之窗。除說明其在軍事領域運用的潛能外，亦探討台灣相關產業能夠可以提供的支援，希望喚起各界對國防產業的重視，集思廣益提出合理方案，創新運用台灣有限國防資源。

本院自成立後，在國防部指導及院內同仁努力之下，已經奠定政策研究的穩固基礎。在 2022 年陸續完成有關俄烏戰爭及中共二十大的專題報告與系列特刊，並藉《台北安全對話》、《台北防衛對談》、《印度中國論壇》及與國內外國智庫交流當中，分享對俄烏戰爭及中共情勢的研究，成果堪稱豐碩。《2022 印太區域安全情勢評估報告》、《2022 中共政軍發展評估報告》、《2022 國防科技趨勢評估報告》更是本院同仁研究的精華所在。即使如此，內容難免疏漏，亦請各方先進不吝指正。

董事長



中華民國 111 年 12 月 16 日

摘要

本院著眼於科技發展趨勢攸關國防建軍與資源配置，自 2018 年起編纂《國防科技趨勢評估報告》，今年已經進入第五期。本期以〈適合台灣國防產業之關鍵軍事科技〉為主題，共八篇：依序分別為〈關鍵與新興軍事科技〉、〈人工智慧在軍事上應用〉、〈無人地面及水面／水下載具發展〉、〈精準彈藥與無人機〉、〈台灣 3D 列印的軍事應用評估與建議〉、〈作戰用沉浸式科技〉、〈體感科技的應用：教育與訓練〉和〈軍用綠能〉等論文。

國防事務除用兵之外就是造兵，國防自主是造兵之策，對當前軍事科技發展與中國對台軍事威脅考量後，造兵的方向就有了明確的指向，例如具遠距精準打擊能力的反艦與防空飛彈；善用我國高科技產業之優勢，有利於以資通訊科技為核心的無人載具之發展，也有利於發展雷達、通訊等電磁攻防系統，強化台海周邊的電磁屏障。

隨科技的發展戰場的規則也在改變，機械、數位科技的跨領域整合使得單位火力與速度都大為增加，相對的戰場物理空間也隨之改變，因此兵力的運用與以往就有很大的不同。例如冷兵器時代的部隊是以密集隊形構成方陣，火槍時代則以排為單位組成射擊梯隊，後膛槍成熟後則以散兵隊形為主，這都說明科技改變火力並進一步改變兵力的運用，進而使作戰型態不斷進行演化，儘管有些作戰態樣存在新瓶裝舊酒的意涵，有些軍事學說內容也存在部分重疊的現象。但是，這些新型態作戰卻有一個共同的特色——廣泛應用新興科技，具備高度科技化——因此，仍然值得關心國家利益與國防安全者給予更全面的理解。《2022 國防科技趨勢評估報告》的編輯構想即是依循此一理念安排，以期盡可能地涵蓋適合台灣的國防關鍵科技。

總結本期評估報告具有下列三項特色：第一，探討主題雖有侷限，未能含括所有軍事科技，但列舉的關鍵技術都是先進軍事國家關注與積極研

發的重要科技；第二，作者除本所既有成員外，亦有他所研究人員參與，撰寫過程中可交流意見擴大研究深度；第三，本年度的《國防科技趨勢評估報告》主題較先前更集中，主要聚焦在半導體技術可賦能的關鍵性技術運用。

各章論文的内容屬作者個人的見解，不代表國防部與財團法人國防安全研究院的立場，作者自負文責。

作者群

主編

蘇紫雲（國防戰略與資源研究所 副研究員兼所長）

翟文中（國防戰略與資源研究所 助理研究員）

作者

江忻杓（國防戰略與資源研究所 助理研究員）

吳自立（國防戰略與資源研究所 副研究員）

許智翔（中共政軍與作戰概念研究所 助理研究員）

舒孝煌（中共政軍與作戰概念研究所 副研究員）

翟文中（國防戰略與資源研究所 助理研究員）

劉姝廷（國防戰略與資源研究所 政策分析員）

劉翎端（國防戰略與資源研究所 政策分析員）

蘇紫雲（國防戰略與資源研究所 副研究員兼所長）

編輯與校對

賴達文（國防戰略與資源研究所 政策分析員）

專有名詞中英對照

一、報告 / 計畫 / 公約

《2017~2018 台灣 XR 產業白皮書》	2017-2018 White Paper of Taiwan XR Industry
2021 版國際能源管理規範	2021 International Energy Conservation Code, IECC
美國《2021 年 3D 列印半年報告書》	3D Printing Half-Year Report 2021
2019 版美國冷凍空調工程師協會建築能源效率標準 90.1	ASHRAE Standard 90.1-2019, Energy Efficiency Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Building
2045 戰鬥部隊	Battle Force 2045
《英國陸軍戰場電氣化方針》	Battlefield Electrification Approach
《英國國防部氣候變遷與永續戰略方針》	Climate Change and Sustainability Strategic Approach
《美國國防部氣候調適計畫》	Department of Defense Climate Adaptation Plan
《美國海軍 2030 年氣候行動計畫》	Department of the Navy Climate Action 2030
《新興軍事科技：提送國會的背景與議題》	Emerging Military Technologies: Background and Issues for Congress
歐洲防衛基金	European Defence Fund, EDF
2023 財年	Fiscal Year 2023

聯合國政府間氣候變遷專門委員會 六次評估之第二工作小組報告《衝 擊、調適與脆弱度》 《防衛省氣候變化戰略》	IPCC AR6 WGII ‘Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability Ministry of Defense Response Strategy on Climate Change
國家人工智慧發展戰略	National Strategy for the Development of AI
導航計畫 2022	Navigation Plan 2022
永久性結構防衛合作協定	PESCO
聚合計畫	Project Convergence
專家計畫	Project Maven
《美國軍用車隊電氣化法案》	S. 4380: Military Vehicle Fleet Electrification Act
海狼計畫	SeaWolf project
《美國 2018 年國防戰略摘要》	Summary of 2018 National Defense Strategy of The United States of America
人工智慧戰略摘要：運用人工智慧 促進安全及繁榮	Summary of the 2018 Department of Defense Artificial Intelligence Strategy: Harnessing AI to Advance Our Security and Prosperity
應對美國境內外氣候危機行政命令	Tackling the Climate Crisis at Home and Abroad
《2022 年聯合國科學報告》	United in Science 2022
《美國陸軍氣候戰略》	United States Army Climate Strategy
美軍《防砲年鑑》	US Air Defense Artillery Yearbook
美國國防部公用事業電表政策	Utilities Meter Policy
XM155 增程砲彈計畫	XM1155 Extended Range Artillery Projectile program

二、專有名詞與技術

3D 列印提供的新材料與製造機會	3D printing offers opportunities for new materials and manufacturers
主動防護系統	Active Protection System
積層 / 增材製造	additive manufacturing
積層製造	additive manufacturing
先進防衛裝備	advanced defense equipment
先進人—機戰鬥編組	advanced human-machine combat teaming
彈性戰鬥部署	Agile Combat Employment, ACE
下世代 AI	AI Next
人工智慧暨物聯網	AIoT
人工智慧	artificial intelligence
輔助人類操作	assisted human operations
擴增實境	augmented reality, AR
自動飛機	automatic airplane
自主深度學習系統	autonomous deep learning systems
電池儲能系統	Battery Energy Storage System, BESS
戰場覺知	battlespace awareness, BA
大數據分析	big data & analytics
生物科技	biotechnology
區塊鏈	blockchain
電腦輔助繪圖和製造工具	CAD and computer-aided manufacturing, CAD/CAM
電腦輔助設計	computer-aided design, CAD
造兵	developers
定向能武器進入新測試階段	directed energy weapons emerge from the testing phase
電力推進	electric propulsion

延展實境	extended reality, XR
法國空巴軍事應用系統	Fortion Tactical C2
未來創新機器人系統輔助工具	FUturs systèmes Robotiques Innovants en tant qu'OUtilS, FURIOUS
全球定位系統	global position system, GPS
石墨烯	graphene
鬼怪	Gremlins
自主載具的人機	human/machine
人一機協同	human-machine collaboration
高超音速航空器	hypersonic aircrafts
資通訊技術	ICT
沉浸式體驗	immersive experience
沉浸式科技	immersive technologies
機器人的擴大投資	increased spending on robotics
創新地圖	innovation map
整合式全電力推進	integrated full electric propulsion, IFEP
整合步兵戰鬥系統	Integrated Infantry Combat System, IICS
整合模組化無人地面系統	Integrated Modular Unmanned Ground System, iMUGS
綜合視覺增強系統	Integrated Visual Augmentation System, IVAS
軍事物聯網	internet of military things, IoMT
全領域指揮及管制	Joint All-Domain Command and Control, JADC2
大型無人水面艦	large unmanned surface vehicle, LUSV

低成本無人機蜂群技術	Low-Cost UAV Swarming Technology, LOCUST
忠誠僚機	loyal wingman
機器學習	Machine Learning
高超音速系統大幅進展	major advances in hypersonic systems
有人—無人團隊	Manned-Unmanned Teaming, MUM-T
微型無人機	micro drone
任務大師	Mission Master
任務模組	Mission Package
混合實境	mixed reality, MR
海上艦砲支援	naval gunfire support, NGFS
淨成形	net shape forming
網絡強化的半自主武器	network-enabled semi-autonomous weapons
不需人員船艦	No Manning Required Ship, NOMARS
新型機器人與自動化系統	Novel Weapons Robotics and Autonomous Systems
塑性成形	plastic forming
量子科技	quantum technology
尾部遙控套件	radio command link controlled tail-kit
快速成形	rapid prototyping, RP
可重組	reconfigurable
通訊與電子戰干擾的回歸	renewed focus on electronic warfare and communication jammers
負責任的人工智慧戰略和實施途徑	Responsible Artificial Intelligence Strategy and Implementation Pathway

機器人技術演示車	Robotic Technology Demonstrator, RTD
機器人與自主系統	robotics & autonomous systems, RAS
網路搜索量	searches
智慧蒙皮	smart skin
立體平板印刷	stereolithography apparatus, SLA
群組攻擊	swarm
遠端指導	telestrator
可信自主系統	Trusted Autonomous Systems
無人航空載具	Unmanned Aerial Vehicle, UAV
戰鬥無人機	Unmanned Combat Aerial Vehicle, UCAV
無人地面載具	Unmanned Ground Vehicle, UGV
無人操作掃雷系統	Unmanned Influence Sweep System, UISS
無人水面載具	Unmanned Surface Vehicle, USV
無人水下載具	Unmanned Underwater Vehicle, UUV
用兵	users
超大型積體電路	very-large-scale integration, VLSI
虛擬實境	virtual reality, VR
狼群	wolf pack

三、部門 / 單位 / 公司 / 組織

台灣人工智慧晶片聯盟	AI on Chip Taiwan Alliance, AITA
美國空軍作戰能源辦公室	Air Force Operational Energy
演算法作戰跨功能團隊	Algorithmic Warfare Cross-Functional Team
美國萊茵金屬車輛	American Rheinmetall Vehicle

未來司令部	Army Futures Command
聯邦政府建物節能設施	Assisting Federal Facilities with Energy Conservation Technologies, AFFECT
美國空軍實驗室 AR 維修計畫	Augmented Reality for Maintenance and Repair, ARMAR
貝宜系統	BAE Systems
布魯金斯學會	Brookings Institution
美國海軍分析中心	Center for Naval Analyses, CNA
自主系統的卓越中心	center of excellence, COE
美國國會研究處	Congressional Research Service
美國國防先進研究計畫局開放式製造計畫	DARPA's Open Manufacturing Program
國防運輸學院	Defence School of Transport
美國國防先進研究計畫署	Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA
美國國防先進研究計畫局	Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA
國防創新小組	Defense Innovation Unit, DIU
法國武器裝備總署	Délégation Générale pour l' Armement
美國內政部	Department of the Interior
美國防部主管研究與工程政策副次長	Deputy Under Secretary of Defense for Research and Engineering
法國軍備總局	Direction générale de l'armement, DGA
國防創新合作單位	DIUx
歐洲防務局	EDA
新興能力政策辦公室	Emerging Capabilities Policy Office

歐洲防衛科技與工業基地	European Defence Technology and Industrial Base, EDTIB
2022 年歐洲陸軍展	Eurosatory 2022
美國審計局	GAO
通用動力陸上系統	GDLS
通用公司	General Motors
喬治城大學安全及新興技術中心	Georgetown University's Center for Security and Emerging Technology, CSET
谷歌	Google
括綠色採購網路組織	Green Purchasing Network, GPN
關島電力局	Guam Power Authority
亨謝爾	Henschel
宏達電	HTC
地方政府永續發展理事會日本辦公室	ICLEI Japan
美國陸軍步兵學校	Infantry School
全球環境策略研究院	Institute for Global Environmental Strategies, IGES
聯合國政府間氣候變遷專門委員會	Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC
伊斯蘭國	ISIS
日本全球暖化預防推廣中心	Japan Network for Climate Change Actions, JNCCA
聯合 AI 中心	Joint Artificial Intelligence Center, JAIC
俄羅斯國防管理中心	national defence management centre, NDMC

美國國家再生能源實驗室	National Renewable Energy Laboratory, NREL
法國海軍集團	Naval Group
經濟合作暨發展組織	Organisation for Economic Cooperation and Development, OECD
奧什科希防衛	Oshkosh Defence
匡提科北美	QinetiQ North America
日本再生能源 100 宣言	RE Action
RE100 全球再生能源倡議	RE100
萊茵金屬	Rheinmetall
賽峰電子與防務	Safran Electronics & Defense
美國新創觀察	Start US Insights
社團法人台灣虛擬及擴增實境產業 協會	TAVAR
首席數位及 AI 辦公室	the chief digital and AI office, CDAO
美國陸軍裝備司令部	U.S. Army Materiel Command
美國全錄公司	Zerox

四、人名

金恩	Angus King
卡特	Ashton Carter
赫爾	Charles W. Hull
多納休	Christopher Donahue
川普	Donald Trump
馬基	Edward Markey
華倫	Elizabeth Warren
麥克米利上將	Gen. Mark Milley

小玉秀男

拜登

波特

艾斯培

廣野慶子

葛羅恩

基德

Hideo Kodama

Joseph R. Biden Jr.

Lisa Porter

Mark Esper

Mazie Hirono

Michael Groen

Richard Kidd

五、武器裝備

信天翁

安德羅梅德號獵雷艦

自主作戰戰士鼬鼠

戰象

旗手無人機

硫磺石反戰車飛彈

戰鬥機器人僚車

巡邏艦

CV-90 步兵戰鬥車

定向能武器

電力輕型偵察車

火蜂

獵狐犬輕型巡邏裝甲車

全系統原型車

飛刀炸彈

玻璃戰車

全球鷹

Albatros

Andromède

Autonomous Combat Warrior

WIESEL, ACW WIESEL

battle elephant

Bayraktar

Brimstone

combat robotic wingman

corvette

CV-90

directed energy weapons

Electric Light Reconnaissance

Vehicle, eLRV

fire bee

Foxhound

full-system prototype

Ginsu bomb

Glass Tank

Global Hawk

拳師犬	GTK Boxer
海馬士砲兵火箭	High Mobility Artillery Rocket System, HIMARS
格拉摩根號	HMS Glamorgan
與威爾斯親王號航空母艦	HMS Prince of Wales
伊麗莎白女王號航空母艦	HMS Queen Elizabeth
雪斐爾號	HMS Sheffield
高超音速武器	hypersonic weapons
步兵戰鬥車	Infantry Fighting Vehicle, IFV
豺狼偵察裝甲車	Jackal
標槍飛彈	javelin
KF51 豹式	KF51 Panther
豹 2	Leopard 2
殺傷性自主武器系統	lethal autonomous weapon systems, LAWS
烏克蘭坦克作戰系統	Limpid Armor AR
濱海作戰艦	Littoral Combat Ships, LCS
遊蕩武器	Loitering Munition
KF31/KF41 大山貓	Lynx
M2 布萊德雷	M2 Bradley
M1A2 主戰車	Main Battle Tank, MBT
歐洲主力地面作戰系統	Main Ground Combat System
德曼運輸卡車	Man SV
中型機器人作戰車輛	Medium Robotic Combat Vehicle
愛沙尼亞米爾倫	Milrem
北約通用車輛架構	NATO Generic Vehicle Architecture, NGVA
下一代戰鬥車輛	Next-Generation Combat Vehicle, NGCV

可置換組員作戰車輛	Optionally Crewed Combat Vehicle
可置換載人戰鬥車輛	Optionally Manned Fighting Vehicle, OMFV
虎鯨	Orca XLUUV
槍支輔助瞄準系統	PAWS
鳳凰幽靈	Phoenix Ghost
重標槍	pilum
精準導引彈藥	precision-guide munition
實體靶機	realistic target
死神	Reaper
粗鋸齒 M5	Ripsaw M5
機器人戰鬥車	Robotic Combat Vehicle, RCV
海獵人	Sea Hunter
大西洋搬運者號	SS Atlantic Conveyor
距外陸攻飛彈	Stand-off Land Attack Missile, SLAM
刺針飛彈	stinger
替代原型車	surrogate prototype
彈簧刀	Switchblade
德事隆	Textron
三叉戟級	Tripartite-class
45 型勇敢級驅逐艦	Type 45 Destroyer - Daring Class
第 1 無人水面船艇分隊	USDIV 1
機會船舶	vessels of opportunity
鼬鼠武裝載台	Waffenträger Wiesel
鼬鼠僚車	Wiesel Wingman

六、外交 / 軍事 / 戰略 / 安全名詞

空陸一體戰	Air-Land Battle
-------	-----------------

安多弗	Andover
區域拒止	area denial
聯邦政府建物節能設施	Assisting Federal Facilities with Energy Conservation Technologies, AFFECT
AR 遠距維修支援服務	Augmented Reality Remote Maintenance Support Service, ARRMSS
擴增實境沙盤	Augmented REality Sandtable, ARES
貝克營區	Baker Barracks
貝卡山谷之役	Battle of Bekaa Valley
紮馬戰役	Battle of Zama
360 度戰場視野	BattleView360
BEAM Global EV ARCBEAM 移動 式太陽能電動車充電站指揮、管 制、通訊、電腦、情報 / 監視、偵 察	command, control, communication, computer, intelligence/surveillance, reconnaissance C4I/SR
元件	component
概念設計	concept design
鈷鎳合金	Co-Ni
關鍵技術	critical technology
網路電子戰	cyber-electronic warfare
網路戰	cyber warfare
避免作戰行動相互衝突	de-conflicting operations
縱深打擊	deep strike
英國國防創新基金	Defence Innovation Initiative
分散式發電	Distributed Generation
純銅粉	DM Cu
統治者	Dominator

軍民兩用	dual use
格洛斯特公爵營區	Duke of Gloucester Barracks
避免重複打擊	duplication of effort
節約兵力	economy of force
可食用的巨量營養素	edible macronutrient
電動車	electric vehicles, Evs
最終地點	end location
最終使用目的	end use
最終使用者	end user
雙眼增強型夜視鏡	ENVG-B
主題爆發	Exploding Topics
外部性	externality
美國陸軍諾克斯堡	Fort Knox
燃料電池電動車	fuel cell vehicles
改變遊戲規則	game-changing
悍馬全電動車	GMC Hummer EV
抬頭顯示器	Head Up Display, HUD
抬頭顯示器 1.0	heads-up display version 1.0
油電混合動力車	hybrid vehicles
初始作戰能力	Initial Operating Capability, IOC
創新的樞紐	innovation hubs
情監偵	intelligence, surveillance, and reconnaissance, ISR
監視和偵察	intelligence, surveillance, reconnaissance, ISR
珍珠港—希卡姆聯合基地	Joint Base Pearl Harbor-Hickam
萊康菲爾	Leconfield
行動主軸	Line of Efforts, LOEs
低速量產	low-rate initial production

海軍陸戰隊奧本尼後勤基地	Marine Corps Logistics Base Albany
元宇宙	Metaverse
太空軍事	militarization
美國海軍陸戰隊米拉馬航空站	Miramar Marine Corps Air Station
	Miramar
任務保障設施	Mission Assurance Installation
動員戰力設施	Mobilization Force Generation
	Installation, MFGI
經濟加乘	multiplier
關島海軍基地	Naval Base Guam
零耗能建築	Net Zero Energy Building, ZEB
網路化武器	Network-Enabled Weapons, NEW
淨零排放	net-zero
新常態	new normal
非戰術車輛	non-tactical vehicles, NTVs
觀察，調整，決定，行動	Observe-Orient-Decide-Act loop,
	OODA
插電式混合動力車	plug-in hybrid vehicles
朴茨茅斯海軍基地	Portsmouth Naval Base
降低友軍誤擊	potential for fratricide
投射平台	Power Projection Platform
普羅米修斯計畫	Project PROMETHEUS
金牛計畫	Project TAURUS
公共利益	public interest
綠電使者	RE100/RE Action Ambassador
再生資源	Re-Source
環太平洋演習	RIMPAC
洛克營區	Rock Barracks
智慧電網	Smart Grid

太陽熱	Solar Thermal Energy
溢出效益	spill over
距外	stand- off
擬真	stimulate
超人	Superman
供應鏈韌性與創新	Supply Chain Resilience and Innovation
合成氣	Syngas
網路戰威脅增加	the growing threat of cyber-warfare
伊莉莎白女王級航空母艦正向物流中心	The Queen Elizabeth Carrier Forward Logistics Centre
終結者	The Terminator
熱電池	Thermal Energy Storage
第三次抵銷戰略	third offset strategy
增加及時攻擊目標的機會	timely manner
海上補給	underway replenishment
虛擬實境程式訓練器	VRPT
零耗能導向建築	ZEB Oriented
準零耗能建築	ZEB Ready
零排放車輛	zero-emission vehicle, ZEVs

七、度量衡單位

千伏	kilovolts, kV
度	kilowatt-hour, kWh
千瓩	megawatt, MW

目錄

序	i
摘要	v
作者群	vii
專有名詞中英對照	ix
緒論	1
第一章 關鍵與新興軍事科技	3
壹、前言	3
貳、關鍵與新興軍事科技類別	5
參、台灣產業與軍事關鍵科技的整合與連結	11
肆、小結	16
第二章 人工智慧的軍事應用	23
壹、前言	23
貳、中共及俄羅斯在 AI 技術的軍事運用	29
參、台灣 AI 技術的潛力	32
肆、小結	34
第三章 無人地面及水面 / 水下載具發展	35
壹、前言	35
貳、無人地面載具	35
參、無人水面與水下載具	42

肆、台灣的發展途徑	46
伍、小結	48
第 四 章 精準彈藥與無人機	49
壹、前言	49
貳、精準彈藥與無人機對台灣的價值	51
參、台灣產業與科技的鏈結	57
肆、小結	59
第 五 章 台灣 3D 列印的軍事應用評估與建議	61
壹、前言	61
貳、3D 列印原理優勢與法律問題	62
參、台灣產官學 3D 列印發展	67
肆、台灣 3D 列印的軍事應用	69
伍、小結	72
第 六 章 作戰用沉浸式科技	75
壹、前言	75
貳、XR 用於作戰	76
參、XR 用於後勤維保醫療	85
肆、台灣產業特性	87
伍、小結	89
第 七 章 體感科技的應用：教育與訓練	91
壹、前言	91
貳、我國體感科技產業的特性	92
參、一般教育的應用	94
肆、國防教育與訓練的應用	96
伍、軍種訓練的應用	98
陸、小結	100

第八章 軍用綠能	103
壹、前言	103
貳、軍事綠能應用之國際趨勢	104
參、台灣軍事綠能可發展方向	118
肆、小結	119
結論	121

表目錄

表 1-1	關鍵軍事科技類型與項目	9
表 1-2	軍事關鍵科技分類	10
表 1-3	軍事關鍵技術與我國戰略產業之關聯分析	14

圖目錄

圖 1-1	2020 年我國各製造業附加價值率	16
圖 6-1	XR 頻譜	76
圖 6-2	雙眼增強型夜視鏡 (ENVG-B) 系統	78
圖 6-3	戰術擴增實境系統 (Tactical Augmented Reality, TAR)	80
圖 6-4	綜合視覺增強系統 (Integrated Visual Augmentation System, IVAS)	81
圖 6-5	法國空巴全息戰術沙盒作戰系統	82

關鍵軍事科技的發展，結合台灣的六大核心戰略產業政策，可給台灣同時滿足國防與經濟需求的機會。軍事科技的發展經常引發作戰概念與戰爭型態的演變，而擁有優勢軍事科技的一方將可改變敵我既有相對兵力對比，取得軍事競爭優勢甚至改變現有戰爭運行規則，從而獲得戰爭勝利。因此，各國軍事部門都不遺餘力地從事新興科技研發，期能透過對這些嶄新軍事科技的運用，從而提升部隊戰力獲致軍事優勢，用以贏得戰爭確保國家安全。整個軍事歷史顯示，國家間的軍事競爭實質上就是科技的角力。例如，美蘇間的核武對抗可視為軍事技術競爭的最佳體現，為了取得優勢，雙方投入了大量資源俾能在技術領域取得相對優勢。在這種情況下，導航技術、隱匿科技、網際網路、偵測監視與核子動力推進等先進技術，獲得突破性發展並被運用於軍事領域，使得擁有相關技術者能夠獲得相對的軍事優勢，並對軍事戰略與作戰遂行形成了深遠的影響。另一方面，即使無法在關鍵軍事技術取得突破性進展，但是只要將現有的科技進行創意式的結合，仍可有效提升戰鬥效能在戰場上取得壓倒性的勝利。二次世界大戰期間，德國將戰車、無線電與俯衝轟炸機結合，發展出嶄新「閃擊戰」戰術即為最佳例證。

當前，諸多新興科技同時浮現，諸如5G、3D列印、大數據、量子計算、人工智慧、無人載具、擴增實境（Augmented Reality, AR）與綠能科技，這些技術當中有的已廣泛地運用於軍事領域例如無人載具，部分尚處研發階段仍需克服眾多技術瓶頸，例如量子計算。然而，這些新興技術在軍事領域的巨大潛力早已獲得各國軍方認可肯定，並且投入大量資金進行相關技術開發。在俄羅斯與烏克蘭衝突中，無人空中載具在情監偵、目標標定與對地攻擊等任務中，均展現出令人驚豔的作戰效能，並使處於劣勢的烏克蘭軍隊能夠對優勢的俄羅斯軍隊發起精準打擊。其他關鍵科技例

如人工智慧，這是未來最有可能改變作戰概念與戰爭型態的科技，其藉由高速的運算能力與分析技術，可大幅加快「觀察—調整—決定—行動」（Observe-Orient-Decide-Act loop, OODA）循環速度，技術劣勢一方只能被動進行回應，處於被動挨打不利態勢。目前，相關技術已廣泛地運用於指揮決策、反潛作戰與飛彈防禦等各領域，這項任務的有效遂行需要在短時間內處理來自不同感測器的巨量資訊，人工智慧完成了人類能力無法企及的工作。

尤其重要的，這些新興科技之間並非孤立存在的，它們彼此之間尚可互相影響形成「加乘效果」，形成一加一大於二的效果。因此，包括中國在內的許多國家對前揭各須科技的研發不遺餘力，期能在未來的軍事競賽中能夠取得有利態勢或是取得「彎道超車」目標。對台灣軍方言，若能有效掌握新些科技並將其運用於軍事領域，將可有效拉近兩岸軍力差距，化解兩岸在軍事力量上存在的巨大不對稱性。

在這份研究報告中，各篇作者對關鍵科技定義、精準彈藥、人工智慧、無人載具、3D 列印與擴增實境等技術，運用於軍事領域的運用進行評估。接著，則為文探討台灣在各個新興技術領域的現有能量與發展願景，評估這些關鍵技術未來適用國防建軍的可能性。長期以來，台灣在半導體領域具有強大的研發與生產能力，這項能力將成為未來軍事競爭的核心技術。由於人工智慧、無人載具與擴增實境的進一步發展，均與半導體脫不了關係，這使台灣軍方在建立軍事力量時獲得了一個「機會之窗」，若能妥善運用台灣在電子通訊產業的巨大潛能，則可在新一波的軍事科技競爭中取得相對有利態勢。

壹、前言

中共在 2022 年 8 月於台灣周邊的演習，企圖展現區域拒止，以及對台灣封控的能力，面對中共近年來在台海及南海日漸頻密的軍事行動，已對區域安全造成衝擊，面對直接且嚴峻的軍事挑戰，強化台灣的防衛力量就為當務之急。如同 110 年國防報告書所揭櫫「防衛作戰構想」，以不對稱作戰以及戰略持久為戰略核心，而具體的規劃是以既有的近岸濱海與灘岸防衛為基礎，同時強化向外延伸防衛縱深，並增加防衛固守韌性，也就是爭取防衛空間與時間，以總體戰力破壞敵軍作戰節奏，阻止其「快速奪取台灣、避免外力介入」的戰略企圖。因此台灣未來應持續發展遠距精準打擊能力之武器、提升網路電子戰（cyber-electronic warfare）能力，以掌握戰場規則的可能改變。

用兵之外就是造兵，國防自主是造兵之策，然而要如何「造兵」，則要以前述的戰略指導的「用兵」為基礎，此為戰略與資源的管理與配置。在考量前述的外部威脅與用兵指導思想，造兵的發展就有方向與重點，包含遠距精準打擊能力之反艦、防空飛彈；並善用我國高科技產業之優勢，有利於以資通訊科技為核心的無人載具之發展，也有利於發展雷達、通訊等電磁攻防系統，強化台海周邊的電磁屏障。

科技的發展也在改變戰場的規則，機械、數位資訊科技的跨領域整合使得單位火力與速度都大為增加，相對的戰場物理空間也隨之改變，因此兵力的運用與以往就有很大的不同。例如冷兵器時代的部隊是以密集隊形構成方陣衝擊，火槍時代則以排為單位組成射擊梯隊，後膛槍成熟後則以散兵隊形為主，這都說明科技改變火力並進一步改變兵力的運用。

* 國防安全研究院國防戰略與資源研究所副研究員兼所長。

具體觀察，以現代師級單位為例，美軍的作戰準則規範的作戰地境線在二次大戰時為 10 公里正面、40 公里縱深，現代的美軍師則為 40 公里正面、縱深則為 240 公里，¹ 師責任區的作戰空間由 400 平方公里增加為 9,600 平方公里，放大達 16 倍之多，主因就是單位火力與機動力的增加，使同一等級的部隊擁有更彈性的任務執行能力。進一步觀察，科技進步使精確導引彈藥越加精進，而類似精準打擊能力作戰計畫的關聯性就在節約兵力（economy of force）² 精確彈藥的重要性也可由 2012 年，歐洲防務局（EDA）委託進行的一項研究強調，「對精確度的需求已經增長，既要增加打擊對手的影響，又要避免友軍和非戰鬥第三方的傷亡。」³

同樣受惠於通訊技術進步的網路化武器（Network-Enabled Weapons, NEW）得以彌補瞄準階段的空隙，藉由發現、追蹤、接戰的整合將使目標處理較以往更快速，並能進行攻擊效果的評估。這也有助於避免作戰行動相互衝突（de-conflicting operations）、避免重複打擊（duplication of effort）、降低友軍誤擊（potential for fratricide）並增加及時（timely manner）攻擊目標的機會。⁴ 這都說明軍事科技對於作戰能力的關鍵地位與貢獻。

同時，滿足國防需求之外，造兵的資源投入也有助於國防經濟的發展。在發展國防自主產業的同時，由於相關的科技研發，以及原物料採購，善用其「溢出」（spill over）效益，可有效地帶動並輔導國內產業升級，進而活絡經濟，進一步來說，依照日本、歐洲等先進國家數據顯示，國防自主產業至少可產生 1.8 倍經濟加乘（multiplier）效益，以「潛艦國造」為例，若以首艦可能造價為 450 億元的估算，⁵ 約可產生 810 億元的

¹ William K. Freeman Jr., *A Study Ammunition Consumption* (Kansas: Fort Leavenworth, 2005), p. 13, <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA451782.pdf>.

² J. Sine, "Defining the 'Precision Weapon' in Effects-Based Terms," *Air & Space Power Journal article*, 2006.

³ P. Taal and V. Tsiamis, *Roadmap and Implementation Plan on Precision Guided Ammunition*, 2012. Available at: https://eda.europa.eu/news-and-events/news/2012/03/07/Roadmap_and_Implementation_Plan_on_Precision_Guided_Ammunition.

⁴ B. Koudelka, *Network-enabled Precision Guided Munitions*, 2005. Available at: http://www.au.af.mil/au/awc/awcgate/cst/bugs_ch03.pdf, accessed October 2018.

⁵ 此為公開資訊的可能造價，另造船的首艘造價成本通常較高，隨著學習曲線的積累，後續船艦的成本也將降低。張佩芬，〈台船 442 億潛艦訂單落帶〉，《工商時報》，2019 年 5 月 4 日，<https://www.chinatimes.com/newspapers/20190504000332-260511?chdtv>。

產值，而整體造船計畫的建造可提供船廠工作機會、煉鋼、閥件、航電、作戰系統等周邊產業鏈的技術升級等複合效益，此即為國防經濟的發展。因此針對未來戰場的關鍵裝備進行評估，將有利於結合台灣既有的產業科技與工藝，形成國防戰力與產業發展的正向循環。

貳、關鍵與新興軍事科技類別

一、戰場上的科技競爭

2022 年爆發的烏俄戰爭再次證明新科技在戰場上的價值，例如具代表性意義的無人機應用，包括土耳其提供的「旗手」（Bayraktar）軍規無人機，或各類民用無人機的運用，透過影像的直接傳輸，目標被鎖定與擊毀的畫面震撼人心，也使得無人機成為各方矚目的焦點。

然而無人機自第一次世界大戰末期間世以來，發展已超過百年，且在 1982 年貝卡山谷之役（Battle of Bekaa Valley），以色列便使用無人機擔任電戰誘餌以反制防空系統，⁶ 1991 年波灣戰爭之後美軍的無人機隊更加成熟，因此其運用與成熟其實是隨著電子科技的進步而更加茁壯，也就是說無人機作為載台，而其搭載的偵蒐、數據通訊、火控等次系統才是無人機的靈魂。

進一步來看，刺針（stinger）飛彈、標槍（javelin）飛彈等短程飛彈，以及後續投入戰場的 M-777 牽引榴彈砲、海馬士（High Mobility Artillery Rocket System, HIMARS）砲兵火箭等都不是新的武器系統，但一樣受惠於電子科技的進步，使其在觀測瞄準、定位、導引、飛行控制等能力，使其精準度與可靠度大幅提升。這都說明未來戰場的關鍵科技與武器，可予個別的裝備具備戰力組合的能力，如同積木可彈性配置出多元組合，也就是模組化的作戰能力。此種模組化的特性，除了前述精準彈藥的相互搭配外，透過數據網路的鏈結可發展出全新的戰術操作樣態，包括無人裝備的

⁶ Rebecca Grant, "The Bekaa Valley War," *Air & Space Forces Magazine*, June 1, 2022, <https://www.airandspaceforces.com/article/0602bekaa/>.

群組攻擊（swarm），以及「忠誠僚機」（loyal wingman）人員與自主載具的人機（human machine）混合編組遂行任務的全新作戰模式，這都亟須要人工智慧、數據鏈、通訊傳輸等科技的整合所形成的核心能力。

二、軍事關鍵與新興科技

一般對軍事關鍵技術（critical technology）的認知主要為戰場上的各類武器所展現的能力，如無人載具、精準彈藥、飛彈、戰機、船艦、相位雷達等有形的裝備作為代表之外，更重要的是若將這些武器進行拆解，其內載系統的科技應用才是真正的關鍵。進一步來說，武器內載系統的各個「次系統」（sub-system）包括感測器、控制系統、數據傳輸等跨領域科技的整合，而各次系統內所包含的「元件」（component）的科技含量與製造工藝（製程、材料等），乃至軟體程式、目標特性資料庫等就是關鍵技術與科技的真正核心。如同美國防部在 2018 年所發布的《美國 2018 年國防戰略摘要》（Summary of 2018 National Defense Strategy of The United States of America）中所認為「新商業科技將改變社會，以及戰爭特性」。⁷這也充分說明現代先進商用科技的進展，具有高度的軍用潛力，只需部分改良與強化就可以較低的成本轉為軍事用途。

因此對何謂軍事關鍵科技，可由相關機構的評估，觀察若干關鍵與新興科技的類型，而主要的代表性國家則為具軍事領先地位，且資料具透明性的美國為代表。

在進一步選擇代表性機構，首先是公部門，主要由軍事機構乃至具備開放性資料的美國國會研究處（Congressional Research Service）為代表，其次為私部門，可以商業研究機構，以及網路商情分析機構為代表。

⁷ Department of Defense, *Summary of the 2018 National Defense Strategy of The United States of America* (Washington, D.C.: Department of Defense, 2018), p. 3, <https://dod.defense.gov/Portals/1/Documents/pubs/2018-National-Defense-Strategy-Summary.pdf>.

（一）公部門觀點

美國防部在 2018 年所發布的《美國國防戰略摘要》，列舉六項關鍵軍事技術，選定六項關鍵軍事科技，包括人工智慧（artificial intelligence）、殺傷性自主武器系統（lethal autonomous weapon systems, LAWS）、高超音速武器（hypersonic weapons）、定向能武器（directed energy weapons）、生物科技（biotechnology）、量子科技（quantum technology），並認為此將確保美軍未來有能力作戰並贏得戰爭。⁸

而美國國會研究處於 2022 年 4 月對此趨勢進行跟進研究，並發布《新興軍事科技：提送國會的背景與議題》（Emerging Military Technologies: Background and Issues for Congress）就公開資訊進行評估，所列舉具影響力的軍事科技為基礎，並比較美國、俄國、中國在這些技術領域的發展，主要目的是作為國會審議國防部政策與預算之參考。⁹

由於美國會研究處的報告在撰寫過程，可諮詢政府官員、產業界、學術界人士，具有跨領域的研究彈性，因此其論點具有相當代表性，而在美國防部提出關鍵軍事科技 4 年後的 2022 年美國會持續追蹤，也等同進一步認定關鍵軍事技術的主要類別與項目至今仍可視為主要的發展趨勢與方向。

（二）私部門觀點

相較於政府部門的觀點，美國民間部門的評估也可作為對照參考，美國的各類智庫與企業界極為活躍，透過各種公開資料的綜整與交叉分析可看出主要趨勢。如美國具代表性的新創企業研究機構「美國新創觀察」（Start US Insights）藉創新地圖（innovation map）模式著手，過濾選定全球 1,036 家新創公司，以及擴大營業的類型與主攻科技項目，列

⁸ Department of Defense, *Summary of the 2018 National Defense Strategy of The United States of America*, Ibid., p. 3.

⁹ Kelley M. Saylor, *Emerging Military Technologies: Background and Issues for Congress*, Congressional Research Service, April 6, 2022, p. 1, <https://sgp.fas.org/crs/natsec/R46458.pdf>.

出十項軍事技術，包括人工智慧、先進防衛裝備如高超音速航空器與定向能武器（advanced defense equipment, hypersonic aircrafts, directed energy weapons ...）、機器人與自主系統（robotics & autonomous systems）、軍事物聯網（internet of military things, IoMT）、網路戰（cyber warfare）、沉浸式科技（immersive technologies）、積層製造（additive manufacturing）、大數據分析（big data & analytics）、5G 通訊、區塊鏈（blockchain）。¹⁰

另一指標為網路搜索量（searches）作為觀測，代表性機構為「主題爆發」（Exploding Topics）所進行，該機構主要是透過網路搜尋量與聲量進行深度的解析，以做出商業情報的分析。依照該機構的評估，指出六項值得關切的軍事科技，包括機器人的擴大投資（increased spending on robotics）、高超音速系統大幅進展（major advances in hypersonic systems）、網路戰威脅增加（the growing threat of cyber-warfare）、3D 列印提供的新材料與製造機會（3D printing offers opportunities for new materials and manufacturers）、定向能武器進入新測試階段（directed energy weapons emerge from the testing phase）、通訊與電子戰干擾的回歸（renewed focus on electronic warfare and communication jammers）。¹¹

（三）軍事關鍵科技的綜合評估

前述公私部門對於關鍵軍事科技的觀點，具有不同面向與涵蓋範圍，一般來說，私部門係被動地彙整市場動向與趨勢，傾向量化分析。而公部門則是基於戰場、部隊經驗所做的彙整，傾向質化分析，因此兩者綜合來看具有一定意義。這些機構所列舉的關鍵軍事科技可綜整如表 1-1。

¹⁰ “Top 10 Military Technology Trends & Innovations for 2022,” *Start US Insights*, August 28, 2022, <https://www.startus-insights.com/innovators-guide/top-10-military-technology-trends-2022/>.

¹¹ Josh Howarth, “6 Military Technology Trends to Watch (2022-2025),” *Exploding Topics*, August 10, 2022, <https://explodingtopics.com/blog/military-technology-trends>.

表 1-1 關鍵軍事科技類型與項目

私部門		公部門	
排序	美國新創觀察	網路關注數 (searches)	美國國防部 / 國會研究處
1	人工智慧	機器人	人工智慧
2	高超音速航空器與定向能武器	高超音速 (飛行) 系統	殺傷性自主系統
3	機器人與自主系統	網路戰	高超音速武器
4	軍事物聯網	3D 列印	定向能武器
5	網路戰	定向能武器	生物科技
6	沉浸式科技	通訊與電子干擾	量子科技
7	積層製造	-	-
8	大數據分析	-	-
9	5G 通訊	-	-
10	區塊鏈	-	-

依照表 1-1 所示，進行交叉比對方式，可以進一步歸納幾個類型：

1. **高度交集項目：**包括公部門與兩個私部門都認定之項目為高超音速系統、機器人、自主性武器。
2. **中度交集項目：**由兩個機構共同選定，可進一步分為：
 - (1) 公部門、私部門單一商業機構共同選定者為：人工智慧、定向能武器。
 - (2) 兩個私部門選定者：網路戰、3D 列印 / 積層製造、通訊技術。
3. **獨自選定項目：**

公部門：國防部獨自選定者為生物科技、量子科技。

私部門：美國新創獨自選定者為沉浸式科技 (AR/VR)、大數據分析、區塊鏈 (保密)。

這些機構不同的選定有所差異，一方面是機構屬性的不同，以及資料擷取方式的不同，加上表述方式的差異，例如對於雷射等定向能武器，美國國防部為單獨列出，但私部門的 Start US Insights 則將其歸為先進裝備總類中的一項，未單獨列為獨立項目。無論如何，這都可作為軍事關鍵項目定位的重要依據。

表 1-2 軍事關鍵科技分類

加權分類	科技項目
高度交集	高超音速系統
	機器人
	自主性武器
中度交集 (公部門 / 1 家私部門)	人工智慧
	定向能武器
中度交集 (兩家私部門)	網路戰
	3D 列印 / 積層製造
	通訊技術
單一選定 (美國防部)	生物科技
	量子科技
單一選定 (私人公司)	沉浸式科技 (AR/VR)
	大數據分析
	區塊鏈 (保密)

以前述高度交集的科技項目為例，個別技術的內涵意義可分述如後：

1. **人工智慧**：人工智慧在軍事的運用，可利用資料庫與運算能力強化情報、監視和偵察 (intelligence, surveillance, reconnaissance, ISR) 所需的軍事評估，進一步以自主武器系統結合機器視覺可強化安全管理並增強自主武器系統的能力，從而減少士兵傷亡風險。
2. **機器人與自主系統**：藉由 RAS 技術的整合，可以協助部隊提高戰場感知，降低作戰人員的風險。主要的應用是透過各類陸海空的無人載具用於協助部隊運輸降低士兵體力負擔，使其能更專注於作戰任務，同時用於戰場偵察可提高戰場感知，並可執行地雷排除、爆裂物處理等高風險作業。
3. **先進軍事裝備**：包括高超音速 (hypersonic) 飛行器、定向能武器 (directed energy weapons) 以及太空軍事 (militarization) 發展。同時，國防產業也將其目標調整為符合淨零排放 (net-zero)。透過軍用機的電力推進 (electric propulsion) 和氫燃料等電力能源投入作戰的技術投資促進了這一轉變。此外，國防研發機構正在

推進生物技術和納米技術的研究，用以製造自我修復裝甲（self-healing）。¹²

經由前述機構所列舉的關鍵軍事科技，具有相當的代表性，進一步歸納後可分為三大類 13 個項目，可作為具代表性的關鍵技術選項具有相對可信的依據，有利於進一步作為相關科技選擇與產業發展的重要參考。

參、台灣產業與軍事關鍵科技的整合與連結

同時，以台灣各類型產業的科技、生產、製造工藝觀察，具備前述關鍵軍事科技研發、製造的相當潛力。台灣擁有紮實的資訊、數位、各類製造業基礎，但多為代工模式缺乏系統整合，且技術分散於個別企業，此亦為發展軍事關鍵科技的挑戰所在。因此若由政府部門所提出的整合型產業著手，可較為清晰地觀察全貌。

一、戰略產業關聯性

總統蔡英文於 2020 年 5 月 20 日就職演說宣示，「推動資訊及數位、資安卓越、台灣精準健康、綠電及再生能源、國防及戰略、民生及戰備等六大核心戰略產業」，其後行政院訂定「六大核心戰略產業推動方案」並已於 2020 年 12 月 10 日准予備查，目的係在「5 + 2」產業創新的既有基礎上，掌握全球供應鏈重組先機，成為未來全球經濟的關鍵力量。¹³

而依照行政院的政策指引，六大核心戰略產業所指涉的技術項目則包括：

¹² “Top 10 Military Technology Trends & Innovations for 2022,” *Start US Insights*, op., cit.

¹³ 〈推動「6 大核心戰略產業」——讓臺灣成為未來全球機記得關鍵力量〉，《行政院新聞傳播處》，2021 年 1 月 18 日，<https://www.ey.gov.tw/Page/5A8A0CB5B41DA11E/a60cabcd-397e-4141-92ce-b8678bc8b2ca>。

1. 資訊及數位產業

- (1) 願景：推動台灣成為貢獻全球繁榮與安全的數位基地。
- (2) 策略：透過研發新世代半導體技術、擴大人工智慧暨物聯網（AIoT）應用場域，與整合國產 5G ORAN（開放網路架構）方案，以維持台灣資通訊（ICT）技術領先，並輸出 AIoT 解決方案及打入際電信設備及系統供應商。

2. 資安卓越產業

- (1) 願景：打造能被世界信賴的資安系統及產業鏈。
- (2) 策略：研發 5G、半導體等防護技術、開發 AIoT 及醫療等領域解決方案，並成立資安攻防及跨國合作機構，強化新興領域防護及打造高階實戰場域。

3. 台灣精準健康產業

- (1) 願景：建構台灣為全球精準健康及科技防疫標竿國家。
- (2) 策略：建置基因及健保巨量資料庫，開發精準預防、診斷與治療照護系統，發展精準防疫產品與拓展國際生醫商機，將防疫成功模式以台灣品牌推向全球。

4. 國防及戰略產業

- (1) 願景：推動國防自主，讓台灣成為全球航太船艦及太空產業重要供應鏈。
- (2) 策略：推動成立 F16 維修中心，建立軍機自主維修能量，並研發航太及船艦核心關鍵技術，完備國防產業供應鏈。太空產業將發展低軌道衛星及地面設備，行銷太空國家品牌。

5. 綠能及再生能源產業

- (1) 願景：打造台灣成為亞太綠能典範。
- (2) 策略：建構再生能源產業專區及研發基地、健全綠電參與制度，以及打造離岸風電國家隊，切入亞太風電產業鏈，讓台灣風電產業輸出國際。

6. 民生及戰備產業

- (1) 願景：建構足以確保關鍵物資供應的民生及戰備產業。
- (2) 策略：穩固五大供應鏈（能源自主、糧食安全、民生物資、醫療物資、救災及砂石水泥調度），並掌握半導體材料與設備、車用電池、原料藥及 15 項重要工業物資等關鍵原材料，確保關鍵物資自主供應無虞。¹⁴ 進一步看，所謂的關鍵原材料係指鋼鐵、製銅、製鋁、造船、機械、電機、汽車、通訊電子、食品、水泥、化工原料、橡膠、塑膠製品、日用品、航空，¹⁵ 而其中的金屬材料、電機、通訊電子等關鍵原料則與軍事關鍵科技相關。

由以上六大核心戰略產業以及相關策略所涉及的科技類別，依照與軍事關鍵科技的相關性區分為直接關聯的國防及戰略、資訊與數位、資安卓越三大類型，以及間接相關的綠電及再生能源、民生與戰備產業、精準醫療兩大區塊。可將其關聯性以下列表項進行說明。

透過此一關聯表可以更清晰地描繪出戰略產業與軍事關鍵科技的關聯性，也反映出台灣相關產業的潛力，若能予以系統整合，則相當有機會發展更具競爭力的國防產業，以滿足防衛需求並結合經濟發展。

¹⁴ 〈推動「6大核心戰略產業」——讓臺灣成為未來全球機記得關鍵力量〉，《行政院新聞傳播處》，2021年1月18日，<https://www.ey.gov.tw/Page/5A8A0CB5B41DA11E/a60cabcd-397e-4141-92ce-b8678bc8b2ca>。

¹⁵ 詹發冠，〈六大核心戰略產業推動方案〉，《國家發展委員會產業發展處》，2020年12月10日，頁10，<https://ws.ndc.gov.tw/Download.ashx?u=LzAwMS9hZGlpbmlzdHJhdG9yLzEwL3JlbGZpbGUvMC8xMzk3NS80MmE2ZjRkYS0xNGYxLTQ2ODktYmYyYi00YTJkZTEzOGZlOTUucGRm&n=MTA5MTIxMF8o6KGM5pS%2f6Zmi6Zmi5pyDKeWFreWkp%2baguOW%2fg%2balsOeVpeeUoualrS5wZGY%3d&icon=.pdf>。

表 1-3 軍事關鍵技術與我國戰略產業之關聯分析

我國六大戰略產業		美國律定軍事關鍵科技		備註
業種	項目	官方部門	私部門	筆者建議我方可能增列項目
國防及戰略產業	航太及船艦核心關鍵技術，國防產業供應鏈。低軌道衛星及地面設備		高超音速系統（中科院衝壓引擎具潛力）	奈米技術、匿蹤科技
資訊與數位產業	AI、5G 通訊、資通訊（ICT）	人工智慧、通訊技術、自主性武器、大數據分析	機器人、沉浸式科技（AR/VR）（部分民間公司具潛力）	低軌衛星通訊
資安卓越產業	資安攻防、新興領域防護、打造高階實戰場域	網路戰、區塊鏈（保密）	量子科技	我量子國家隊初期投入，含經濟部、國科會、中研院等
綠能及再生能源產業	再生能源產業專區及研發基地		定向能武器	微波武器（中科院投入初步研發雷射武器）
民生及戰備產業	半導體材料與設備、車用電池、原料藥及 15 項重要工業物資等關鍵原材料	3D 列印 / 積層製造		3D 列印
精準健康產業	建置基因及健保巨量資料庫，開發精準預防、診斷與治療照護系統	生物科技		

二、台灣科技產業的能力評估

台灣的數位、資工、精密製造等科技產業為我國的強項，而個別業種與企業的科技水準有不同評估方式，本文則以較通行的附加價值法作為觀測指標，則可以宏觀地瞭解台灣相關產業與具備先進軍事科技的國家之產業差距，有助作為發展相關軍事科技的指標參考。

依照行政院主計總處最新國情統計，「2020年我國製造業附加價值率32.3%，相較之下同年日本製造業附加價值率為36.8%，美國更高達41%，但我國產業的附加價值率逐年提升並超越韓國」。主計總處並指出，主要受惠於高階應用產品推陳出新等因素帶動。¹⁶

主計總處的統計進一步可看出「製造業所創造附加價值6兆3,221億元，各中業占比以電子零組件占41.0%最高，電腦、電子產品及光學製品占10.2%居次、化學材料及金屬製品則各占6.1%及5.6%；前十大中業附加價值率最高為電子零組件（46.0%），其次為金屬製品（34.2%）及塑膠製品（32.0%），至於基本金屬、化學材料、食品及飼品與電力設備及配備則因耗用原材物料比重較高，附加價值率相對較低。」¹⁷

由此一統計可以比較出，台灣電子零組件的附加價值最高，而電腦、電子產品、光學製品雖居於次要地位，但由產品屬性而言屬於系統整合型成品或半成品，在物件開發、生產、製造過程具有場景應用，軟硬體設計、整合等完整的研發能力，因此可視為發展軍事關鍵科技的基礎能力。

再由職司國家科技政策的國家科學與技術發展委員會所提出的2023年度施政計畫觀察，在「國防科技前延探索計畫」中，列舉「資電通訊與智慧化科技、關鍵系統分析與整合、前瞻感測與精密製造研究、尖端動力系統與飛行載具、先進系統工程研究、先進船艦及水下載具、先進材料與力學分析研究」等七大領域，¹⁸以及人工智慧、量子科技的科技發展方向來觀察，的確具有發展軍事關鍵技術的政策決心，而學界也具有研發潛力。

¹⁶ 綜合統計處，〈109年我國製造業附加價值率提高至32.3%〉，《國情統計通報》，第23號，2022年2月8日，<https://www.dgbas.gov.tw/public/Data/2281633345LG6L25T.pdf>。

¹⁷ 同前註16。

¹⁸ 國科會，《國家科學及技術委員會112年度施政計畫》，2022年，頁15-7，<https://www.nstc.gov.tw/nstc/attachments/202525da-5cd0-44b6-8696-d939cf486ea8>。

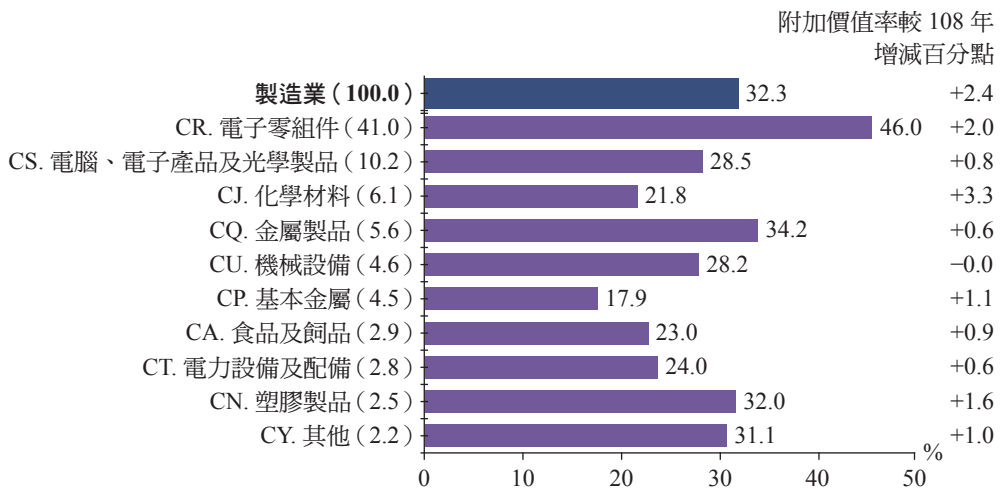


圖 1-1 2020 年我國各製造業附加價值率

資料來源：行政院主計總處。

肆、小結

一、不對稱戰力的組成

台灣面對強大的軍事威脅，以小搏大的情勢更需要善用國防資源以發揮最大的防衛效果。區域拒止（area denial）並非中國專利，冷戰時期的北約也面臨類似困境，而北約的軍事規劃便已提出應對方案「空陸一體戰」（Air-Land Battle）以縱深打擊（deep strike）能力，由敵軍前線後方阻絕蘇聯與華沙集團的入侵。進一步分析，依照近年各類飛彈發展評估，概可「區域拒止」的防空、反艦飛彈，以及「縱深阻絕」的攻陸型飛彈、自主發動攻擊的無人機等。也就是這些精準彈藥可以發揮「境外拘打一體」的戰術，防空反艦飛彈可以拘束進犯敵軍，縱深阻絕武器則可打擊敵方源頭，有利守勢的一方掌握區部優勢，創造防衛作戰有利態勢。現代的瑞典、挪威也是資源有限的小國，渠等防衛海洋的方式就是透過岸基反艦飛彈構成主要的阻絕區，在搭配水面小型匿蹤巡邏艦、潛艦共同構成局部的防衛性海權。

按照此一軍事思維，台灣在若干精準彈藥的發展也有一定基礎，包括各類防空、反艦飛彈、空對空飛彈的發展，而無人機則包括小型的紅雀、中型的銳鳶、大型的騰雲無人機之外，反輻射的劍翔無人機具有「遊蕩彈藥」（loitering munition）的特性，可設定在一定區域的空中梭巡，即使敵人雷達關機也可在空中來回等待尋找獵物，一旦敵人開機或露出電磁訊號就發動攻擊，使可藉戰術手段創造戰略彈性。

此外，傳統的「指揮、管制、通訊、電腦、情報 / 監視、偵察」（command, control, communication, computer, intelligence/surveillance, reconnaissance, C4I/SR），網路（cyber）已正式納入成為第五個「C」，發展為 C5I/SR。因此台灣的戰場管理能力須結合 IT 產業的利基發展，而國際趨勢上也有利於台灣此一建軍發展方向，其實台灣的製造業各類技術齊備，影像處理、無線傳輸、遙控機體設計製造等，民間廠商具備成熟能力，因此可快速發展此類戰具形成戰力。

二、進一步整合政策

相較他先進軍事國家擁有完整的軍事工業，具有完整的軍事產品生產能力，包括陸、海、空乃至太空載台，以及精準彈藥、網路電戰、通訊電磁等戰力的研發與製造生產，台灣能力相對有限因此更需要挑選關鍵軍事科技進行投資。

一般而言，美國、俄國、中國、法國等具有全系列軍備的研發生產能力可視為第一類型的軍備生產能力的國家，瑞典、日本、韓國、英國、德國具有主要軍備的生產能力，可視為第二類型的軍備生產能力的國家，以色列、瑞士、台灣、南非等則具有部分重要裝備的研發生產，可視為第三類型。

必須指出的是，第三類型國家或許不具有全線軍備的生產製造能力，例如僅生產戰甲車、船艦等，然而若干主要軍事裝備在其同類型裝備的領域也往往是佼佼者或具備重要代表性，例如日本的傳統動力潛艦以靜音能力知名，結合鋰鐵電池的新電力系統更使其水下戰力獲得矚目。

依照韓國外交部的數據顯示，韓國武器的出口額由 2016 年的 26 億美元，到 2021 年時已增至 73 億美元。而受到俄烏戰爭俄國武器制裁，預計 2022 年韓國有望獲得來自中東、歐洲、澳洲等地的大額訂單，出口總額預計將超過 100 億美元。¹⁹

台灣的優勢是擁有相對完整的製造產業鏈，包括數位、資訊工業、軟體產業、精密金屬等具有生產先進裝備的潛力。但不足處是缺乏積極的技術整合，而國防預算的投入尚屬有限，在此限制條件下使得台灣的產業優勢轉為軍事科技的效益仍有待加強。

同時，這也可由研發經費的投資作為觀察指標，台灣公私部門對於研發經費的投入也逐年增加，依照「經濟合作暨發展組織」（Organisation for Economic Cooperation and Development, OECD）的統計，以「購買力評價」（PPP）計算台灣 2020 年的研發投資達 479 億美元，高於以色列、新加坡、瑞士等規模相近的國家，²⁰ 但值得注意的是，依照經濟部統計處的統計，同樣以 2020 年我國製造業上市櫃公司資料顯示，製造業上市櫃公司研發費用加總為 5,090 億元台幣，年增 10.7%。但其中以台積電投入 1,086 億元居冠；聯發科投入 474 億元居次，瑞昱投入 153 億元居第三，也就是說台積電單一企業占整體製造業研發費用之 21.3%。²¹ 這說明我國研發經費的投入雖然增加，但高度集中在少數大型企業，反過來說就是研發能力呈現部分科技獨大現象，而其他科技項目的發展就可能失衡。

也就是強化政策整合，透過既有的行政單位編組，例如行政院「國防科技發展推行委員會（國推會）」由國防部副部長擔任召集人，經濟部、

19 〈歐美制裁俄羅斯 韓國武器出口可望破百億美元〉，《時報資訊》，2022 年 3 月 11 日，<https://tw.stock.yahoo.com/news/%E5%9C%8B%E9%9A%9B%E7%94%A2%E6%A5%AD-%E6%AD%90%E7%BE%8E%E5%88%B6%E8%A3%81%E4%BF%84%E7%BE%85%E6%96%AF-%E9%9F%93%E5%9C%8B%E6%AD%A6%E5%99%A8%E5%87%BA%E5%8F%A3%E5%8F%AF%E6%9C%9B%E7%A0%B4%E7%99%BE%E5%84%84%E7%BE%8E%E5%85%83-075143309.html>。

20 〈歷年主要國家研發經費〉，《PRIDE 資料庫》，https://pride.stpi.narl.org.tw/index/dashboard?type=INT_COMP&cdmId=2，檢索日期 2022 年 9 月 10 日。

21 經濟部統計處，〈產業經濟統計簡訊——製造業上市櫃公司研發費用逐年成長〉，第 380 期，2021 年 5 月 5 日，https://www.moea.gov.tw/MNS/dos/bulletin/Bulletin.aspx?kind=9&html=1&menu_id=18808&bull_id=8737。

科技部政務次長擔任協同召集人，下設「學術配合發展會報（學合會報）」及「產業合作發展會報（產合會報）」等方式，就國防所需選定裝備的優先順序，結合跨部會資源並投入合理的國防資源，如此必能快速地在關鍵軍事科技領域取得成果，並進而應用在各類精準彈藥、網電作戰，甚至各類載台的發展。

此外，國造武器具有「國防經濟」的效益，研究美日澳、北約等民主國家的國防產業，國防裝備的研發生產約可產生 1.8 倍的「經濟加乘」（multiplier）效果，主要在創造就業機會以及技術的「溢出效果」，因此在滿足國防需求的同時，也可兼顧經濟的發展效益。

三、強化科技與營業秘密保護

中共方面對他國的科技竊取、人力挖角不遺餘力，造成產業競爭、國家安全的嚴重威脅。以美國對中共的科技戰而言，白宮對中國威脅便已有全盤的戰略思考，且並非所謂的傳統地緣政治競爭、軍事安全層級，而是更深層的科技與經濟安全，因此形成對北京進行的全面戰略壓制。

舉例而言其實就是敏感科技與國家安全之間的重要評估。例如美國內政部（Department of the Interior）宣布停用中國生產的 800 餘架無人機，因懷疑其有電子間諜的風險，²² 可能將國土、資源測繪等資料外傳給未獲授權的特定網點。而涉及台灣方面，以眾所矚目的晶片產業而言，英特爾前執行長布萊恩（Diane Bryant）便憂心「萬一中國對台灣動手，台積電會如何？」美國防部主管研究與工程政策副次長（Deputy Under Secretary of Defense for Research and Engineering）波特（Lisa Porter）也公開主張「美國需重建晶片製造業」。²³

²² Timothy Puko and Katy Stech Ferek, "Interior Department Grounds Aerial Drone Fleet, Citing Risk From Chinese Manufacturers," *Wall Street Journal*, October 30, 2019, <https://www.wsj.com/articles/interior-dept-grounds-aerial-drone-fleet-citing-risk-from-chinese-manufacturers-11572473703>.

²³ Don Clark, "Pentagon, With an Eye on China, Pushes for Help from American Tech," *New York Times*, October 25, 2019, <https://www.nytimes.com/2019/10/25/technology/pentagon-taiwan-tsmc-chipmaker.html>.

因此相關機密的保守就至關重要，核心科技的發展也就決定國家競爭力以及軍事安全的關鍵。經濟利益、科技競爭、軍備競賽等形成的複合安全衝突，若以民主國家的科技保護，出口管制等機制的核心，主要為三大要素：最終使用目的（end use）、最終使用者（end user）、最終地點（end location）為基礎評估要件，因此考量衡平原則，可以思考下列做法以創造雙贏：

（一）政策管理與法體系

1. 完善科技管理體系的法制，並與利害關係人強化溝通。
2. 參考美國、日本等民主國家做法，給予業者、從業人員乃至學者完整的政策說明與指引。
3. 除國家安全的傳統說法外，導入「公共利益」（public interest）的概念，令其理解安全管理可深化客戶的信任，替企業開拓更廣泛的市場，以強化科技管制的正當性與說服力。²⁴

（二）強化資訊流安全

參考美國網路安全措施，建立「零信任資訊架構」（Zero Trust Architecture, ZTA），此源自於 2019 年 7 月，美國國防部的諮詢機構「國防創新理事會」（Defense Innovation Board）建議美國國防部以「零信任架構」成為物聯網時代的安全思維，²⁵ 其後美國總統拜登前於 2022 年 1 月 19 日簽署《國家安全備忘錄—改善美國防部、情報機構與國家安全系統之網路安全備忘錄》（Memorandum on Improving the Cybersecurity of National Security, Department of Defense, and Intelligence Community Systems），

²⁴ 蘇紫雲，〈從國外立法例看我國現有國防機敏商業設施、資料該如何保護 —— 民主國家敏感科技管理機制〉，《臺灣法學雜誌》，第 383 期，2020 年 1 月 14 日，頁 35。

²⁵ 吳俊德、蔡榮峰，〈國防產業安全〉，《2019 年國防科技趨勢評估報告》（台北：國防安全研究院，2019 年 12 月），頁 64。

正式將其納入作為網路安全政策，²⁶ 也另包括「網路模型成熟度認證」（Cybersecurity Maturity Model Certification, CMMC），以確保產業資訊流安全。

如此不僅能確保台灣產業競爭力、提高軍事防衛能力、也能促進台灣與美國、日本、民主國家的互信深化，連帶使相關技術合作更為深入而穩固，有助關鍵軍事科技的獲得與發展。

²⁶ The White House, *Memorandum on Improving the Cybersecurity of National Security, Department of Defense, and Intelligence Community Systems*, January 19, 2022, <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2022/01/19/memorandum-on-improving-the-cybersecurity-of-national-security-department-of-defense-and-intelligence-community-systems/>. 另感謝我國防部、整評司與相關參謀之專業意見。

第二章 人工智慧的軍事應用

舒孝煌*

壹、前言

人工智慧（Artificial Intelligence，簡稱 AI）被視為是繼火藥及核武之後的第三次戰爭革命。現今具備自主化操作的武器日益增加，地雷、導引飛彈等，可以算是自主化作戰的前奏，武器自動尋找並決定攻擊，其中沒有人類參與。¹ 雖然尚不算是真正的 AI、機器學習或深度學習，仍是依既有的程序進行操作。然而武器系統自動操作、蒐集並分析資訊、尋找目標並接戰的程度將日益增加，而人類在此一決策循環中的成分將逐漸減少，甚至完全不需參與。

無需人類決策參與，意味武器載台會更智慧化、更精確、更快速，可以學習新能力，機器與機器間可以團隊合作，並彼此分工，人類不僅不需花費時間操作這些機器，它們會自動協調動作並追隨人類隊友。自主武器可以挽救士兵生命，只瞄準敵人、避免誤擊友軍及平民；自主化的防禦系統能快速反應威脅。操作人員或指揮官只要下接戰指令就好。

一、AI 在軍事上的運用

AI 意指系統具備詮釋外部資訊，並從這些資訊中學習的能力，如同人類心智。近年來資料蒐集、電腦處理能力與設計演算法的進步，允許研究人員使用更有彈性的 AI 方法，即機器學習（Machine Learning）。在機器學習中，程式人員不編寫規則，機器會藉演算法，分析被賦予的資料並從中學習，例如提供數千張照片，電腦就會學習去連結圖像規則及物體名

* 國防安全研究院中共政軍與作戰概念研究所副研究員。

¹ Kai-Fu Lee, “The Third Revolution in Warfare,” *the Atlantic*, September 11, 2021, <https://www.theatlantic.com/technology/archive/2021/09/i-weapons-are-third-revolution-warfare/620013/>.

稱，而學習的準確度依賴提供的演算法及提供數據的種類。機器可在被監督的情況下學習，也可以直接在環境中學習。²

依電腦處理能力，AI 可分成四個等級，第一級是自動控制，程式設計師編寫程式，電腦只是執行指令，不算是真正的 AI。第二級是可以運用知識來探索推論，利用演算法將輸入與輸出資料進行排列組合，理解交待的規則並做出判斷。第三級是機器學習，電腦可根據輸入資料，自己學習規則，這包括搜尋引擎和大數據分析。第四級是深度學習，電腦能自行學習、發現規則並自行判斷。第三級和第四級的差別在於，前者的特徵值要由人類告訴電腦，後者則由電腦自己學習得到。³

近年 AI 大量運用在一系列應用領域，⁴ 在軍事上的運用也日漸增加，不過 AI 軍事運用主要是提升國防部的運作效能，強化競爭力，而非電影中描述的殺手機器人。由於軍事部門必需消化日益增加的訊息，需尋求更有效率及更全面的工具來處理大量數據，而以正確方式整合 AI，可以產生巨大的影響。

二、美國 AI 技術的軍事運用

（一）美國在 AI 上的發展

根據美國審計局（GAO）2021 年 4 月一份報告指出，美國國防部至少在處理 685 個 AI 項目，其中包括少數主要武器系統，其中大部分未被披露。⁵ 不過負責聯合 AI 中心的陸戰隊中將葛羅恩（Michael Groen）指出，目前美軍在運用 AI 上仍遭遇許多挑戰。

² Paul Scharre, “Killer Apps: The Real Dangers of an AI Arms Race,” *Foreign Affairs*, May-June 2019, p. 136.

³ 曲建仲，〈機器是如何學習與進步？人工智慧的核心技術與未來〉，《科學月刊》，第 593 期，2019 年 2 月 26 日，http://scimonth.blogspot.com/2018/03/blog-post_56.html。

⁴ Paul Scharre, “Killer Apps: The Real Dangers of an AI Arms Race,” *Foreign Affairs*, May-June 2019.

⁵ “AI Less about ‘Killer Robots,’ more about Pentagon Transformation, Groen Says,” *CAISRNET*, May 27, 2022, <https://www.c4isrnet.com/artificial-intelligence/2022/05/26/ai-less-about-killer-robots-more-about-pentagon-transformation-groen-says/>.

美國國防部一直在增加對新興技術的投資。為協調及加速資料、AI 及分析，美國國防部在 2021 年底成立一個「首席數位及 AI 辦公室」（the Chief Digital and AI Office, CDAO）辦公室，2022 年 2 月開始運作，2018 年時則成立聯合 AI 中心（Joint Artificial Intelligence Center, JAIC），⁶ 負責領導及發展 AI 戰略，加速提供 AI 的能力，將 AI 影響範圍擴大到全國防部，及同步至聯合部隊，以擴大其優勢。⁷「新興能力政策辦公室」（Emerging Capabilities Policy Office）也協助將自主化系統、極超音速技術、直接能武器，以及其他創新整合到國防戰略、計畫指導以及預算流程中。

美國參謀首長聯席會議主席麥克米利上將（Gen. Mark Milley）表示，AI、機器人及其他先進技術將會改變戰爭，美軍需要重組以應對未來戰爭。2018 年美國陸軍成立未來司令部（Army Futures Command）以推動現代化，而其他軍種也有自己的創新努力。現在的資訊科技使士兵以前所未有的方式感知其作戰環境，遠程精準武器也能準確摧毀敵人，加上 AI 對於加速戰場決策的潛力，無人載具及自主技術，都會徹底改變部隊及作戰方式。未來 10 年至 15 年，美軍現有的旅、師，艦隊等編制及部隊結構，都會發生變化。⁸

美國國防部多年前即在強調 AI 的重要，前助理部長鮑伯沃克（Bob Work）2015 年時指出這是第三次抵銷戰略（Third offset strategy）的核心，5 項關鍵技術領域包括自主深度學習系統（autonomous deep learning systems）、人—機協同（human-machine collaboration）、輔助人類操作（assisted human operations）、先進人—機戰鬥編組、（advanced human-

⁶ US DoD, *Summary of the 2018 Department of Defense Artificial Intelligence Strategy: Harnessing AI to Advance Our Security and Prosperity*, US Department of Defense, November 8, 2018, <https://media.defense.gov/2019/Feb/12/2002088963/-1/-1/1/SUMMARY-OF-DOD-AI-STRATEGY.PDF>.

⁷ US DoD, *Summary of the 2018 Department of Defense Artificial Intelligence Strategy: Harnessing AI to Advance Our Security and Prosperity*, US Department of Defense, November 8, 2018, <https://media.defense.gov/2019/Feb/12/2002088963/-1/-1/1/SUMMARY-OF-DOD-AI-STRATEGY.PDF>.

⁸ “US Military May Need Innovation Overhaul to Fight Future Wars, Milley Says,” *CAISRNET*, June 2, 2022, <https://www.c4isrnet.com/congress/2022/06/01/us-military-may-need-innovation-overhaul-to-fight-future-wars-milley-says/>.

machine combat teaming）、針對網絡（攻擊）和電子戰環境下以網絡強化的半自主武器（network-enabled semi-autonomous weapons）。⁹

美國國防部 2018 年公布《人工智慧戰略摘要：運用人工智慧促進安全及繁榮》（*Summary of the 2018 Department of Defense Artificial Intelligence Strategy: Harnessing AI to Advance Our Security and Prosperity*），定義「AI」為機器在執行通常需要人類智慧的任務，例如認知模式、由經驗中學習並得出結論、做出預測及採取行動，無論這是數位化或是使用自主化系統背後的智慧軟體。¹⁰

2022 年 6 月，美國國防部再公布《負責任的人工智慧戰略和實施途徑》（*Responsible Artificial Intelligence Strategy and Implementation Pathway*），¹¹ 目的在減輕隨著 AI 在軍事系統中使用日益廣泛而可能導致的意外後果，其中列出 6 項促進推動負責任 AI 的基本原則，包括負責任的 AI 治理、戰鬥員的信任、AI 產品和獲得的生命週期、需求驗證、負責任的 AI 生態系統和 AI 勞動力。這項文件將指導國防部 AI 道德原則的實施途徑，並以更廣泛方式推進負責任的 AI，並確保操作敏捷性、部署速度、提供可擴展性，並考慮資源的有效性。該內容尚包括現代化的治理架構，持續監督各部門對 AI 的使用，對系統操作者的熟悉以及信任，並運用需求驗證過程，確保利用 AI 的能力與作戰要求保持一致，並應對 AI 的相關風險。¹²

國防部首席數位及 AI 辦公室主任皮內利斯（Jane Pinelis）強調，人們錯誤地認為將 AI 融入決策程序後，人類扮演的角色將縮小，實際上

⁹ Bob Work, “Deputy Secretary of Defense Speech CNAS Defense Forum,” *US DoD*, December 14, 2015, <https://www.defense.gov/Newsroom/Speeches/Speech/Article/634214/cnas-defense-forum/>.

¹⁰ US DoD, *Summary of the 2018 Department of Defense Artificial Intelligence Strategy: Harnessing AI to Advance Our Security and Prosperity*, US Department of Defense, November 8, 2018, <https://media.defense.gov/2019/Feb/12/2002088963/-1/-1/1/SUMMARY-OF-DOD-AI-STRATEGY.PDF>.

¹¹ *U.S. Department of Defense Responsible Artificial Intelligence Strategy and Implementation Pathway*, U.S. DoD, June 2022, <https://media.defense.gov/2022/Jun/22/2003022604/-1/-1/0/Department-of-Defense-Responsible-Artificial-Intelligence-Strategy-and-Implementation-Pathway.PDF>.

¹² “Pentagon Launches Strategy for Responsible AI Implementation; Kathleen Hicks Quoted,” *GovCon Wire*, June 23, 2022, <https://www.govconwire.com/2022/06/pentagon-launches-strategy-for-responsible-ai-implementation/>.

在運用 AI 時，人的角色應該更加重要。¹³ 美國智庫「布魯金斯學會」（Brookings Institution）專家認為，國防部確保以合乎道德方式使用 AI 是一項良好開端，這有助於建立對 AI 技術的信任。AI 雖能提高效率及準確性，但廣泛採用也引進人類決策權被移轉至其他方面的憂慮，這項途徑將能有效建軍人及對其即將使用的技術間的信任，並制定一套全球規範。在「理想情況」下，不僅是美國盟邦致力負責任的 AI 技術，透過讓中共及俄羅斯參與有關道德 AI 的公開討論，可讓官員相信科學家所創造的事務能按預期方式運作。

2015 年美國國防部在矽谷建立「國防創新合作單位」（DIUx），加強與科技產業關係，由民間尋找先進技術，當時國防部長卡特（Ashton Carter）期許國防部成為「創新的樞紐」（innovation hubs）。¹⁴ 2017 年 4 月，美國國防部推動一項與谷歌（Google）合作的計畫，稱為「演算法作戰跨功能團隊」（Algorithmic Warfare Cross-Functional Team），簡稱「專家計畫」（Project Maven），以增加 AI 及機器學習在軍事上應用，設計演算法，運用大數據與機器學習技術，以減少分析大量無人機影像情資所需的人力，並更精準打擊伊斯蘭國（ISIS）恐怖分子。¹⁵

美國國防先進研究計畫署（DARPA）擬在 5 年內投入 20 億美元，推動「下世代 AI」（AI Next），解決狹義 AI 的侷限性，也增加 AI 安全研究經費。¹⁶ 「人工智慧戰略摘要」報告認為，AI 將會改變國防產業，並影

¹³ “Pentagon AI Roadmap seen Helping Build Warfighter, Public Trust,” *Defense News*, July 15, 2022, <https://www.defensenews.com/artificial-intelligence/2022/07/15/pentagon-ai-roadmap-seen-helping-build-warfighter-public-trust/>.

¹⁴ John Markoff, “Pentagon Turns to Silicon Valley for Edge in Artificial Intelligence,” *New York Times*, May 11, 2016, <https://www.nytimes.com/2016/05/12/technology/artificial-intelligence-as-the-pentagons-latest-weapon.html>.

¹⁵ Kelsey Atherton, “Targeting the Future of the DoD’s Controversial Project Maven Initiative,” *C4ISRNET*, July 27, 2018, <https://www.c4isrnet.com/it-networks/2018/07/27/targeting-the-future-of-the-dods-controversial-project-maven-initiative/>; James Vincent, “Google is Using Its AI Skills to Help the Pentagon Learn to Analyze Drone Footage,” *The Verge*, March 6, 2018, <https://www.theverge.com/2018/3/6/17086276/google-ai-military-drone-analysis-pentagon-project-maven-tensorflow>.

¹⁶ Paul Scharre, “Killer Apps: The Real Dangers of an AI Arms Race,” *Foreign Affairs*, May-June 2019.

響國防部的運作，其範圍涵蓋作戰、訓練、維持、部隊保護、招聘、醫療保健等，並加速作戰節奏。

另外，美國各軍種正合作發展全領域指揮及管制（Joint All-Domain Command and Control, JADC2）等方式，以確保美國的指揮管制及作戰決策優勢。JADC2 概念也將運用 AI 及機器學習技術，加快指管決策的節奏。由於 JADC2 概念的複雜，只有透過 AI 技術，才能實現 JADC2 中的「觀察，調整，決定，行動」（Observe-Orient-Decide-Act loop, OODA）循環，以 AI 改善其中資訊流的移動，以及網路結構的配置，因為它將十分複雜。¹⁷

美國陸軍從 2020 年開始，在沙漠中進行一系列「學習」實驗，以支持 AI 技術的電腦，在幾毫秒之內分析不同的感測器數據，可在敵人的決策周期之前更快速推薦射手，將目標速度更快傳至直升機、無人機、AI 電腦、地面裝甲車輛等，這是陸軍在 JADC2 架構下「聚合計畫」（Project Convergence）的一部分。這將能實現部隊聯網，以及快速的多領域打擊。¹⁸

至於在 AI 的運用限制，美國的國防創新小組（Defense Innovation Unit, DIU）提出 5 項原則，包括：1. 人類需對 AI 發展負責；2. 以慎重措施減少 AI 發展偏差；3. AI 發展需由相關人員瞭解技術、發展過程、操作、部署，包括透明及可審計的方法；4. 國防部的 AI 技術需有明確定義的任務，確保其安全、保障性及有效性；5. 確保 AI 實現預期功能，並具有檢測及避免意外後果的能力，包括解除及停止已部署系統的使用。¹⁹ DIU 也認為，由於技術的快速發展，美國對自動化武器的規則有必要重新思考。²⁰

¹⁷ “It’s Both AI Technology and Ethics that Will Enable JADC2,” *Breaking Defense*, December 24, 2020, <https://breakingdefense.com/2021/12/its-both-ai-technology-and-ethics-that-will-enable-jadc2/>.

¹⁸ “Army’s Project Convergence Is Bringing AI and Mini-Drones to the Battlefield,” *National Interest*, June 7, 2022, <https://nationalinterest.org/blog/buzz/army%E2%80%99s-project-convergence-bringing-ai-and-mini-drones-battlefield-202872>.

¹⁹ “Responsible AI Guidelines in Practice,” *Defense Innovation Unit*, March 2020, <https://www.diu.mil/responsible-ai-guidelines>.

²⁰ “Time is Now to Reconsider Autonomous Weapons Rules, Horowitz Says,” *C4ISRNET*, May 31, 2022, <https://www.c4isrnet.com/unmanned/2022/05/31/time-is-now-to-reconsider-autonomous-weapons-rules-horowitz-says/>.

貳、中共及俄羅斯在 AI 技術的軍事運用

中共與俄羅斯也在 AI 領域加大投資及發展，並視為是與美國競爭的利器。北京大學「國際戰略研究院」在 2022 年 1 月 30 日公布《技術領域的中美戰略競爭：分析與展望》報告，聚焦信息（資訊）、AI、航空航天（太空）等「美中技術競爭的三大代表領域」，指出美中技術脫鉤對中共資訊產業影響鉅大。在 AI 方面，中共應用領域已十分廣泛，但仍落後美國，而且 AI 人才多留在美國，也是中共發展 AI 產業致命傷。在航空太空領域，中共在許多技術上與美國沒有代溝，甚至領先美國，但報告認為，美國技術實力仍是全球領先，中共要成科技強國，仍有很長的路。美國在科技原創性、基礎研究的資金投入、科技人才、專利技術領域的分布、參與及主導國際標準的制定等方面，仍遠遠領先中共。而且中共在民航領域劣勢顯著，且難以透過收購企業等方式獲取核心技術。²¹

中共的 AI 技術心也有二大弱點，包括其 AI 體系本身的脆弱性，以及其「智能化戰略」完全依賴由美國設計、在台灣及韓國生產的 AI 晶片，這些先進產品的供應鏈無法確保，美國及盟國也採取多項措施，阻止中共軍工產業獲得先進晶片，並繼續擴大努力，打擊向中共軍工產業供應美國設備的第三方機構，以確保美國的技術優勢。²²

中共尋求至 2030 年成為 AI 技術的全球領導者，並視其為未來軍事及工業實力的關鍵。中共大量投資 AI 技術，與美國的投資額度已很接近。²³ 中共也嘗試運用 AI 技術獲得戰場優勢，2021 年，中共在模擬的空戰纏鬥中擊敗解放軍空軍飛行員。

21 〈技術領域的中美戰略競爭：分析與展望〉，《北京大學國際戰略研究院》，2022 年 1 月 30 日，http://cn3.uscnpm.org/model_item.html?action=view&table=article&id=27016。

22 “China Invests in Artificial Intelligence to Counter US Joint Warfighting Concept: Records,” *Breaking Defense*, November 10, 2021, <https://breakingdefense.com/2021/11/china-invests-in-artificial-intelligence-to-counter-us-joint-warfighting-concept-records/>.

23 “Challenges Facing DOD in Strategic Competition with China,” *GAO*, February 2022, <https://www.gao.gov/assets/gao-22-105448.pdf>.

喬治城大學安全及新興技術中心（Georgetown University's Center for Security and Emerging Technology, CSET）報告指出，解放軍希望藉 AI 獲得軍事優勢，發展方向包括自動駕駛車輛、預測性維護、資訊戰、導航，以及目標識別等項目；解放軍實驗室也在進行基於 AI 的目標識別及射控系統研究，這可能會用在致命性自主武器上。解放軍也強化對資訊戰及自適應雷達系統的投資，以干擾及致盲美國感測器及資訊網路，於降低與對抗美軍聯合作戰概念中的核心系統。²⁴

另外，亦有論文及教科書討論如何運用機器學習技術對抗美國的蜂群無人機技術，如「低成本無人機蜂群技術」（Low-Cost UAV Swarming Technology, LOCUST）及 X-61A「鬼怪」（Gremlins）無人機技術。²⁵

中共也嘗試以 AI 破解美國的 C4ISR 系統，如發展以小型蜂群無人機搭載微波偵察干擾或電磁武器等酬載，可飛入敵方領空並破解其戰場資訊系統，或是運用大量蜂群無人機作為遊蕩武器（Loitering Munition），由輕型戰術車輛或是直升機發射，例如中國電科發展的 CH901 陸空協同無人機蜂群系統。²⁶

俄羅斯同樣亦大力推動 AI 戰略，對軍方、國營事業、私人公司進行大量投資。2014 年，俄羅斯 AI 戰略獲得發展動力，當時俄國防部計畫至 2030 年時，將 30% 戰鬥力化為部分或完全自主。2016 年，俄「聯邦科技發展戰略」獲得批准，重點發展大數據、AI 及機器學習系統。2018 年，俄國防部、教育部及科學部發表關注創新及 AI 驅動解決方案的十點聲明；2019 年，俄羅斯政府發布「國家人工智慧發展戰略」（National

²⁴ Ryan Fedasiuk Jennifer and Melot Ben Murphy, "Harnessed Lightning: How the Chinese Military is Adopting Artificial Intelligence," *Georgetown University's Center for Security and Emerging Technology*, October 2021, <https://cset.georgetown.edu/publication/harnessed-lightning/>.

²⁵ "China Invests in Artificial Intelligence to Counter US Joint Warfighting Concept: Records," *Breaking Defense*, November 10, 2021, <https://breakingdefense.com/2021/11/china-invests-in-artificial-intelligence-to-counter-us-joint-warfighting-concept-records/>.

²⁶ "China Conducts Test of Massive Suicide Drone Swarm Launched From A Box On A Truck," *The Warzone*, October 14, 2020, <https://www.thedrive.com/the-war-zone/37062/china-conducts-test-of-massive-suicide-drone-swarm-launched-from-a-box-on-a-truck>.

Strategy for the Development of AI)。2021年，普欽再度表示，這年是俄羅斯在科技、經濟及社會進步獲得突破的科技年。

在俄軍現代化進程中，AI已被強調是將整合自主化及機器人武器系統視為優先事項。隨著最近普欽與習近平宣布中俄成為「無限夥伴關係」，並在烏克蘭及台灣問題上互相支持，俄並建議在烏克蘭戰事後，中俄間建立AI夥伴關係。俄羅斯的AI發展與其他國家不同，是由國營企業而非政府經營，國營的軍工企業Rostec正建立AI能力，目前在自主空中、水下、水面及地面領域，有150個AI系統處於不同的發展階段。

俄羅斯在技術現代化投資的不足，限制其「看到」戰場的能力，使其不得不依賴戰車及火炮等「火力」。AI是一項關鍵技術，更重要的是要瞭解如何嵌入相關技術，以及瞭解更重要的國際供應鏈的互賴。²⁷

俄羅斯發展AI面臨技術瓶頸，主要障礙是晶片，俄羅斯國防管理中心（National Defence Management Centre, NDMC）的運作基礎是Elbrus微處理器，但俄缺乏生產晶片的能力，因此均外包給台灣的台積電生產，目前台積電已暫停出口至俄羅斯。²⁸另外，俄國防相關產業約1,300家，均面臨人力短缺問題，俄烏戰爭也可能加速技術人才外流，而西方對關鍵技術及產品的制裁也將對俄經濟造成沉重打擊，即使俄能從中國大陸找到替代品。

俄羅斯在入侵烏克蘭時運用以AI為基礎的技術，除假訊息操作、深度造假以及開放情報蒐集外，在資訊管理、訓練、後勤、維護與生產，到預警及防空系統等，均大量運用AI技術。這些新的AI能力包括機器人武器、自動化戰車、無人機、高精準度的遠距打擊，也大力將AI用於軍事情報蒐集、C4ISR、後勤及自主化武器發展。俄運用Tu-22M3、Su-25、Su-27、Su-30戰機，及Ka-52攻擊直升機等，摧毀烏克蘭的軍事基地及關

²⁷ “What’s Happened to Russia’s Much-vaunted Battlefield AI?” *Australian Strategic Policy Institute*, Mar 31, 2022, <https://www.aspistrategist.org.au/whats-happened-to-russias-much-vaunted-battlefield-ai/>.

²⁸ “What’s Happened to Russia’s Much-vaunted Battlefield AI?” *Australian Strategic Policy Institute*, Mar 31, 2022, <https://www.aspistrategist.org.au/whats-happened-to-russias-much-vaunted-battlefield-ai/>.

鍵設施。但俄羅斯似未在衝突中運用任何致命的自主化武器系統。²⁹

美國海軍分析中心（Center for Naval Analyses, CNA）指出俄軍方技術比美國所意識的更為先進，也在迅速發展 AI 以獲得戰場資訊優勢。俄開發 AI 技術是由來自美國的威脅，以及在敘利亞及烏克蘭的持續衝突中記取教訓所驅動。該報告也提醒，俄的 AI 由政府資助，也缺乏強大國防工業基礎。不過俄軍的現代化會更加高科技及更加一體化。

參、台灣 AI 技術的潛力

台灣也在加快 AI 的研究與應用領域。「人工智慧科技基金會」2022 年 7 月公布，台灣在 2015 年後，AI 新創團隊大量增加，其中分布領域，主要在醫療及製造應用新創，占用極高比例。而由於電子商務成熟，行銷科技、零售、電商類新創產業也大幅成長。³⁰ 不過台灣 AI 發展亦有困境，包括缺乏驗證場域投入技術應用，企業及政府缺乏對資料認識，無法提供有效資料，政府開放資料也不合使用標準。AI 產品推出前需經數據蒐集、篩選與整理，再訓練演算法，反覆嘗試並予以調整，數據資料對 AI 發展至關重要，若不開放運用，不利 AI 產業發展。另外資料開放也牽涉運用問題，例如資料治理等。

在台灣發展 AI 優勢方面，工研院電子與光電系統研究所吳志毅所長認為，台灣 AI 若要更具國際競爭力，應回到半導體強項。現有雲端 AI 晶片雖然運算力強大，但過於耗電，也有安全顧慮，台灣可以投入發展邊緣運算 AI 晶片。由於 AI 應用產品如自駕車、消費型或工業用機器人、無人機、元宇宙等，AI 晶片將是發展重點。工研院已在 2019 年組成「台灣人工智慧晶片聯盟」（AI on Chip Taiwan Alliance, AITA），串聯 IC 設計、

²⁹ Sanur Sharma, "Russia's AI Enabled Military Ecosystem and Its Algorithmic Warfare," *Manohar Parrikar Institute for Defence Studies and Analyses*, March 16, 2022, <https://www.idsa.in/idsacomments/russias-ai-enabled-military-ecosystem-ssharma-160322>.

³⁰ 〈AIF 更新台灣 AI 生態系地圖 溫怡玲：軟硬整合跨域人才最欠缺〉，《科技網》，2022 年 7 月 21 日，https://www.digitimes.com.tw/iot/article.asp?id=0000640384_J1S27JU89KS7VO3MMAN6U。

封測、軟體、系統整合應用廠商，組成 AI 系統應用、異質 AI 晶片整合、新興運算架構 AI 晶片、AI 系統軟體等四個委員會，整合國內中小型 IC 新創公司，以壯大 AI 實力。³¹

近年由於新冠疫情爆發，企業為兼顧經營，可取代人力、減少人與人連結的無人機、無人系統、機器人、自動化設備等大行其道，其他減少接觸的智慧型辨識等系統也快速發展，連帶促使相關技術快速發展。相關技術都需具備學習能力的 AI 晶片，過去這些都置於雲端的大型電腦，運算能力雖強，但耗電、傳輸易延遲，隨著 5G 建置，電信業者發展開放架構，使得「邊緣 AI」系統成形，例如自駕車、即時辨識，有時需即時性判斷，若上雲端再回傳，傳輸速度延遲將可能造成危險，因此資料若能靠近邊緣直接運算，將可減少因延遲而造成的風險。³²

邊緣 AI 晶片需要省電、功耗低、傳輸快，計算能力不需像雲端大型電腦那般複雜，晶片類型也由通用轉向專用晶片。看好 AI 發展，台灣科技廠商也依自身技術優勢，紛紛布局諸如 AI、車用 AI 晶片、防偽處理、智慧家庭及智慧家電，甚至包括無人化系統及無人機等。不僅 IC 設計大廠如聯發科等投入邊緣 AI 晶片，中小型或新創廠商也發展自駕車用或工業用邊緣 AI 晶片等，這使得小型新創廠商即具備挑戰大廠的優勢。³³ 而且台廠具有供應鏈完整，上、下游整合的優勢，利於邊緣 AI 晶片發展布局。³⁴

在國防方面，中山科學院也在 2019 年即啟動「智慧國防」10 年計畫，整合 AI 人工智慧、物聯網、5G 網路技術、大數據分析等跨領域運

31 〈〈工業技術與資訊〉挖掘 AI 時代的台灣優勢〉，《工業技術與資訊月刊》，2022 年 3 月 13 日，<https://news.cnyes.com/news/id/4830653>。

32 〈【邊緣 AI 掀戰火】打破英特爾、超微寡占 台晶片廠重磅布局邊緣 AI〉，《鏡新聞》，2022 年 6 月 16 日，<https://www.mirrormedia.mg/story/20220608ind009/>。

33 〈【邊緣 AI 掀戰火 2】鴻海光寶台達電加持 耐能僅 5 年技術和英特爾並駕齊驅〉，《鏡新聞》，2022 年 6 月 16 日，https://www.mirrormedia.mg/story/20220608ind011/?utm_source=feed_related&utm_medium=yahoo。

34 〈【邊緣 AI 掀戰火 1】看準邊緣 AI 無所不在 聯發科深耕 4 年業績大爆發〉，《鏡新聞》，2022 年 6 月 16 日，https://www.mirrormedia.mg/story/20220608ind010/?utm_source=feed_related&utm_medium=yahoo。

用，當時資通所長林高洲表示，就我國國防需求而言，「智慧國防」重點在網路戰，以及敵情動態蒐集，以利準確預判敵人行動。另外資通所亦規劃，在現有研發能量上導入 AI 技術，使無人飛行載具具備感知、學習、決策與控制功能，並導入智慧物聯網（AIoT），發展無人機群集技術，透過 AI 自主合作，以完成自動偵蒐、打擊與防禦任務。³⁵

肆、小結

AI 技術已大量運用在國防上，包括能自主操作的智慧化武器，自動航行的無人化系統等，能與有人團隊搭配，真正減少人員負擔，而 AI 也將輔助新的 JADC2 指管系統，進一步簡化或減少決策循環中的人員因素，加快反應速度。

由於中共及俄羅斯也大量增長對 AI 在科技及軍事上的投資及發展，因此將有掀起 AI 軍備競賽的疑慮，為此，美國也同樣加速發展 AI 技術在軍事上運用。然而 AI 技術的運用也帶來自動武器能否自動接戰的疑慮，美國國防部已在研究如何強化及增進 AI 的道德限制，最新的《AI 實施途徑》將加入負責任的 AI 治理，進一步增加人類對 AI 的信任。

台灣科技產業雖已大量布局在 AI 軟體及硬體相關技術上，然而在軍事及應用方面的研究仍感缺乏，也較少應用計畫。目前中科院等單位已開始投入 AI 技術研發，啟動「智慧國防」計畫，未來應更強化如更為自主化的防禦性武器，具備 AI 技術的無人機或無人系統，運用邊緣 AI 晶片等技術，結合民間科技能量，發展具台灣特色的 AI 化國防武力。

³⁵ 〈中科院推智慧國防 10 年計畫〉，《自由時報》，2019 年 9 月 2 日，<https://news.ltn.com.tw/news/politics/paper/1314948>。

第(三)章 無人地面及水面 / 水下載具發展

許智翔*

壹、前言

近年來，無人航空載具（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）在各地戰場的活躍，使發展無人載具成為各國武裝部隊顯學。而除了 UAV 之外，各國競相發展的還包括無人地面載具（Unmanned Ground Vehicle, UGV）、無人水面載具（Unmanned Surface Vehicle, USV）以及無人水下載具（Unmanned Underwater Vehicle, UUV），可說未來無人載具將在各作戰領域中，都扮演關鍵地位。

值得注意的是，隨著技術進步，投入各種無人載具研發的國家，並不僅限於主要大國而已，更包含了非軍工大國的中小型國家，均紛紛投入研發，反映出無人載具的軍民兩用、科技新創特質。目前已能見到各國推出的大量研發計畫、原型或測試驗證用的系統，甚至已有部分裝備投入烏克蘭等戰場，進行實戰運用。故此，本章將挑選部分裝備，探討其趨勢與關鍵發展，及台灣可能的發展建議。

貳、無人地面載具

儘管技術與運用概念的發展成熟度不若 UAV，UGV 仍已成為各國陸軍未來建軍規劃中的一塊關鍵拼圖。正因如此，西方下一代作戰車輛、尤其是重型裝甲車輛的核心，逐漸走向整合「有人—無人團隊」（Manned-Unmanned Teaming, MUM-T）及「可置換載人」（Optionally manned）概念。而近年受到最高度矚目的，仍是已進行數年的美軍「下一代戰鬥車輛」（Next-Generation Combat Vehicle, NGCV）計畫。NGCV 包含 5 個子

* 國防安全研究院中共政軍與作戰概念研究所助理研究員。

計畫，其中與 UGV 高度相關的有二，分別是將取代「M2 布萊德雷」(M2 Bradley) 步兵戰鬥車 (Infantry Fighting Vehicle, IFV) 的「可置換載人戰鬥車輛」(Optionally Manned Fighting Vehicle, OMFV)，及搭配 OMFV、分輕、中、重 (L/M/H) 三種的「機器人戰鬥車」(Robotic Combat Vehicle, RCV)。OMFV 能如同傳統 IFV 般、由組員操作，亦可作為 UGV 加以運用，而三種 RCV 將搭配輕兵器到 120 mm 戰車砲等武裝，作為無人僚車協助 OMFV 與步兵作戰。

2021 年 7 月，OMFV 計畫選擇美國萊茵金屬車輛 (American Rheinmetall Vehicle)、貝宜系統 (BAE Systems)、通用動力陸上系統 (GDLS)、奧什科希防衛 (Oshkosh Defence)，以及 Point Blank Enterprises 等五團隊，進行 15 個月「概念設計」(concept design) 至 2022 年 10 月，並在 2022 年 7 月 1 日公布了為期 54 個月的第三階段 (詳細設計) 及第四階段 (原型車建造與測試) 的最終提案徵求。¹ 根據美軍規劃，預期 OMFV 將在 2027 年開始初始低速量產 (low-rate initial production) 階段，2030 年進入全速生產。²

值得注意的是，在 RCV 方面，儘管中型「RCV-M」計畫已研發出如德事隆 (Textron) 「粗鋸齒 M5」(Ripsaw M5) 等車輛進行測試，美軍仍決定延後「RCV-M」、先專注研發輕型「RCV-L」。2022 年 2 月 10 日，美軍宣布在「RCV-L」目前的「替代原型車」(surrogate prototype) 原型設計外，另讓「匡提科北美」(QinetiQ North America) 及「奧什科希防衛」進行「全系統原型車」(full-system prototype) 設計競爭；美軍希望藉此得到更多諸如士兵使用回饋、自主軟體、系統安全、網路與頻譜相關改進能力等測試結果，藉此協助整體 RCV 計畫，³ 這意味美軍將如

¹ Ashley Roque, "US Army Eyes OMFV Downselect in April–June 2023," *Jane's Defence Weekly*, July 6, 2022.

² Ashley Roque, "US Army Details Plans for 'Full and Open' OMFV Competition," *Jane's*, March 1, 2022, <https://www.janes.com/defence-news/news-detail/us-army-details-plans-for-full-and-open-omfv-competition>.

³ Ashley Roque, "US Army 'Defers' Robotic Combat Vehicle-Medium Fleet Development," *Jane's Defence Weekly*, May 4, 2022.

歐陸盟國般、先專注於較小車種的研發。儘管如此，就 2023 財年（Fiscal Year 2023）而言預算，美軍削減大量原先用於升級現有主力車輛的預算，以支應這些前瞻性計畫的支出，如 2023 財年用以將 M1A2 主戰車（Main Battle Tank, MBT）升級至 SEP V3 規格的經費，就僅有 6.56 億美元，而非美國國會通過的 11 億，⁴ 可見 NGCV 等針對未來戰場的研發計畫，仍受美軍最重視。除此之外，2022 年 10 月，GDLS 更以 M1 主戰車為原型，推出了「艾布蘭-X」（Abrams-X）技術演示車，同樣透過開放式的 KATALYST 次世代電子架構（Next Generation Electronic Architecture, NGEA），不僅易於持續螺旋升級其功能、快速強化戰力，更藉此整合了有人—無人以及地面與空中的各項資產，⁵ 儘管仍未能確定美國陸軍是否將採用此種 M1 戰車的未來升級構想，仍顯示了此種概念在現行主戰車輛的進一步發展上，將是必然。

歐陸在 UGV 發展上，是美國外的另一重鎮。「2022 年歐洲陸軍展」（Euroatory 2022）中，德國「萊茵金屬」（Rheinmetall）推出的「KF51 豹式」（KF51 Panther）MBT 設計時已融合 MUM-T，及「可置換載人」等概念，此種 MBT 著眼於取代現有的「豹 2」（Leopard 2）等系統，但若德法合作之「歐洲主力地面作戰系統」（Main Ground Combat System）計畫進度生變，則可能進一步成為原本歐製 MBT 用戶的未來選擇。⁶ 50 餘噸的 KF51 由先前「KF31/KF41 大山貓」（Lynx）IFV 進一步發展而來，其底盤運用了承襲自成熟的「豹 2」MBT 的變速、傳動、路輪、履帶等

4 Ashley Roque, “Dollars and Cents: US Army Outlines Multi-year Plan to Cut ‘Enduring’ Ground Combat Vehicles,” *Jane’s Defence Weekly*, May 31, 2022.

5 Tyler Rogoway, “AbramsX Next Generation Main Battle Tank Breaks Cover,” *The Drive*, October 9, 2022, <https://www.thedrive.com/the-war-zone/abramsx-next-generation-main-battle-tank-breaks-cover>.

6 目前德國「豹 2」MBT 用戶共有：德國、奧地利、加拿大、丹麥、芬蘭、希臘、匈牙利、印尼、荷蘭（惟已編入德國陸軍）、挪威、波蘭、葡萄牙、卡達、新加坡、西班牙、瑞典及瑞士等國，考量波蘭因烏俄戰爭與德國在援烏裝備「戒指交換」（Ringtausch）計畫產生摩擦，而決定自韓國引進 K2「黑豹」（Black Panther）MBT，並合作研發下一代 K3 外，其餘使用國仍有繼續採用德製 MBT 的可能性；此外，如考量法製「雷克勒」（Leclerc）MBT 亦有法國、阿拉伯聯合大公國及約旦等用戶，以及東歐各國仍有大量舊式俄製戰車的替換需求，KF51 實際上具備相當。

部分，然概念設計則已更進一步：配有發射箱、能運用情監偵（ISR）或徘徊式械彈（Loitering Munition，又稱「遊蕩彈藥」或「自殺無人機」）等 UAV 或飛彈。同時，以北約通用車輛架構（NATO Generic Vehicle Architecture, NGVA）為核心的全數位化作戰系統，讓「KF51」三名車組員中，任一名都能完全接手其他乘員的工作；⁷ 這種架構更使車體內的戰駕能完全操控砲塔，同時擔任車長與砲手，因此未來更可依此進一步發展無人砲塔，甚至 UGV 型。⁸

在 UGV 的研發方面，「歐洲防衛基金」（European Defence Fund, EDF）投資的共同 UGV 計畫「整合模組化無人地面系統」（Integrated Modular Unmanned Ground System, iMUGS）在 2022 年 6 月的系統演示中，以 3 輛愛沙尼亞米爾倫（Milrem）的 THeMIS UGV 協助比利時地面部隊與假想敵交戰。在這場技術演示中，THeMIS UGV 不僅廣泛提供多種頻譜的 ISR 支援，更展現提供壓制火力支援的能力，同時 UGV 所取得的情資數據可透過控制中心提供予戰場指管系統；此次演示，也顯示現有系統已能透過集群（swarming）方式，與人類組成團隊作戰。⁹

「iMUGS」的後續項目「iMUGS II」會進一步擴大規模、增加資金，然計畫將會延後 1 年以上的時間。當前的「iMUGS」由比利時、愛沙尼亞、芬蘭、法國、德國、拉脫維亞與西班牙等七國參與，並整合了米爾倫新式「Type-X」UGV 與挪威康斯堡（Kongsberg）的「Protector RT40」砲塔；後續的「iMUGS II」計畫，將可能投入 5 億至 15 億歐元的龐大金額，讓更多國家加入，並預期重心將置於自主能力，產製「戰鬥機器人僚車」（combat robotic wingman），欲讓每輛 MBT 或 IFV，都能得到 3 個至 5

⁷ 「KF51 豹式」使用萊茵金屬研發的新式 130 mm 滑膛砲、搭配自動裝彈機，因此不需裝填手。然砲塔內仍保留一個乘員的位子與空間，供武器系統專家（Subsystemspezialisten，可能操作 UAV 等）或指揮官運用。

⁸ Gerhard Heiming, “Weltpremiere des mittleren Kampfpanzers KF51 Panther,” *Europäische Sicherheit & Technik*, June 13, 2022, <https://esut.de/2022/06/meldungen/34795/weltpremiere-des-mittleren-kampfpanzers-kf51-panther/>.

⁹ Alexander Stronell, “Better together: EU’s UGV Programme Demonstrates Swarming Capabilities,” *Jane’s International Defence Review*, June 23, 2022.

個無人系統支援，更將嘗試研發「無人—有人團隊」（unmanned-manned teaming）的顛覆性概念，希望研發並尋找人類組員在無人系統指揮的情況下、如何在團隊中輔助無人系統的方式。¹⁰

而 UGV 搭配徘徊式械彈等各種武裝的運用潛力，近年已十分清晰。如德國萊茵金屬的「任務大師」（Mission Master）UGV，過往就曾搭配如波蘭的「Warmite」徘徊式械彈等，¹¹ 近年更裝載了 MBDA 的「硫磺石」（Brimstone）反戰車飛彈、¹² 達利思（Thales）的 70 mm 雷射導引火箭，¹³ 以及在「2022 年歐洲陸軍展」展出搭配以色列「Hero 120」徘徊式械彈等，¹⁴ 如加上原有的輕兵器等裝備，可預期類似的 UGV 將逐漸形成部隊的輕小火力投射平台。「任務大師」系統自 2019 年底起得到英軍青睞，購置 ISR、貨運，以及配備遙控武器站等多種車型測試，並實驗以單名操作員操作多輛的「狼群」（wolf pack）式操作。¹⁵

此外，UAV 研發大國以色列，在 UGV 的發展上自然也不會缺席。2022 年 5 月時，網路社群上曾出現以色列的不明 6 輪 UGV 照片，後來被證實是該國廠商的新式 UGV「BLR MK2」。¹⁶ 以色列國防部在 2022 年 6 月 13 日正式證實，並在「2022 年歐洲陸軍展」中展出，該車在展場上搭

¹⁰ Alexander Stronell, “‘iMUGS II’ to be Larger and Better Funded, but Delay Confirmed,” *Jane’s Defence Weekly*, July 8, 2022.

¹¹ “Rheinmetall Unveils Autonomous Mission Master UGV Armed with Warmate Combat Drone,” *Defense Post*, September 4, 2022, <https://www.thedefensepost.com/2019/09/04/rheinmetall-mission-master-autonomous-ugv-warmate-uav/>.

¹² Nicholas Fiorenza, “DSEI 2021: Rheinmetall Integrates Brimstone into Mission Master UGV,” *Jane’s*, September 17, 2021, <https://www.janes.com/defence-news/news-detail/dsei-2021-rheinmetall-integrates-brimstone-into-mission-master-ugv>.

¹³ Nicholas Fiorenza, “Rheinmetall Mission Master Qualified to Fire Thales Laser-guided Rockets,” *Jane’s*, April 13, 2022, <https://www.janes.com/defence-news/news-detail/rheinmetall-mission-master-qualified-to-fire-thales-laser-guided-rockets>.

¹⁴ Nicholas Fiorenza, “Eurosatory 2022: Rheinmetall Mission Master XT displayed with Hero 120 Loitering Munition,” *Jane’s*, June 16, 2022, <https://www.janes.com/defence-news/news-detail/eurosatory-2022-rheinmetall-mission-master-xt-displayed-with-hero-120-loitering-munition>.

¹⁵ Nicholas Fiorenza, “UK Orders Seven more Mission Master A-UGVs from Rheinmetall,” *Jane’s Defence Weekly*, May 4, 2022.

¹⁶ Colton Jones, “Mysterious Armed Robot Tank Spotted in Israel,” *Defence-blog*, May 6, 2022, <https://defence-blog.com/mysterious-armed-robot-tank-spotted-in-israel/>.

配了 UAV 發射器、回收工具、30mm 機砲、Elbit 的 Iron Fist 主動防護系統 (Active Protection System) 以及自主套件，可自主識別、計算、確定目標優先度與選擇合適接戰武器；「BLR MK2」定位將是車隊的前線平台，參與作戰與觀測等、作為「中型機器人作戰車輛」(Medium Robotic Combat Vehicle) 運用，此外亦將研發能發射集群式 UAV 之「UAV 航空母艦」衍生型。¹⁷

法國軍備總局 (Direction générale de l'armement, DGA) 在 2022 年 6 月，宣布授予「賽峰電子與防務」(Safran Electronics & Defense) 「未來創新機器人系統輔助工具」(FUturs systèmes Robotiques Innovants en tant qu'OUtilS, FURIOUS) 計畫合約，為乘車與徒步作戰人員研發創新機器人系統；此計畫目前的階段，仍專注於模組化軟硬體架構概念，確保能部署於不同 UGV 平台，並將其自主功能最佳化，如能在複雜、不穩定環境下追蹤、監控、自主目標歸向等。¹⁸ 澳洲近年也同時進行數個 UGV 的研發計畫，不僅由貝宜系統改裝 20 輛舊式 M113 AS4 裝甲運兵車為「可置換組員作戰車輛」(Optionally Crewed Combat Vehicle) 進行測試，¹⁹ 也授予了 Cyborg Dynamics Engineering 330 萬澳幣的合約，研發半自主的模組化輕型 UGV，以協助士兵作戰。²⁰

不過，近年發展亦顯示並非僅大國在研發無人載具。2022 年時，馬來西亞也展出了其自力研發的 4×4 UGV 「Kawbra」。這種 UGV 使用 48V/200Ah 鋰電池驅動、可運作 2 小時，使用更好的電池則可延至 4 小時，能讓士兵使用帶有 2 個螢幕與鍵盤的遠距操作站使用，而 UGV 本身

¹⁷ Alexander Stronell, "Eurosatory 2022: BLR Mk 2 Unmanned Ground Vehicle Breaks Cover," *Jane's*, June 14, 2022, <https://www.janes.com/defence-news/news-detail/eurosatory-2022-blr-mk-2-unmanned-ground-vehicle-breaks-cover>.

¹⁸ "Safran Receives FURIOUS Contract," *European Security & Defence*, June 23, 2022, <https://eurosd.com/2022/06/articles/exclusive/26672/furious/>.

¹⁹ "Autonomous M113 Variants Put to the Test," *Defence Connect*, November 19, 2021, <https://www.defenceconnect.com.au/land-amphibious/9116-autonomous-m113-variants-put-to-the-test>.

²⁰ Joe Saballa, "Australia to Invest \$2.4 Million in New Unmanned Ground Vehicle," *The Defense Post*, October 18, 2021, <https://www.thedefensepost.com/2021/10/18/australia-cyborg-unmanned-ground-vehicle/>.

可配備遙控武器站與各式感測器，時速達每小時 50 公里，能攜帶 400 公斤酬載。²¹

另外就台灣的主要威脅解放軍而言，其 UGV 發展與蓬勃的 UAV 相比，導入上相對較晚。也因此，中國陸軍使用 UGV 的性能與部隊規模等，相對十分受限。然而 2022 年 1 月，中國央視節目中展現了共軍使用「龍馬 2 號」UGV 的片段，這與整整 1 年前、同樣在一年之初發布的影片中展出中共陸軍運用 UGV 的片段相同。這種 8 × 8 UGV 最早在 2018 年珠海航展出現，有相當高的機動性與地形適應能力，時速可達每小時 50 公里，在道路上能持續行駛 200 公里、越野則為 100 公里，可攜帶達 1,000 公斤的有效籌載，及整合多種作戰模組運用。²² 也因此，UGV 在未來亦是台海防衛作戰中，需考量的敵人地面重要裝備之一。

必須注意的是，UGV 並不僅全是新設計，改裝舊式作戰車輛是另一種近年能注意到的可能發展，如中國早年就有測試淘汰的 59 式戰車進行遙控，未來有可能進一步投入運用。²³ 德國萊茵金屬在 2019 年美國陸軍協會年會（AUSA 2019），曾推出將「鼬鼠武裝載台」（Waffenträger Wiesel）改裝為 UGV 的「鼬鼠僚車」（Wiesel Wingman），²⁴ 更在 2021 年 10 月推出「自主作戰戰士鼬鼠」（Autonomous Combat Warrior WIESEL, ACW WIESEL）。後者可以用自主模式、按設定之航線行動，或可由操作手進行手動控制或遠距操作，可與萊茵金屬的各種車輛如「拳師犬」8 輪

21 “DSA 2022: Malaysian MoD Unveils New Locally-made Kawbra UGV Unmanned Ground Vehicle,” *Army Recognition*, March 28, 2022, https://www.armyrecognition.com/dsa_2022_news_official_show_daily/dsa_2022_malaysian_mod_unveils_new_locally-made_kawbra_ugv_unmanned_ground_vehicle.html.

22 “Chinese Army Uses New Dragon & Horse II 8x8 UGV Unmanned Ground Vehicle to carry ammunition,” *Army Recognition*, January 6, 2022, https://www.armyrecognition.com/weapons_defence_industry_military_technology_uk/chinese_army_uses_new_dragon_horse_ii_8x8_ugv_unmanned_ground_vehicle_to_carry_ammunition.html.

23 “How China is Using AI to Turn its Massive Type 59 Tank Divisions Into an Army of Lethal Combat Robots,” *Military Watch Magazine*, April 5, 2021, <https://militarywatchmagazine.com/article/how-china-is-using-ai-to-turn-its-massive-type-59-tank-divisions-into-an-army-of-lethal-combat-robots>.

24 Gerhard Heiming, “Wiesel Wingman-Lösung für Roboter-Kampffahrzeuge,” *Europäische Sicherheit & Technik*, October 14, 2019, <https://esut.de/2019/10/meldungen/industrie/16001/wiesel-wingman-loesung-fuer-roboter-kampffahrzeuge/>.

甲車（GTK Boxer）、「大山貓」族系（即 KF31/KF41 步兵戰鬥車）、或其 HX 系列大卡車整合。²⁵

貝宜系統也在 2022 年 5 月展出「機器人技術演示車」（Robotic Technology Demonstrator, RTD）的最新改良型；RTD 以 M113 裝甲運兵車底盤為基礎改裝，在 2019 年首次推出，更基於美國陸軍對 RCV-M 的需求、持續進行改良工作，而澳洲陸軍也將 M113 AS4 改裝為「可置換乘員作戰車輛」（Optionally Crewed Combat Vehicles），並在 2021 年開始測試。²⁶ 儘管這些以 M113 運兵車為藍本的车辆，主要用途仍在技術研發、測試、驗證、演示上，然同樣顯示了將被淘汰的舊式作戰車輛，在未來戰場上仍有重新擔綱重任的可能性。

參、無人水面與水下載具

在海軍作戰方面，USV 及 UUV 同樣在近年受到高度矚目，已有諸如「海獵人」（Sea Hunter）USV、「虎鯨」大型 UUV（Orca XLUUV）等各種較大的測試、技術驗證用系統逐步推出，不過仍可注意到，近年各國在相關領域實際投入運用的，仍以小型系統為主。

2022 年 7 月 26 日，「無人操作掃雷系統」（Unmanned Influence Sweep System, UISS）成為美國海軍第一種達到初始作戰能力（Initial Operating Capability, IOC）的 USV；這種無人小艇為反水雷戰任務模組（Mission Package）的一環，可從濱海作戰艦（Littoral Combat Ships, LCS）、岸上或其他可能的「機會船舶」（vessels of opportunity）上加以運用。²⁷

²⁵ “Autonomes Gefechtsfahrzeug ACW Wiesel Vorgestellt,” *Europäische Sicherheit & Technik*, December 13, 2021, <https://esut.de/2021/12/meldungen/31419/autonomes-gefechtsfahrzeug-acw-wiesel/>.

²⁶ Alexander Stronell, “BAE Systems Showcases Unmanned Vehicle Built on M113 Chassis at EDGE22,” *Jane’s Defence Weekly*, May 24, 2022.

²⁷ Michael Fabey, “US Navy Notes First IOC for Unmanned Surface Platform,” *Jane’s Navy International*, July 29, 2022.

對美國而言，無人艦艇的重要性從近年的發展觀之不言可喻。在美中競逐環境日趨強化的狀況下，自前總統川普（Donald Trump）時期開始，美國就視 USV 為對抗中國龐大海軍艦隊的重要途徑。在前國防部長艾斯培（Mark Esper）的「2045 戰鬥部隊」（Battle Force 2045）建軍計畫中，美國海軍就規劃於 2035 年至 2045 年間，艦隊兵力應從 355 艘傳統有人艦隊，進一步強化為包含有人與無人艦艇、共 500 艘的兵力。²⁸ 在 2022 年 7 月發布的「導航計畫 2022」（Navigation Plan 2022）文件中，仍可看到美國海軍對 2045 年的兵力規劃仍大抵維持此原則，將有 373 艘有人艦艇，以及 150 艘 USV/UUV，²⁹ 可見在美軍未來的作戰序列中，無人艦艇的重要性。也因此，美國國防高等研究計畫署（Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA）目前正進行「不需人員船艦」（No Manning Required Ship, NOMARS）計畫第二階段，將建造一條約 200 噸的中型無人水面艦（MUSV），以研究包含海上補給（underway replenishment）均不需要人力的方式，以及如何強化可靠度，包含發電、推進、機械配置與控制方式等，讓無人船艦能在所有天候、溫度與海象下長期執行任務。³⁰ 而美國海軍也投入巨資，選定 6 家廠商繼續研發大型無人水面艦（large unmanned surface vehicle, LUSV）；在美國海軍的構想中，LUSV 將介於 1,000 噸至 2,000 噸間、約為巡邏艦（corvette）的尺寸，應為低成本、高耐用性、「可重組」（reconfigurable）的船艦，可以攜帶多種模組化有效籌載、擔負不同任務，並且將重心至於反潛（ASW）與反艦 / 攻陸等打擊

²⁸ Megan Eckstein, “SECDEF Esper Calls for 500-Ship Fleet by 2045, With 3 SSNs a Year and Light Carriers Supplementing CVNs,” *USNI News*, October 6, 2020, <https://news.usni.org/2020/10/06/secdef-esper-calls-for-500-ship-fleet-by-2045-with-3-ssns-a-year-and-light-carriers-supplementing-cvns>.

²⁹ Sam LaGrone, “UPDATED: Navy’s Force Design 2045 Plans for 373 Ship Fleet, 150 Unmanned Vessels,” *USNI News*, July 26, 2022, <https://news.usni.org/2022/07/26/navys-force-design-2045-plans-for-373-ship-fleet-150-unmanned-vessels>.

³⁰ Nick Blenkey, “DARPA Moves to Next Phase of Unmanned Surface Vessel Project,” *Marine Log*, August 22, 2022, <https://www.marinelog.com/technology/darpa-moves-to-next-phase-of-unmanned-surface-vessel-project/>.

任務上，預計將配備有 16 管至 32 管的垂直發射系統（VLS），在必要時亦可配置船員。³¹

值得注意的是，近年在軍工上履有重大進展，尤其戰鬥無人機（Unmanned Combat Aerial Vehicle, UCAV）受到極高評價的土耳其，在推出多款武裝 / 非武裝的無人艦艇後，目前正研發宣稱可「改變遊戲規則」（game-changing）的 USV「MIR」。MIR 長 15 公尺，規劃將可用於水面、水下、電子、水雷與不對稱等各種領域的作戰任務，也能與該國 ASELSAN 生產，僅 7 公尺長、具集群操作能力的「信天翁」（Albatros）系列小型 USV 共同運用。研發單位宣稱這些 USV 將可「以共同思想」分擔、遂行指定的任務；在失去通聯狀況下，也能以自動駕駛及人工智慧完成任務，並透過各種不同的通聯方式，包含衛星通訊、4G LTE 等方式突破干擾、接收正確的定位訊號。³²

在 UUV 方面，繼美國推出「虎鯨」XLUUV 後，英國、澳洲等國也逐步在相關裝備上進行研發。英國在 2022 年第二季已進行了運用 MSubs S201 XLUUV 部屬 KraitArray 拖曳式聲納的能力，包含整合現有的通信與感測器系統、模擬水下目標並進行追蹤等。³³ 而在澳洲方面，主要投注於海底機器人系統的加拿大 Cellula Robotics 正與澳洲的「可信自主系統」（Trusted Autonomous Systems）合作，參與澳洲皇家海軍「海狼計畫」（Sea Wolf project）、建造以燃料電池驅動的 XLUUV。此系統初期將研發一個 12 公尺長的原型船體、以燃料電池動力系統推進，並具備兩個模組化的酬載艙，預計在 2022 年第四季或 2023 年第一季進行有限測試技術演示。³⁴ 目前，嘗試研發小型無人水上 / 水下船艦的國家其實不僅是西方大

³¹ Nick Blenkey, “6 Companies Win Navy Awards for Continued LUSV Studies,” *Marine Log*, July 31, 2022, <https://www.marinelog.com/shipbuilding/6-companies-win-navy-awards-for-continued-lusv-studies/>.

³² “Turkiye Develops New ‘Game-changing’ Unmanned Surface Vehicle (USV),” *Azernews*, July 7, 2022, <https://www.azernews.az/region/196482.html>.

³³ Dr. Lee Willett, “UK XLUUV Trials Demonstrate towed Array Sonar Deployment,” *Jane’s Navy International*, May 23, 2022.

³⁴ Oishee Majumdar and Nishant Kumar, “Cellula, TAS Partner to Develop XLUUV for RAN,” *Jane’s Defence Weekly*, May 31, 2022.

國與中俄，或近年在軍工上突飛猛進的土耳其等。事實上，如葡萄牙等中型國家都已投入無人船艇的發展，³⁵ 顯示了無人系統在未來海軍作戰領域中的關鍵性。

然而，儘管無人系統受到高度矚目、有包含前述項目的各種重要研發與投資，更被美軍認為是未來艦隊中的關鍵核心，然而其在未來作戰中、確實的角色與定位仍須進一步定義釐清。事實上，為加強評估未來 USV 在艦隊中的定位等工作，美軍於 2022 年 5 月 13 日在加州成立了「第 1 無人水面船艇分隊」（USDIV 1），其原因正是來自於美國國會對海軍構想的懷疑，因而美軍必須進一步進行測試、明確化其未來作戰角色與概念。³⁶

隨後，在 2022 年美軍年度環太平洋演習（RIMPAC）中，美軍同時投入了「海獵人號」、「海鷹號」（Sea Hawk）、「突擊兵號」（Ranger），以及「牧羊人號」（Nomad）等 4 艘 USV 以強化測試；透過將這些 USV 實際投入演習、攜帶有效酬載、提供情報，並在現實環境中收集數據、以評估無人船艦在大艦隊中如何發揮作用。³⁷ 顯見，儘管無人船艦在近年雖受各國重視，然而其在未來戰場上應該如何運用，及相對應的技術發展方向，仍需要進一步地透過測評與驗證加以最佳化。

值得注意的是，較小型且功能較單純的無人艦艇不僅在近年較有發展，近期在飽受戰火蹂躪的烏克蘭也已有實戰紀錄。2022 年 10 月 29 日，烏克蘭的無人自殺 USV 攻擊克里米亞塞凡堡（Sevastopol）的俄軍黑海艦隊基地，疑似擊傷該艦隊在「莫斯科號」（Moskva）巡洋艦沉沒後的新旗艦「馬卡洛夫海軍上將號」（Admiral Makarov）巡防艦；³⁸ 隨後，距離

³⁵ Victor Barreira, "Portugal Develops Armed USV," *Jane's Navy International*, July 12, 2022; Chinmay Kohad and Nishant Kumar, "WDS 2022: Chinese Shipbuilder Unveils New Unmanned Combat Surface Vehicle," *Jane's Defence Weekly*, March 23, 2022.

³⁶ Mallory Shelbourne, "New Navy Unmanned Division to Serve as Bridge Between Program Office, Fleet," *USNI News*, July 22, 2022, <https://news.usni.org/2022/07/22/new-navy-unmanned-division-to-serve-as-bridge-between-program-office-fleet>.

³⁷ "Four Prototype USVs Are Participating In RIMPAC 2022," *Naval News*, July 26, 2022, <https://www.navalnews.com/naval-news/2022/07/four-prototype-usvs-are-participating-in-rimpac-2022/>.

³⁸ "Sevastopol: Unmanned Surface Vehicles Hit Admiral Makarov, Flagship of Russian Black Sea Fleet," *Ukrainska Pravda*, October 30, 2022, <https://www.pravda.com.ua/eng/news/2022/10/30/7374125/>.

克里米亞約 100 英里的黑海港口諾沃羅西斯克（Novorossiysk），也傳出遭到 USV 攻擊的消息。³⁹ 近期由於烏克蘭戰爭為首的各地武裝衝突中，均可見各式無人載具的運用、活躍與改裝，相關戰例與戰訓也是近期值得高度注意的項目。

肆、台灣的發展途徑

從前面的敘述可以明白發現，當前不論在 UGV、USV 還是 UUV 上，近期各國發展多以嘗試研發 MUM-T 技術及專注較中小型的機種為主。由於台灣目前在無人載具上的運用，仍相對較不廣泛、大量。因此在研發上，初步仍應首先考慮無人 / 機器人系統優先重視的「3D」任務：骯髒（dirty）、無聊（dull）與危險（dangerous）之需求，研發相關系統並加以驗證。

以發展路徑而言，如同他國般首先投注於較小型、功能可能較為單一的輔助裝備減輕士兵負擔，降低國軍人力需求、將寶貴人力資源投注於關鍵領域上；在技術較為成熟後，可再進一步根據我國需求，規劃未來戰場角色。例如，面對中國龐大軍力，可將無人系統定位為火力投射平台以搭載，讓兵力有限的國軍可以藉更大火力「抵銷」（offset）共軍兵力優勢，或是在我國逐漸取得各種長程打擊武器的情況下，藉由此類無人系統協助進行情監偵（intelligence surveillance and reconnaissance）任務，及維持源頭打擊能力「擊殺鏈」等任務。

在產業發展面上，值得注意的是法國媒體在 2022 年 7 月的報導，海軍集團（Naval Group）預計投資 1.4 億歐元，在蔚藍海岸瓦爾省（Var）建立無人潛艦與水下防衛科技如武器與自主系統的卓越中心（center of excellence, COE），集中該集團的創新與策略量能、強化研發效率。⁴⁰ 事

³⁹ David Axe, "Ukraine's Drone Boats Are Winning The Black Sea Naval War," *Forbes*, November 20, 2022, <https://www.forbes.com/sites/davidaxe/2022/11/20/the-ukrainian-navy-has-no-big-warships-its-winning-the-naval-war-anyway-with-drones/?sh=4f6088fe4fc5>.

⁴⁰ 經濟部國際貿易局，〈法商海軍集團將在蔚藍海岸設立無人潛水艇卓越中心〉，《中華民國對外貿易發展協會》，2022 年 7 月 15 日，https://www.taitra.org.tw/News_Content.aspx?n=104&s=40950。

實上，歐盟在 2017 年啟動《永久性結構防衛合作協定》（PESCO）、及歐洲防衛基金（European Defence Fund）後，不僅逐步嘗試以共同投資等方式，集中強化「歐洲防衛科技與工業基地」（European Defence Technology and Industrial Base, EDTIB）在內的能量。

台灣事實上也有類似作為，如 2022 年於嘉義縣太保建立的「亞洲無人機 AI 創新應用研發中心」，集中研發、產製能量、進一步整合測試驗證、國際合作等方面，形成「無人機國家隊」以強化國防，並帶動民間相關產業發展。⁴¹

就技術層面而言，台灣民間並非不具備無人載具的能力。2022 年爆發的烏俄戰爭中，多款台灣生產的小型 UAV 也出現在烏國的作戰序列當中，如「澄森國際」（DroneVision）研發、可投下 60 毫米迫砲彈等火力的「Revolver 860」等；⁴² 而經緯航太等國內廠商在 UAV 外，更在 UGV 以及 AI / 自主等方向上，已有一定時間的技術布局，更已推出相關產品。⁴³ 前述廠商僅是舉例，事實上，台灣作為「科技島」，在無人系統、資通電子等科技設備上，其實民間科技產業具備相當強大的能力，在發展相關系統的時候，應可進一步整合公私部門的能量，加速研發與產製。

除此之外，無人載具本身具備極高度的軍民兩用特性，如就本章探討的地面與水上 / 水下系統而言，UUV 實際上就可協助包含鋪設海底電纜、進行科學研究等非軍事用途；UGV 在地面上，同樣具備多種運用潛力，如土耳其中部的電子公司「Elfatek Elektronik」就將開始大規模生產其貨

⁴¹ 葉素萍，〈蔡英文：打造無人機國家隊 完備國防產業供應鏈〉，《中央通訊社》，2022 年 6 月 15 日，<https://www.cna.com.tw/news/aip/202206150243.aspx>。

⁴² “Ukraine Army Using Taiwan-made Drones Vision Revolver 860 Combat Drones,” *Army Recognition*, August 19, 2022, https://www.armyrecognition.com/ukraine_-_russia_conflict_war_2022/ukraine_army_using_taiwan-made_dronesvision_revolver_860_combat_drones.html.

⁴³ 如澄森國際在 UAV 方面就已有諸如輪鼓式投彈 UAV「Revolver 860」、可裝備反裝甲火箭的「AR-1」四軸武裝 UAV、TR-2 長時間偵察 UAV 等系統，亦可客製化設計生產；而經緯航太則有包含「翼龍」（Pterosaur）手拋 UAV、「ALIAS」六軸保全巡邏 UAV、「ALPAS II」農用無人直升機，以及定翼的「天箭」（Sky Arrow）系列 UAV 等多種產品問世。前述產品除澄森國際的 UAV 已被用於烏克蘭戰場外，其餘產品也顯示其高度軍民兩用特性及軍事用途的潛力。“Turkey Set to Mass-produce Electric Cargo Unmanned Ground Vehicle,” *Daily Sabah*, May 22, 2022, <https://www.dailysabah.com/business/transportation/turkey-set-to-mass-produce-electric-cargo-unmanned-ground-vehicle>.

運用電動 UGV 「AKIBA」。這種 UGV 有酬載能力 100 公斤與 500 公斤兩種不同型號，可以透過自主或遙控等方式運作，並可在 2 小時充電後執行 12 小時任務，而「AKIBA」更是會掃描並繪製工作區域的 3D 地圖，並且經過電腦快速計算，可選出最短路徑以及閃避人類活動干擾；這樣的系統當然就可以在諸如工業領域、減少成本與降低工傷事故等層面上發揮效果。⁴⁴

因此，台灣在研發類似科技時，並不必然需要先以軍事用途為核心任務，來設計 UGV 系統。由於無人載具在未來必然將與人類社會的全新生活型態緊密相連，因此如何協助民間科技新創、拓展能力與市場，再反饋回到軍事運用領域，與國軍的作戰需求整合、研發出適合我國國土無人作戰裝備，亦不失為一種發展方式。

伍、小結

隨著各國逐漸開始投入無人載具發展，並一一取得突破，而台灣主要威脅來源的中國，更是 UAV 發展大國，這使得台灣也加緊腳步，在相關領域的技術與產業上投注心力。如從各國 UGV、USV、UUV 等方面的發展來看，其軍事運用在目前事實上都仍處於較初期的階段。這意味著台灣如能盡快投入此領域的技術研發與競爭，時間點仍不算太晚。

然而除了我國自身的科技研發之外，無人載具在戰場上能有效發揮作戰能力的重要關鍵，可能仍是對未來戰場的概念以及想像，如何評估未來戰場的態樣與特徵，才能精準地確認需求與科技的研發方向；而這必須透過對於科技發展脈動、各國對未來戰場與新型科技（emerging technology）的掌握與評估，以及近年戰例如烏克蘭對俄國入侵的抵抗等加以觀察。無論如何，從少子化等持續影響國軍戰力的角度觀之，無人系統的投入研發與運用，實在是我國迫切需要的關鍵裝備。

⁴⁴ “Turkey Set to Mass-produce Electric Cargo Unmanned Ground Vehicle,” *Daily Sabah*, May 22, 2022, <https://www.dailysabah.com/business/transportation/turkey-set-to-mass-produce-electric-cargo-unmanned-ground-vehicle>.

第四章 精準彈藥與無人機

蘇紫雲*

壹、前言

精準導引彈藥（precision-guide munition）與無人機（unmanned aerial vehicle），在技術特性以及科技的關聯性都可說是近親，如同美國海軍在1936年開發給防砲使用的「實體靶機」（realistic target），便直接影響飛彈的發展。¹

直接來說兩者為類型不同的飛行器，但最重要的核心都是通訊、導引的航電科技，結合目標獲得、資料數據鏈、衛星定位等科技來定位敵我雙方位置，再經由任務電腦解算航線，下令舵翼升降轉向、發動機調整空速。例如眾所矚目的俄烏戰爭爆發以來，美援武器發揮極大作用協助烏克蘭抵禦俄國攻擊，甚至有機會進行反攻。其中以精準打擊武器最具關鍵性，包括12套海馬士火箭系統、1,400多枚刺針防空飛彈、6,500多枚標槍反戰車飛彈、121多架鳳凰幽靈（Phoenix Ghost）與700多架彈簧刀（Switchblade）無人機、126門155公厘M777榴砲與25.6萬枚砲彈、3套魚叉飛彈系統，一般裝備則包括20架Mi-17直升機、數百輛悍馬車、200輛M113裝甲運兵車、7,000多支輕兵器與5,000萬多顆子彈、雷射導引火箭以及通訊與情報等非致命性裝備。以標槍飛彈為主的戰術精準彈藥而言，至少摧毀1,700輛俄軍主戰車、4,000輛其他戰鬥載具，²剝奪俄軍裝甲部隊的戰力，這可看出戰術精準打擊武器在防衛作戰中的高度價值。

* 國防安全研究院國防戰略與資源研究所副研究員兼所長。

1 Remote Piloted Aerial Vehicles, “‘The Aerial Target and Aerial Torpedo’ in the USA,” *Remote Piloted Aerial Vehicles*, https://www.ctie.monash.edu/hargrave/rpav_usa.html.

2 RadioFreeEurope, “Russia Has Lost 50,000 Soldier In Ukraine, U.K. Military Chief Says,” *RadioFreeEurope*, July 17, 2022, <https://www.rferl.org/a/31947401.html>.

人類戰爭史中，科技就以重要方式塑造戰爭型態，例如農業時代的冷兵器，青銅器、鐵器的材質與冶煉，都是科技的應用。而近幾個世紀以來，諸如火藥、內燃機的投入，得以新創動力鐵殼船和飛機等技術革新在戰場中發揮了決定性作用，都說明科技對戰爭的影響。

而非接觸戰的拋射型武器，提高射程與命中率更是人類使用武器以來便積極追求的目標，包括農獵或戰爭使用的弓箭，射手都在訓練中致力提高命中精度與命中率，當然也包括弩槍、拋石器，以及後續出現化學能推動的各類火器與火炮。但無論是機械能投射的弓箭，或化學能拋射的火器，早期都只能依照操作人員累積的經驗與有限的瞄準方式進行發射，命中率不足。此要至物理學、數學更發達之後才能發展出彈道學，以及更後期的光學照準等裝置，但命中率依舊有限。

主要原因在於傳統彈藥依照物理慣性前進，因此對於外界的風力、溫度、濕度等自然條件較為敏感，需依賴發射裝備的測量與射手操作經驗甚至直覺進行照準，若是面對動態目標則將更為困難，除非在環境控制下的測試才能依照設計的物理特性發揮精準度，而在戰場環境下武器精準命中的可靠性就受到嚴重影響。

而電子科技的發展帶來新的可能，二次大戰的真空管無線射頻科技，將雷達、通訊科技帶進戰場，也給德國、美國等軍事參謀與科學家帶來靈感，發射後具有彈道修正能力的武器陸續開發，以目視遙控的無動力滑翔炸彈作為先發，其後出現電視影像傳輸的導引炸彈也開始加入戰局，正式開啟「精準導引彈藥」的時代，但必須注意的是遙控行滑翔炸彈其實就是廣義無人機的一種。其後在越戰、中東戰爭、阿富汗戰爭、波灣戰爭各種精準導引彈藥越發成熟，種類也更為齊備。

更具意義的是戰術精準導引彈藥其實具備顛覆戰局的戰略意義，烏克蘭戰爭中著名的「標槍」（Javelin）飛彈，擊潰俄軍龐大的裝甲部隊就是一個例證，藉由較戰車砲更常的射程與射後不理的特性，重新改寫了步兵對抗裝甲部隊的可能性。而標槍飛彈的命名也是有趣的意涵，在羅馬時代的步兵方陣遭遇敵方戰象（battle elephant）衝擊就如同面對戰車一樣，因此苦思破解知道，而「紮馬戰役」（Battle of Zama），羅馬兵團依靠重標

槍（pilum）擊潰迦太基部隊的戰象，³ 因此現代的標槍飛彈命名也寓意此一效益。

精準彈藥在現代戰爭中的發展，以及隨著電子技術的進步，其可能改變戰爭規則的潛力。特別是在防衛作戰的型態下，防守方具有更大的地形優勢，得以讓精準彈藥發揮最大效益，並以較低的成本抵銷具有數量優勢的敵人，使防衛成功公算最大化。

貳、精準彈藥與無人機對台灣的價值

一、精準彈藥

依照美國防部的定義，精準彈藥是「一種旨在摧毀一個點狀目標並儘量減少附帶損害的導引武器，精確導引彈藥可以是空射和艦射飛彈彈、多管火箭和導引炸彈。這些彈藥通常使用全球定位系統（GPS）的無線電信號、雷射導引、使用陀螺儀的慣性導航系統（INS）—— 以來提高武器的精確度，其誤差一般小於 3 公尺（約 10 英尺）。」⁴

也就是說由狹義角度來說，精準彈藥應具備內建的導引裝置，不依賴慣性彈道且可調整飛行路徑以精準命中目標的能力作為其特徵。廣義而言，實際上由於科技的進步與跨領域應用，此一定義應可涵蓋更大範圍，也就是廣義來說可以包括砲彈（如銅斑蛇），以及無人機的使用都可包含在內。進一步說，筆者則認為可以採取性能特徵作為定義，例如具有移動能力且內建導引裝置的攻擊裝備也可，如此可將不具爆炸能力的動能擊殺武器也包含在內，例如俗稱「忍者炸彈」或「飛刀炸彈」（Ginsu bomb）的 RX-9 飛彈，本身沒有裝藥以限縮傷及無辜的可能，而是依靠彈體的鋼刀動能擊殺特定目標。

³ Harry C. Rol, "A Most Fateful Encounter: How Scipio Africanus Defeated Hannibal Barca at the Battle of Zama," *Student Research Submissions*, 110, https://scholar.umw.edu/student_research/110.

⁴ "Report to Congress on Precision-Guide Weapons," *USNI*, June 15, 2021, <https://news.usni.org/2021/06/15/report-to-congress-on-precision-guided-weapons>.

此外，提供命中率的另一產品線，不具導引能力，但發射載台具有精密計算能力可大幅提高命中率的「精準彈藥」（precision munition）也隨之出現，並能在短距離發揮低成本的打擊效果，例如現代主戰車的第一發命中率都超過 90% 便是代表性案例。但同樣受限彈藥本身僅能依賴慣性、缺乏中途彈道修正，因此較適合短射程以及持續火力壓制使用，以提供低成本方案。

最先實戰化加入戰場「距外」（stand-off）彈藥由德國於 1943 年推出，亨謝爾（Henschel）公司研發出 HS-239 遙控滑翔炸彈，藉由搖桿控制透過無線電遙控，⁵可由轟炸機投射，以目視方式遙控導引打擊 8 公里外的目標。此後，德國隨即在 1944 年推出 Hs-293B 型彈，採電視影像導引，射手可在發射載具接收影像並遙控，⁶是史上第一個電傳影像導引武器。盟軍方面則是由美國在 1943 年研發出 VB 系列導引炸彈，採無線電目視遙控，以 1,000 磅標準炸彈為主體，加上尾部遙控套件（radio command link controlled tail-kit）便成為導引武器。⁷

二、無人機的戰場運用

實際上，無人機在戰場上已不是新面孔。英軍在 1917 年發展第一架無人機，美國也在同一時段的 1916 年至 1917 年間開發無人機，稱為 Hewitt-Sperry「自動飛機」（automatic airplane）甚至被認為是巡弋飛彈的雛形，⁸再次說明無人機與精準導引彈藥的血緣關係，美國海軍也在 1920 年代開始使用遙控靶機。戰場實用化的開始，德國在二次大戰推出的 Hs-239 遙控滑翔炸彈，以及美軍的 VB 導引炸彈，兼具精準彈藥與無人機的共同特徵。此類 1940 年代問世的裝備，藉由無線電遙控，由轟炸機投射

5 “Hs 293 A-1 Missile,” *The National Air and Space Museum*, https://airandspace.si.edu/collection-objects/missile-air-surface-henschel-hs-293-1/nasm_A19840793000.

6 Michael Raska, “The Development of Precision Guided Munitions, Nanyang Technological University,” p. 10, https://www.michaelraska.de/research/PGM_History_M_Raska_2012.pdf.

7 Michael Raska, *ibid.*, p. 11.

8 Bipin Dimri, “The Hewitt-Sperry Automatic Airplane: The First Cruise Missile?” *Historic Mysteries*, <https://www.historicmysteries.com/hewitt-sperry-automatic-airplane/>.

再以電波遙控導引方式打擊遠程目標，遙控飛行炸彈外型如同小型飛機，可視為廣義的無人機參戰的鼻祖，以 1940 年代的技術水準可說相當不易。

此後，更具代表性意義的是德軍推出可自主飛行的 V-1 巡弋飛彈，等同是一架小型飛機。依照公開資料可推估其飛行控制系統雖然為機械化類比設計，以空速齒輪計算速度、加上計時器就可獲得航程，再以高度計、機械羅盤等構成飛航控制的全系統，再依照設定的航程自動飛行，抵達預定的目標區後，高度計啟動自行俯衝攻擊，依照統計德國成功的向倫敦施放超過 1 萬枚的 V-1 巡弋飛彈，等同是現代巡弋飛彈、自殺攻擊無人機的開山鼻祖。

如同德國的噴射機、夜視系統、新式柴電潛艦、V2 彈道飛彈等創新武器後續廣為各國使用，德國在飛彈的發展所引導出的無人飛行器技術，自然也成為各軍事強國的參考範例。

二戰後美軍發展出 BQM-34A「火蜂」(fire bee) 無人偵察機，並投入越南參與實戰，而國小人少的以色列，加入更多的創新概念發展無人機，在 1982 年的貝卡山谷戰役期間，以色列無人機結合新電子技術發展新戰術，包括電磁偵測、干擾等手段，成功壓制、癱瘓敵方防空雷達系統，再以正規戰機進行攻擊，大舉掌握制空權獲得勝利。

後續 1990 年代波灣戰爭後接連推出 MQ-4 全球鷹 (Global Hawk) 大型無人機，可以滯空 24 小時以上，此一無人飛行平台大獲成功可說是劃時代裝備，由於長時間的飛行能力，可以扮演大氣層內機動衛星的角色執行監控等任務。隨後推出的 MQ-9「死神」(Reaper) 無人機，除監測設備後也結合攻擊火力，可深入戰場支援地面部隊作戰，甚至執行精準斬首行動。

相對地，國力有限的國家對無人機也寄予厚望，代表性案例就是伊朗對沙烏地的攻擊行動，2019 年 9 月 4 日伊朗以無人機與部分巡弋飛彈，精準擊中沙烏地的煉油廠的儲油槽與煉油設施，造成全球油價的動盪，可以被視為低成本卻具高效益的攻擊手段。⁹

⁹ 蘇紫雲，〈無人機國防應用與產業機會—創新戰場規則的顛覆之戰〉，《MII 金屬情報網》，2021 年 7 月 29 日，<https://mii.mirdc.org.tw/Report?page=4&category=14>。

三、傳統彈藥與精準導引彈藥的命中效益比較

精準導引彈藥的種類甚多，因此擬以與海島防衛最相關的空對面、面對空、面對面（含對海）火力作為分類。

（一）空地火力（空對面）

1944 年 47 架 B-29 飛機從中國的基地突襲了八幡鋼鐵廠，只有一架飛機實際擊中了目標區，更具體說只有一枚炸彈，這枚 500 磅的通用炸彈（命中距離原訂目標焦炭廠 3,700 英尺外更具價值的發電站，可說歪打正著）。而 1944 年秋天，第八航空軍投下的所有炸彈中，只有 7% 命中瞄準點的 300 公尺範圍內；而俯衝轟炸機作為當年的「精確」武器，若非在低空轟炸，而是在 2,100 公尺處俯衝 40 度釋放炸彈，¹⁰ 其圓周誤差（CEP）也可能達到 300 公尺之大。依照統計 108 架 B-17 轟炸機，1,080 名機組人員，投下 648 枚炸彈，才能保證 96% 的機會將 2 枚炸彈命中 400×500 英尺面積的德國發電廠；相比之下，美國陸軍航空隊的密皆知原則可達到高命中精度，空投炸彈約可達 45%、空射火箭則可達 90%。¹¹

在波灣戰爭中，一架只有 1 名到 2 名機組人員的攻擊機，投下 2 枚雷射導引炸彈，就能達到同樣的效果，基本上幾近 100% 的機會命中目標，除非炸彈本身發生重大故障。¹²

（二）防空火力（面對空）

1940 年 9 月英倫空戰初期，面對德國空軍的轟炸，英國總計發射 26 萬發重型高砲彈，但只擊落 8 架敵機。每架約需耗費 3 萬發砲彈，¹³ 換算

¹⁰ 俯衝轟炸機若非低空投彈，通常是為迴避地面防砲。

¹¹ John H. McGrath, *Fire for Effect: Field Artillery and Close Air Support in the US Army* (Kansas: Combat Studies Institute Press), pp. 72-73, <https://www.armyupress.army.mil/Portals/7/combat-studies-institute/csi-books/mcgrath-fire-for-effect.pdf>.

¹² Richard P. Hallion, "Precision Guided Munitions and The New Era of Warfare," *Air Power Studies Centre*, APSC Paper No. 53, 1995, <https://man.fas.org/dod-101/sys/smart/docs/paper53.htm>.

¹³ "Anti-Aircraft Weapons," *Spartacus Educational*, <https://spartacus-educational.com/2WWantiaircraft.htm>.

命中率僅 0.003%。後期隨著雷達導入以及炮手經驗增加，約 1,803 發砲彈便可擊落一架德軍飛機，¹⁴ 換算命中率約 0.054%。而德軍防砲部隊則每擊落一架敵機約需 3,000 發砲彈，換算命中率為 0.033%。¹⁵ 依照美國海軍在二次大戰的統計，艦艇的防空火砲命中率介於 0.018% 至 0.59% 之間，¹⁶ 命中率可說極低（請見表 4-1）。

相對地，大戰後期出現的雷達導引火砲則大幅提高命中率，依照英國統計，在面對德國 V-1 巡弋飛彈攻擊時，平均要耗費 2,500 發重型防砲彈藥才能擊落一枚，但在雷達導引火砲加入後，攔截率隨著部隊經驗與系統調校逐步提升，在大戰最後四週，攔截率由 24%、46%、67%，最終至 79%。¹⁷

而現代的防空火力以面對空飛彈為主，中長程的防空飛彈有實際擊落紀錄，但由於多為親俄國家發射以對抗西方國家機種，因此雖有擊落紀錄，但發射數量不明，因此暫不列計。相對地，具有大量實戰經驗的刺針（stinger）飛彈命中率高達八成，依照美軍《防砲年鑑》（US Air Defense Artillery Yearbook）資料，阿富汗戰爭期間，刺針飛彈發射 340 次，擊落 269 架前蘇聯軍機，命中概率將近 79%。¹⁸

¹⁴ Richard Overly, "The Bombing War: Europe 1939-1945," Cited in https://www.reddit.com/r/AskHistorians/comments/5c9lyr/in_ww2_how_often_did_aa_guns_actually_hit_their/.

¹⁵ Ibid.

¹⁶ "Headquarters of the Commander in Chief United States Fleet," *Antiaircraft Action Summary World War II* (Washington, D.C.: Navy Department, October 8, 1945), p. 6, <https://www.history.navy.mil/research/library/online-reading-room/title-list-alphabetically/a/antiaircraft-action-summary.html>.

¹⁷ James Burke, *The Knowledge Web: From Electronic Agents to Stonehenge and Back* (Simon and Schuster, 2010), p. 24, <https://books.google.com.tw/books?id=KCPrc5YWdCUC&pg=PA24&lpg=PA24&dq=how+many+round+artillery+hit+ratio+WWII&source=bl&ots=N30oQz5U8D&sig=ACfU3U3410Ek8fsJ0gxATgrW8chac1TbEA&hl=zh-TW&sa=X&ved=2ahUKewjbnJnXodf5AhX-qFYBHWzrBLYQ6AF6BAgsEAM#v=onepage&q=how%20many%20round%20artillery%20hit%20ratio%20WWII&f=false>.

¹⁸ EurAsian Times Desk, "After Shooting-Down Over 250 Russian Aircraft, US To Replacr Its Most Dangerous Man portable Missiles," *EurAsian*, November 13, 2020, <https://eurasianimes.com/us-to-retire-its-most-dangerous-missiles-that-shot-down-atleast-269-russian-aircraft/>.

（三）反艦火力（面對面）

至於反艦火力，僅以近代海戰較完整的調查作為參考，依照美國海軍、日本帝國海軍參戰人員的實際紀錄，經典的瓜達康納爾海戰統計，美國華盛頓號戰鬥艦擊沉日本霧島號戰鬥艦，共發射 75 發 16 吋主砲彈，約有 20 發命中，¹⁹ 換算命中率為 26%。

而反艦飛彈自二戰後問世，實戰紀錄有限。第一次是 1967 年埃及使用 3 枚 P-15 冥河飛彈擊沉以色列驅逐艦，1982 年阿根廷使用 2 枚 AM-39 飛魚飛彈（Exocet）對英國艦隊發動攻擊，1 枚命中英國雪斐爾號（HMS Sheffield），命中率 50%。後續對英國徵用商船「大西洋搬運者號」（SS Atlantic Conveyor），並以陸基飛魚飛彈命中驅逐艦格拉摩根號（HMS Glamorgan）的攻擊都單發命中，²⁰ 總和命中率達 75%。

相較之下，現代砲兵的精準導引彈藥則可用有極高命中率與精度，例如「XM155 增程砲彈計畫」（XM155 Extended Range Artillery Projectile program）採用衝壓引擎設計可將射程延伸至 70 公里以上，並可打擊戰車等移動目標。²¹ 依照美國防部資料，前期精準砲彈造價達 7 萬美元，但實戰統計約可達到 2 公尺的命中精度。²² 因此造價雖高，但對高價值目標仍極具成本效益。

又如 2008 年 3 月，發射了約 670 枚 GMLRS-U 火箭，達到 98% 的可靠性。²³ ATACMS-QRU 也取得了成功，2008 年 3 月共有 44 枚 ATACMS-

¹⁹ Robert Lundgren, edited by Tony DiGiulian, *Kirishima Damage Analysis*, September 28, 2010, p. 8, http://navweaps.com/index_lundgren/Kirishima_Damage_Analysis.pdf.

²⁰ Ian Cobain, “Exocet Missile: How the Sinking of HMS Sheffield Made it Famous,” *The Guardian*, October 12, 2017, <https://www.theguardian.com/uk-news/2017/oct/15/exocet-missile-how-sinking-hms-sheffield-made-famous>.

²¹ Defense Express, “Catch Tanks with 70km Shot from a Towed Howitzer: the New 155-mm Ramjet Projectile Passed Another Test,” *Defense Express*, August 15, 2022, https://en.defence-ua.com/news/catch_tanks_with_70_km_shots_from_a_towed_howitzer_the_new_155_mm_ramjet_projectile_passed_another_test-3895.html.

²² “FY 2014 Annual Report for the Office of the Director, Operational Test & Evaluation,” *Annual* (Washington, D.C.: Department of Defense, January 2015), <https://www.dote.osd.mil/annualreport/>, pp. 107-108.

²³ Pincoski, “Precision Guided Missiles and Rockets Program Review,” April 15, 2008, slide 10. Cited in Barry D, Watts, *The Evolution of Precision Strike*, CSBA, 2013, p. 17.

QRU 火箭使用，僅有一次失敗。²⁴

參、台灣產業與科技的鏈結

持平而言，台灣目前的無人機、精準彈藥產業相當有限，但相關的科技與次系統則是相對齊備，只是缺乏有效系統整合。二戰後至 1980 年代之間可說是運用精準導引系統的高速發展時期，包括無人機與精準彈藥等都受惠於此科技的進步，主要是電晶體的出現得以取代真空管，其固態電子零件的特性具有高可靠性與小型化的特徵，使各類精準導引彈藥蓬勃發展，包括空對空飛彈、反艦飛彈，以及反戰車飛彈等戰術武器、空對地飛彈陸續問世。同時，新導引技術也更為完備，除既有的無線電遙控外，雷達導引、雷射導引也開始應用，例如越戰時期開始出現的雷射導引炸彈，以及後續的巡弋飛彈都在此一時期建議基本雛形與應用方式。

以無人機為例由軍事科技發展觀察，「第一次技術進步是二次大戰期間無人航空器導入火箭發動機成為單次使用的飛彈，如 V1 巡弋飛彈。第二次技術創新是在二次大戰 1950 年代電晶體的發明取代真空管使得電子設備得以減輕重量與體積，同時微型噴射引擎提供另一動力選擇。第三次的技術變革，則是 1970 年代逐步運用的晶片與大型積體電路（VLSI），加上材料科學的進步得以採用複合材料，進一步減輕重量得以提升飛行性能、電子通訊、偵察能力也大為進步。第四次技術革命，則在 2010 年代大舉爆發，最重要的將是電子科技以及新式材料。首先是電子科技，採用新世代奈米積體電路的應用，同樣的晶片面積可獲致更快的運算能力，以及減少功耗，此種硬體進步也使得軟體工程的人工智慧可以導入機載模組，開創無人機更靈活的自主飛行能力，而非僅依賴程式給定的剛性規則運作，因此執行作戰任務時也將取得更佳效益。」²⁵ 而台灣相關的技術與產業包括：

²⁴ Pincoski, "Precision Guided Missiles and Rockets Program Review," April 15, 2008, slide 17. Cited in Barry D, Watts, *Ibid.*, p. 17.

²⁵ 蘇紫雲，〈無人機國防應用與產業機會——創新戰場規則的顛覆之戰〉，《金屬情報網》，前引文。

首先是晶片技術，無人機與飛彈的應用除受惠前述的幾次技術進步外，在 1990 年至 2010 年間則進入成熟期，主要得力於兩項主要技術，一是超大型積體電路（very-large-scale integration, VLSI）在 1990 年代的應用，使飛彈的飛航與任務電腦具有更強大功能，另一則是全球定位系統（global position system, GPS），可以提供精準的座標資料使飛彈在中段導引以及終端導引都可獲得精確位置，大幅提高導航效率以及彈道修正的精確度。2010 年至今可視為新世代飛彈發展期。主要為半導體製程以及原料的革新、先進奈米製程令晶片性能大幅躍進。可以這麼說，若以無人機歷經幾次的技術革新作為對照，更可看出新世代飛彈的可能發展方向。

其次，結合電子與機械的飛航控制系統也就是微機電製造，無人機由於體積較小，因此配置的電控；機械裝置都較傳統航機更為細緻，但環境耐受能力同樣是航空標準或軍規標準，因此製造精密度的要求更高。同時，體積如同蜻蜓的「微型無人機」（micro drone）也逐步面世，其尺寸界於公分等級，除前述用於「集群攻擊」的軍事用途外，也可用於產業的管道檢測、狹小空間的災害救援等民間用途。而此種微型無人機與微型無人載具的設計與製造，更是微機電科技的科技大整合，包括整合式晶片（SOC）、微型電動機，以及各類機身衍架的精密金屬加工，使得微型無人機成為飛行的瑞士錶般的緊緻精密，非常適合台灣的精密金屬加工等產業。

第三則是新式材料，可用於航空器的電子蒙皮或稱智慧蒙皮（smart skin），台灣近年逐漸成熟的石墨烯（graphene）產業，其材料成品同時具備的高強度與電導體特性，都可使無人機在設計與性能上具備更大的彈性及應用可能。預估未來的無人機將大量使用不同配方的石墨烯材料作為蒙皮，除增加強度外，主要目的在於提供匿蹤功能，降低雷達反射能量以及飛行產生的熱訊號，降低被發現的機率。同時將各類天線整合至機身，利用石墨烯蒙皮作為雷達、通訊的收發天線，進一步降低氣動阻力並增加天線的全週界收發能力。

第四是匿蹤化技術，無論是反艦、對地攻擊飛彈、無人機的設計趨勢都走向匿蹤化，藉由外型設計，以及特殊塗料或蒙皮，可大幅降低雷達

反射截面積壓縮敵方防空系統的反應時間，如此可大幅提高攻擊成功的概率。

這些技術的進步與應用，除了來自戰場需求外，由於現代軍事技術具有高度的軍民兩用（dual use）特性，因此相對也帶動了市場的需求，給市場與產業發展帶來新的契機。如第一章前文所述歐洲防務局（EDA）對精準彈藥的研究強調「對精確度的需求已經增長，既要增加打擊對手的影響，又要避免友軍和非戰鬥第三方的傷亡。」²⁶

同樣值得注意的是網路化武器（Network-Enabled Weapons, NEW）得以彌補瞄準階段的空隙，藉由發現、追蹤、接戰的整合，將使目標處理較以往更快速，並能進行攻擊效果的評估。這也有助於避免作戰行動相互衝突（de-conflicting operations）、避免重複打擊（duplication of effort）、降低友軍誤擊（potential for fratricide），並增加及時（timely manner）攻擊目標的機會。²⁷

肆、小結

台灣屬於相對國防資源有限的國家，因此要能在中共質量優勢的軍事威脅下打贏防衛作戰，就必須有全新的戰略思維。特別是對海空軍而言。由於台灣海峽的地理寬度不足，且在現代軍事技術日益進步的條件下，其空間距離所能提供的防衛屏障也就相對地縮小。

明顯例子如反艦飛彈已經成為現代軍艦的重要威脅，在 1967 年埃及首次使用海對海反艦飛彈擊沉以色列驅逐艦，1982 年的福克蘭群島戰爭，阿根廷使用空射飛魚飛彈擊沉英國巡防艦，2022 年烏克蘭以岸置反艦飛彈擊沉俄國黑海艦隊旗艦，排水量 1.2 萬噸的莫斯科號，都充分說明電子科技的進步對反艦飛彈的效益將大大增加，尤其是烏克蘭海軍實力遠不如俄國，卻能以陸制海，將是極佳參考範例。

²⁶ Pieter Taal and Vassilis Tsiamis, op. cit., https://eda.europa.eu/news-and-events/news/2012/03/07/Roadmap_and_Implementation_Plan_on_Precision_Guided_Ammunition.

²⁷ B. Koudelka, 2005, Network-enabled Precision Guided Munitions, http://www.au.af.mil/au/awc/awcgate/cst/bugs_ch03.pdf, accessed October 2018.

此種晶片與電子科技對無人機與精準彈藥特別關鍵，如晶片是台灣的強項，對於精準彈藥與無人機的性能也至為關鍵。依據科技媒體評估指出，「以台積電 7 奈米極紫外光機（EUV）增強版製程的晶片為例，面積約為 113.31 平方公釐，可建置電晶體數量為 103 億個，平均每平方公釐約為 9,000 萬個。而 3 奈米製程技術，電晶體數量至少將為 7 奈米製程的 3 倍達到每平方公釐 2.5 億個左右。這樣的先進製程等同可以將以往的 Pentium 4 處理器縮小到如一根針大小。其性能依照台積電總裁魏哲家表示相較第一代 5 奈米製程技術，第一代的 3 奈米製程技術的電晶體密度將提升約 70%，預算速度提升 10% 到 15%，能耗降低 15%，使得晶片的整體性能提升 25% 至 30%」。²⁸ 這將使體積有限的飛彈獲得前所未有的運算能力與全新性能。因此在台灣相關晶片、電子、次系統、微機電、精密製造業都完整情況下，全系統設計與整合若能加速，則可使台灣在無人機與精準彈藥的發展與獲得更快的部署，有效提高不對稱戰力。

²⁸ 〈台積電 3 奈米製程電晶體數約 2.5 億個，2022 下半年量產〉，《科技新報》，2020 年 4 月 20 日，<https://technews.tw/2020/04/20/tsmc-3nm-at-2022/>。

壹、前言

1948年，美國全錄公司（Xerox）研製出全球首款影印機，1960年第一台針點式印表機問世，1971年第一台雷射印表機生產，以噴嘴將碳粉噴出文字和圖案的2D列印誕生，之後進入彩色製版列印的時代，而3D列印機即係在2D列印的基礎上創意發想而來。1980年，日本名古屋工業研究所小玉秀男（Hideo Kodama）最早掌握3D列印，當時稱為快速成型技術（rapid prototyping, RP），目的是為了快速有效地做出產品原型，應用在工業製造與產品研發領域。1983年，赫爾（Charles W. Hull）研究出立體平板印刷技術（stereolithography apparatus, SLA），並成立3D系統公司，¹1986年首台商用3D列印機生產，從此3D列印技術快速發展，普遍應用於醫療、工業、汽車、建築、模具、食品、航空太空、軍事以及生活消費品等各個領域。

台灣在2010年代對3D列印技術急起直追，相關研究的學術性論述不少，大多集中在醫學、工具機、生活用品、技術探討以及產業發展，可以說國內產官學界對於3D列印的效益不僅認識深刻，並且投入相當可觀的人力和物力進行研究、發展與應用。由於世界先進國家紛紛將3D列印應用於軍事領域，並形成一股蓬勃的發展趨勢；國軍自然不宜缺席落後，不僅要迎頭趕上，以利更好地提高裝備妥善，也要藉由對3D列印的純熟使用，發想出更具創新的軍事應用價值。然而，盤點台灣在軍事科技領域的應用多偏重於金屬材質的3D列印，顯示還有很大的發展空間，值得在

* 國防安全研究院國防戰略與資源研究所助理研究員。

¹ Capucine Lonjon, “The History of 3d Printer: from Rapid Prototyping to Additive Fabrication,” *Sculpteo*, March 1, 2017, <https://www.sculpteo.com/blog/2017/03/01/whos-behind-the-three-main-3d-printing-technologies/>.

年度科技發展評估報告中呼籲有關部門重視。本文從 3D 列印的原理、材料、產品優勢以及可能面臨的法律問題出發，接著介紹台灣 3D 列印產官學合作與發展情況，然後評估 3D 列印可能提供台灣軍事應用的方向及其可能產生的良性影響，最後提出具體建議提供政策部門參考。

貳、3D 列印原理優勢與法律問題

一、3D 列印的原理與材料

3D 列印係以分層積澱材料的辦法噴射堆積出任何所需形狀的物體，被稱為「積層製造」(additive manufacturing，或稱「增材製造」)；傳統製造工藝係對原材料加以切割、打磨、腐蝕、熔融等手段以獲得零附件，再藉由拼裝、焊接等方法合成最終成品，因此是典型的「減材製造」。² 3D 列印的作業流程基本區分為四個步驟：(一)利用電腦輔助設計(computer-aided design, CAD)軟體設計出所要物體的 3D 模型圖；(二)利用 3D 列印設備中的軟體，對模型進行分層切片，得到各層截面的 2D 圖形；(三)在設計程式指令的導引下，3D 列印設備噴出固體粉末或熔融的液態材料，使其固化為一平面薄層，第一層固化後，在此基礎上再形成第二層，如此往復，按順序逐層固化或黏結相鄰截面；(四)去除列印過程中所需的支撐結構，最後形成 3D 物體。³ 3D 列印必須藉助於電腦輔助繪圖和製造工具(CAD and computer-aided manufacturing, CAD/CAM)，通過 CAD 將創意呈現出來，然後挑選合適的列印機和材料，透過 CAM 指令控制 3D 列印，逐層噴塗出所望的物件。

3D 列印運用粉末、金屬、塑膠等可黏合材料，透過逐層增加、快速成型的方式製造成品，目前的材料約有 300 餘種，常用的材料可分為聚合

² 沈丁立，〈3D 列印技術形塑新軍事革命〉，《現代物理知識》，第 26 卷第 2 期(總 152 期)，2014 年 2 月 1 日，頁 44。

³ 金大元，〈3D 列印技術及其在軍事領域的應用〉，《新技術新工藝》，第 4 期，2015 年，頁 9。

物、金屬、陶瓷三大類，金屬材料主要是金屬粉末，包括不銹鋼、鋁合金、鈦合金、高溫合金等；對於結構複雜的構件，金屬材料 3D 列印的優勢更加突出，所以在軍事裝備、車輛製造等領域應用更為廣泛，尤其是鈦合金材料，由於強度高、耐熱性和耐腐蝕性能極好，經常應用於火箭、飛彈等構件中。⁴ 其實有許多材料都可以應用在 3D 列印的成品製作，例如，鈷鎳合金（Co-Ni）能克服航空發動機零件承受高強度扭力的問題；以真菌作為材料，可以列印吸音組件；3D 列印石墨複合材料能增加強度和導電性，有利於軍事應用在散熱片和航空發動機遮罩裝置；以純銅粉（DM Cu）為材料，可以列印 99.9% 的純銅組件，⁵ 這些材料都是通過小型實驗之後的大規模實際應用，最終促使 3D 列印技術在製造領域大放異彩。

根據美國《2021 年 3D 列印半年報告書》（*3D Printing Half-Year Report 2021*）估計，3D 列印市場於 2030 年將達 184 億美元的產值。⁶ 但台灣證券交易所《證券服務》期刊的評估卻認為，僅僅在 2020 年即有 210 億美元的產值。⁷ 儘管台灣證交所評估的時間是在 2015 年，基於證交所對市場敏銳度的觀察，3D 列印技術產業無疑是個潛力股，它具備快速、便捷、客製化、模組化、多樣化、輕量化、區隔化、成品複雜化、製程標準化、一體成形、一機多用、低成本、低汙染、任擇批量、裝備適應性高、成品生命週期長、維修方便等眾多優良特性，相對於傳統的「減材製造」而言，更具製作工藝上的優勢。

⁴ 陳穎、陳紅遷、張少亮，〈3D 列印技術及其在軍事中的應用〉，《機械工業應用》，第 12 期，2021 年，頁 61。

⁵ “Developments in 3D Printing: A Sector by Sector Overview,” *3D Printing Half-Year Report 2021*, January 1, 2021 to June 15, 2021, pp. 2-3.

⁶ “Developments in 3D Printing: A Sector by Sector Overview,” *3D Printing Half-Year Report 2021*, January 1, 2021 to June 15, 2021, p. 3.

⁷ 吳淑美，〈3D 列印未來發展趨勢與商機分析〉，《證券服務》，第 637 期，2015 年 4 月，頁 80。

二、西方 3D 列印的軍事應用

3D 列印技術發展 40 年來，應用於軍事領域已經相當廣泛，也有許多成功案例。例如，2016 年，美國海軍列印全世界第一個 V-22 傾轉旋翼戰機發動機的鈦合金翼縫固定裝置；⁸ 法國海軍集團（Naval Group）列印 1 噸重的軍艦俾葉，俾葉半徑 2.5 公尺，安裝在三叉戟級（Tripartite-class）安德羅梅德號（Andromède）獵雷艦，2020 年 12 月順利完成海上試俾；⁹ 美國陸軍基於提高量產速度、降低生產成本、減輕車體重量、提高車輛性能以及增加存活力等要求，透過 3D 列印技術，製造一體成形和無關節的戰車車體，其體量接近 30 呎 × 20 呎 × 12 呎，¹⁰ 大於 M1A2 主力戰車的尺寸，車體將可對新一代戰車安裝的配備形成更好的安全保障；此外 3D 列印也多方應用在航空太空載具和軍用車輛零組件、渦輪風扇葉片、可重複使用火箭、通訊天線等等項目的列印製造。

美國國防先進研究計畫局（Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA）於 2015 年正式將 3D 列印技術大量應用於軍服、防護面罩、軍事醫學、營房、艦艇裝備、航空和太空領域。2022 年，DARPA 再將 3D 列印技術的心思動到食物上面，以滿足太空人、潛水員、災難受害者以及生活在「食物沙漠」（food deserts）等貧困線上的人類 他們幾乎無法獲得營養食物的需求。¹¹ 其「再生資源」（Re-Source）計畫的主要目的是利用當地原料和混合廢棄物快速生產各種需要的產品，從飲用水和「可食用的巨量營養素」（edible macronutrient）到車輛和裝備所需的潤滑劑、黏合劑和戰術纖維，保障遠征部隊和人道主義救援行動，特別是「人造食物」可能是解決未來糧食短缺問題的因應方案，具體目標是將生質能細胞

⁸ Sara LaJeunesse, “From the Ground up: Taking 3D Printing Technology to the Next Level,” *Penn State*, March 21, 2022, <https://www.psu.edu/news/research/story/ground-taking-3d-printing-technology-next-level/>.

⁹ “Developments in 3D Printing: A Sector by Sector Overview,” *3D Printing Half-Year Report 2021*, January 1, 2021 to June 15, 2021, p. 16.

¹⁰ “Developments in 3D Printing: A Sector by Sector Overview,” *3D Printing Half-Year Report 2021*, January 1, 2021 to June 15, 2021, p. 18.

¹¹ Elizabeth Neus, “DARPA Plans to Make Replicators for Real,” *Fed Tech*, May 9, 2022, <https://fedtechmagazine.com/article/2022/05/darpa-plans-make-replicators-real>.

轉化為安全、有視覺吸引力、可食用和適口的食物，俾利於傳統食物不敷使用時，可以支援軍隊和平民。¹²

3D 列印對軍用武器及設施維修的效果相當顯著，能在戰場上把需要的零附件「列印」出來，及時、精準完成受損裝備的維修保障，快速恢復作戰能力；從 3D 設計到完成零件加工僅需幾個小時到幾十小時，不需傳統製造方式的鑄錠、制坯、模具、模鍛等過程，可以快速和低成本的方式進行零附件生產；數位化生產過程可適時修正、隨時製造，形成任意形狀的零件；特別是對複雜結構零附件的製造周期明顯縮短；必要時可由後方設計人員根據前線維修需求臨時設計新的維修工具。美軍有一款戰場使用的小型 3D 列印機，可放在官兵背包隨時取用。當然，3D 列印的效率是戰場應用最主要的考量，「半小時修復受損裝備是有價值的，如果要花一天時間那就沒價值了」。¹³ 戰場有戰機上的壓力，但在承平時則無趕製的需要。3D 列印技術具備諸多優勢，雖然難以取代大規模的生產線，但製作上不需要模具，可從設計到零件直接轉化，完成快速、自由的製造，對於武器裝備設計，複雜、昂貴的零組件製造以及維修保障等方面得到廣泛應用，是軍事裝備領域製造技術革新的關鍵。

使用金屬材料的 3D 列印固然擁有上述各種優點，卻也有一些傳統工序存在的問題需要處理，例如，金屬 3D 列印的零件在實際組裝或使用之前，必須先進行表面打磨等光滑化處理；此外還可能會有孔隙度、密度、殘留應力、龜裂、捲翹和隆起等問題，¹⁴ 然而這些問題或缺點都可以按照傳統製造的解決方式予以克服，3D 列印似乎與傳統鑄造同樣存在必須加工的問題。美國國防先進研究計畫局透過開放式製造計畫（Open Manufacturing Program）蒐集並建立 3D 列印資料庫的做法，大幅降低 3D

¹² “DARPA Seeks ‘Top Chef’ for 3D Printed Food,” *Modern Army*, December 9, 2021, <https://www.modernarmy.net/categories/modern-army/today-s-cartoon/darpa-seeks-top-chef-for-3d-printed-food.html>.

¹³ 柯文，〈3D 列印武器，沒你想像的那麼簡單〉，《江蘇科技報》，2018 年 11 月 27 日，頁 A11。

¹⁴ 高維駿、蘇園展、林明智，〈金屬 3D 列印運用於國機國造之研析〉，《空軍軍官雙月刊》，第 223 期，2022 年 4 月，頁 18-20。

列印可能出現的問題。¹⁵ 而 3D 列印節省的時間和成本以及其他優於傳統製造的特性，仍然使其產生逐漸凌駕傳統製造工藝的趨勢。

三、可能面臨的法律問題

隨著 3D 列印的需求增加，技術成本越來越低，3D 列印零附件產品侵權的訴訟案件越來越多。¹⁶ 在使用設備和技術應用之餘，仍須先瞭解相關的法律問題，避免衍生不必要的訴訟。3D 列印技術涉及的法律問題主要區分為專利權、著作權、商標權和營業秘密四類。論析如下：

（一）專利權

現行 3D 列印設備包括雷射固化快速成型機、雷射燒結快速成型機、雷射熔化快速成型機、貼片刻寫快速成型機、電子束熔化快速成型機、噴墨黏粉 3D 列印機、熔融擠壓 3D 列印機、壓電驅動 3D 列印機、氣動 3D 列印機和電動 3D 列印機；伴隨設備的主要列印技術有材料擠製成型、光固化技術、粉體熔融成型技術、黏著劑噴膠成型、材料噴塗成型、疊層製造成型和指向性能量沉積技術等。¹⁷ 這些裝備及其列印技術和材料成分通常都會申請專利，從而保護其研發成果不被剽竊，並且維護其設備和技術利益。使用現行的列印機和材料成分宜經過付費程序，取得合法使用權。

（二）著作權

3D 列印方面的著作權主要是涉及電腦輔助設計的應用程式使用、設計的造型圖檔以及 3D 檔案的上傳、複製與下載等，都受到《著作權法》

¹⁵ A. Tarantola, “DARPA to Develop Best Practices for 3D Printing,” *Engadget*, May 31, 2015, <https://www.engadget.com/2015-05-31-darpa-to-develop-best-practices-for-3d-printing.html?ncid=txtlnkusaolp00000589>.

¹⁶ “Developments in 3D Printing: A Sector by Sector Overview,” *3D Printing Half-Year Report 2021*, January 1, 2021 to June 15, 2021, p. 2.

¹⁷ Add Maker, 〈不只是 FDM、SLA！七種常見 3D 列印成型技術原理大集合〉，《Amag》，2020 年 12 月 28 日，<https://mag.addmaker.tw/2020/12/28/7-3d-print-technology/>。

中有關電腦程式著作、美術著作和複製權的保護。應採購正版軟體和圖檔，並依《著作權法》規範使用，否則即應創新求變自力研發出與市面販售產品區隔的程式和圖形。

（三）商標權

《商標法》第 18 條規定：「商標，指任何具有識別性之標識，得以文字、圖形、記號、顏色、立體形狀、動態、全像圖、聲音等，或其聯合形式所組成。前項所稱識別性，指足以使商品或服務之相關消費者認識為指示商品或服務來源，並得與他人之商品或服務相區別者。」因此舉凡 3D 列印的電腦應用程式、列印設備、素材和成品，或相關服務，都可以透過可資識別的標識顯示商品或服務來源，並能區隔其他商品或服務的標示，都可受到《商標法》的保護。

（四）營業秘密法

3D 列印技術涉及《營業秘密法》的部分主要是列印設備的控制碼（或稱「原始碼」）以及包括成分比例在內的列印材料等內容。這些資訊若合乎《營業秘密法》第 2 條所規定：營業秘密係指方法、技術、製程、配方、程式、設計或其他可用於生產、銷售或經營之資訊，而符合非一般涉及該類資訊之人所知者、因其秘密性而具有實際或潛在之經濟價值者以及所有人已採取合理的保密措施者等要件，即受到保護。而 3D 列印製造偏偏與「方法、技術、製程、配方、程式、設計」有關，必須特別謹慎。

參、台灣產官學 3D 列印發展

一、官方支持

早在 2004 年，成功大學和中正大學已經進行 3D 列印技術研究，可惜當時 3D 列印設備技術不成熟，印製成品品質低劣。從此，台灣錯過全

球 3D 列印狂潮的第一班列車。2012 年 7 月，台灣工業技術研究院籌組成立「雷射積層製造產業群聚」，推動台灣 3D 列印產業，同年底在工研院南院成立積層製造與雷射應用中心，¹⁸ 形同孵化 3D 產業的育成中心，此後一家家 3D 列印相關產業公司有如雨後春筍紛紛成立。投入 3D 列印技術研究和促進產業發展的官方機構除了工研院之外，還有科技部、資策會、國防部、國家實驗研究院儀科中心以及經濟部工業局等，而國實院儀科中心還是國際權威的 3D 列印醫學產品安全認證機構。

二、產學合作

3D 列印除了列印的機器和材料之外，列印的應用程式也很重要，列印軟體往往必須針對特殊列印產品而設計，功能越強的 3D 列印機，越能夠根據需求列印所望的產品，而懂得應用程式的操作員也是讓創意實現的主要憑藉。10 年下來，台灣從事 3D 列印技術和相關應用程式研究，或提供 3D 列印工程師認證的學術單位越來越多，根據不完全統計，包括大同大學、中山大學、中正大學、中國醫藥大學、中興大學、成功大學、世新大學、亞洲大學、海洋大學、景文科技大學、逢甲大學、陽明交通大學、輔仁大學、靜宜大學、台灣大學、台灣科技大學、台灣師範大學等等，這些學校為台灣 3D 列印技術培養許多人才，連帶促使台灣 3D 產業蓬勃發展，相關產業超過 140 家。2022 年 8 月，台灣 3D 列印協會在台北南港展覽館舉辦「台灣 3D 列印暨積層製造設備展」，呈現台灣 3D 產業潛力雄厚，發展蓬勃，但是展區僅展出極少數軍備相關產品，顯見國軍軍品 3D 列印的軍事應用還有很大的成長空間。

¹⁸ 顏同，〈臺灣 3D 列印深耕先行者，鴻海也找他把脈〉，《今周刊》，2014 年 4 月 25 日，<https://www.businesstoday.com.tw/article/category/183015/post/201404250021/>。

三、軍方參與

國防部顯然並未錯過 3D 列印技術的列車，國防大學理工學院、中科院、工研院、成功大學以及空軍保修指揮部等機構於 2017 年 9 月建立建教合作關係，針對金屬 3D 列印技術建立教研能量。¹⁹ 2020 年，中科院完成大型（1.2 公尺 × 40 公分）航太級金屬粉床熔化成型設備、專用超合金粉自主化設備及材料開發，能列印更大且符合國防及航太產業規格的零組件，目前產製 4 項用在高教機的零組件，達成減重 12% 至 30% 的輕量化目標，並將會導入高教機量產應用。²⁰ 看起來初具成效，其實 3D 列印並不限於金屬領域，理工學院和中科院可以在既有的基礎上結合民間產業的能量，此外各軍兵種後勤處、陸軍後勤指揮部和海軍保修指揮部亦應積極投入，參與開發軍用裝備零附件，創造 3D 列印技術的軍事應用效益。

肆、台灣 3D 列印的軍事應用

3D 列印技術可以實現從設計到零件的直接轉化，完成快速、自由的製造，能夠在武器裝備的設計，複雜、昂貴部件的製造，以及維修保障等方面廣泛應用，它是未來軍事裝備領域製造技術革新的關鍵。²¹ 台灣的 3D 列印技術除了應用在高教機的複合材料組件製造之外，還有很多面向可以充分應用，在相當程度上可以解決零附件消失性商源的困境，也有利於實現逆向工程所需的零附件製造。特別是 3D 列印的成本相對低廉許多，生產效率也是傳統方法的 3 倍。²² 基本而言，所有民間 3D 列印的技術都可以應用在軍事領域，包括人體骨骼等醫療成品、生物科技、飛機複材、汽車零組件、人造食品以及個人的服裝鞋帽等經理裝備。

¹⁹ 理工學院，〈金屬積層製造 3d 列印產官學建教合作〉，《國防大學驗書》，2017 年 9 月 29 日，<https://zh-tw.facebook.com/ndurecruit/posts/1638207639543663/>。

²⁰ 朱明，〈中科院運用 3D 列印技術，量產高教機 4 項重要零組件〉，《上報》，2021 年 2 月 14 日，https://www.upmedia.mg/news_info.php?Type=1&SerialNo=106066。

²¹ 企鵝號，〈武器準備專題四：我國新一代軍機普遍使用 3D 列印技術〉，《騰訊網》，2021 年 3 月 28 日，<https://new.qq.com/rain/a/20210328A01NEC00>。

²² 林營宗，〈3D 列印技術改變工業未來〉，《三聯技術》，2013 年 3 月，頁 25。

由於台灣軍事資源相對有限，3D 列印產品應結合台灣 3D 列印在材料、零組件、設備、設備代理以及技術應用等領域既有的優勢，²³ 並聚焦於民間較為欠缺的領域重點發展，具體包括發動機葉片、機翼、尾翼、副翼、旋翼、軍艦與小艇船體修補、非磁性鋼板、軍車車體、變速箱齒輪、飛彈、火箭、無人機、防彈陶瓷、拆彈機器人、槍身、槍托、彈匣、無線電、通訊天線、裝備零附件、混凝土工事掩體以及營房，並且透過電腦輔助設計和製造（CAD/CAM）對其他現用裝備進行任何可能的嘗試，可以說潛力十足。除此之外，國軍向來強調「救災就是作戰」，3D 列印還能夠快速列印所需要的防汛救災物品，可以隨時補充救災物品的耗損，提高救災效率，大幅降低災損。

3D 列印除了列印的機器和材料之外，列印的應用程式也很重要，列印軟體往往必須針對特殊列印的產品加以設計；功能越強的 3D 列印機，越能夠根據需求列印所望的產品，而懂得操作應用程式也是讓創意實現的主要憑藉，所以除了機器之外，優質的人力實居關鍵地位。國防部應該提供陸海空軍專業後勤補給單位，配備相關的 3D 列印機，以利基層部隊隨時能夠列印短缺的零附件應急，維持必要的裝備妥善，而無須返回駐地或返港。當然這些列印的能力和品質應先通過相關單位認證，對於列印的成品方能放心使用。3D 列印技術在國軍部隊實際應用將產生下列關鍵性的影響：

一、降低備料成本

部隊或艦艇於執行演訓或海域偵巡期間，裝備零附件使用難免磨損，部隊或艦艇如有配賦 3D 列印機，即可針對耗損零組件在 CAD/CAM 的協助下，於短時間內透過積層製造方式生產替代的零組件，只要預選合適的材料，其強度甚至強過原有的零件。這樣演訓中的部隊或執行任務中的艦

²³ Howie Su，〈開創產業新契機，告訴你臺灣 3D 列印優勢在哪裡？〉，《ivendor》，2021 年 11 月 26 日，https://www.ivendor.com.tw/website/digital_column_detailed/331。

艇，將無須因為武器、車輛或裝備中的某些零件損壞而必須等到進廠或返港才能更換，可以提高保養維修效率，並維持裝備妥善率。當然，一般而言艦艇都會存有備料以因應急需，但若有 3D 列印機則可減少備料採購數量，從而降低料件的預算支出。

二、大量節約耗材

傳統製造工藝係以堆積木模式完成產品，首先製作零組件，再將零件組成大的部件，大部件組成次總成，最後將幾個次總成組裝成系統總成。在製作零組件階段往往必須切削不需要的部分而浪費一些材料，因此這種傳統工序被稱為「減材製造」。在「積材製造」技術誕生之前，浪費若干材料來完成一件產品成為無法避免之惡，然卻也因此增加許多材料成本。而使用 3D 列印，所有材料都根據每一層建模製作，不會有浪費現象，能夠在製作初期大幅節省備料需求，從而降低成本。而且，3D 列印的成品一體成型，可以大幅減少組裝程序和時間，並提高整體裝備的強度。

三、提高綠色製造

金屬 3D 列印技術與傳統金屬製造技術相比，於製造過程可以產生更少的金屬副產品（瑕疵品）；傳統金屬加工作業約有 90% 的金屬原材料被丟棄；²⁴ 3D 列印透過精準控制，疊層製造合金產品，能夠大量減少金屬材料浪費。相對於傳統塑性成形（plastic forming）技術，3D 列印具備淨成形（net shape forming）效果，只需較小的後續加工，甚至不需要再加工，即可符合產品所需零件尺寸及公差要求的成形製作。²⁵ 減少廢料產生

²⁴ 畢可信，〈3D 列印技術於軍事用途之初探〉，《陸軍後勤季刊》，2013 年第 4 期，2013 年 11 月，頁 99。

²⁵ Uğur Uygun, "What Is the Net-Shape or Near Net-Shape Manufacturing?" *Mechanical Land*, January 22, 2022, <https://mechanicalland.com/what-is-the-net-shape-or-near-net-shape-manufacturing/>.

意味著可以降低環境汙染，這項特色尤其符合環保意識抬頭的民意期待，有利於促進國軍在承平時期的提高綠色製造的比重，呼應現代社會要求。

伍、小結

3D 列印技術發展迄今不過 40 年，儘管具備許多特性上的優勢，尚難完全取代傳統工藝製造技術；但這並不表示 3D 列印的發展沒有前途，反而對傳統製造工藝具有截長補短的作用。隨著 3D 列印技術持續精進以及列印材料選擇的多樣性，3D 列印的積層製造模式將與傳統工藝的減材製造模式並駕齊驅，現已出現部分取代的現象，將來多數取代將是一個無法避免的趨勢。國軍向外國購置的軍備經常面臨零組件昂貴，籌獲預算往往不足支應後續採購，導致裝備缺料、待料問題，影響裝備妥善甚鉅，透過 3D 列印技術在相當程度上可以製造強固性相當甚至更優越的代用零附件，解決零附件消失性商源的困境。國軍科研院校和機構宜廣續投注研究人力和資源，掌握產業先進技術水準；國軍部隊亦應加強對 3D 列印技術的實際應用，為利達成節約軍事預算、強化後勤補保能力以及提高裝備妥善率等效益，提倡下列 5 項建議供國軍發展 3D 列印應用評估參考：

第一，注意智慧產權、專利權、商標權以及營業秘密的遵守與維護，避免因違法而衍生求償等後遺症。一般較易受到忽略的是成品製程和材料雖與原廠不同，但外觀相同仍可能引發侵權行為。因此，應取得原廠授權，或者創新設計不同於原來的外觀。並應強化旅級法務官的職能，賦予提供相關法律諮詢的責任。

第二，擴大 3D 列印製造領域。中科院（國防部）及漢翔（經濟部）除了將 3D 列印應用於既有的戰機複材製造之外，亦應編列研發資金向其他稀有材質的合金列印加強探索研究，擴大 3D 列印製造的深度和廣度，並借重台灣產學機構對於 3D 列印技術取得的豐碩成果，加強應用合作，避免重複投資，以節約研發成本。

第三，建立 3D 列印參數資料庫。資料庫的建置主要針對 3D 列印的圖形設計、材料成分、合成比例、熔融溫度、環境控制、製程時間以及其他任何需要的參數資料等建檔儲存與管理，使用在相同成品的迅速列印製作，可以節省許多摸索和試驗的時間。

第四，建立操作與認證能量。基於對 3D 列印成品使用安全的必需性，國軍應從兩個方面著手：一是培訓 3D 列印操作師，這方面可以透過軍文學術或科研機構辦理；二是建立 3D 列印成品品質合格認證能量，這方面受限於時間壓力，必須由廠所和部隊自行建立基本的檢測能力。

第五，建置適合的 3D 列印機。由於廠所擁有較充裕的時間，能夠列印製造大型的備分零附件；部隊執行任務往往受到時間拘束，傾向於列印時間短的零件，以利快速替換。因此，廠所和部隊使用的 3D 列印成型機應該有所區分，甚至對於列印的品項亦可區隔規範。

第六章 作戰用沉浸式科技

吳自立*、翟文中**

壹、前言

運用擴增實境（augmented reality, AR）、虛擬實境（virtual reality, VR）、混合實境（mixed reality, MR）等延展實境（extended reality, XR）虛實體驗技術，打造近乎現實的情境，讓使用者體驗時能完全投入，產生連結與共鳴，稱之為沉浸式體驗（immersive experience）。廣義而言，XR 在軍事領域的運用已有相當長遠歷史。VR 是以將真實環境完全虛擬化，AR 則是將虛擬內容疊加到真實環境之中，所以 AR 技術是一種「虛實疊合」的技術，透過顯示裝置整合呈現虛擬與現實資訊。1990 年代初期，美國率先將 VR 技術運用於軍事訓練，當前廣泛運用於各國軍方的模擬器即是典型的 VR 技術產物。AR 技術在軍事作戰領域的首次運用距今已超過半個多世紀，1959 年英國航太系統公司為海盜式艦載攻擊機開發的抬頭顯示器即為例證，其可將飛行與戰術資訊投射到前方，強化飛行員的戰場認知以利其有效執行任務。近年來，隨著光學攝影、定位辨識與體感測量等軟硬體相關科技發展，提升 AR 與 VR 技術的混合運用而賦予更為合適的混合實境 MR 名詞，而延展實境 XR 則成為這一虛實混合技術發展頻譜的代表（圖 6-1）。2022 年 2 月，XR 技術被美國國防部列為 14 大關鍵技術領域之一。¹ 隨著 XR 技術的不斷成熟，XR 軍事領域應用也不斷拓展。本章將對 XR 沉浸式科技在軍隊作戰與後勤維保應用的優勢和現狀進展進行說明。隨著 5G、邊緣計算等技術的發展，將進一步增強 XR 能力與擴展 XR 技術的應用範圍。

* 國防安全研究院國防戰略與資源研究所副研究員。

** 國防安全研究院國防戰略與資源研究所助理研究員。

¹ “Critical Technology Areas,” *Office of the Under Secretary of Defense For Research and Engineering (USD(R&E))*, The Pentagon, Washington, D.C., February 1, 2022, <https://www.cto.mil/usdre-strat-vision-critical-tech-areas/>.

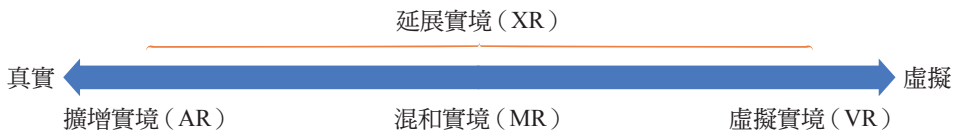


圖 6-1 XR 頻譜

貳、XR 用於作戰

隨著科技快速成長，未來戰爭將會轉型為高科技戰爭，各國的軍隊都持續創新、升級他們的技術，希望讓軍隊變得更加強大。而 XR 在此環境下，也成為各國爭先恐後追求的技術！各國國防組織已經預見到 XR 的進步，將在改善訓練、態勢感知、後勤支持、戰備甚至醫療訓練和程序方面帶來無限希望。通過將虛擬數據疊加在現實世界的視圖上，軍事人員可以使用 XR 技術更輕鬆地在世界上的任何地形上導航；知曉友軍的位置或報告的威脅；針對預期的戰鬥場景進行演練；甚至根據需要加入虛擬敵人和障礙物，以便能以更接近實況的體驗做好準備。他們還可以為醫療、維護或其他專業程序進行培訓和實踐。AR 係透過顯示器呈現虛擬與現實資訊之結合，係一種即時計算攝影機擷取影像位置及角度，並將數位資訊疊合至真實世界影像中之技術，這些數位資訊可以是文字、圖案、符號或有意義的資訊等等。² 由於 AR 的使用者係處在真實環境中，這些疊加後的圖像、影音或互動式資訊可提供使用者運用參考並對現實場景進行補充，³ 但是它無法完全地取代真實場景。即令如此，透過 AR 技術取得的各項疊加資訊無疑地可擴大使用者對周遭環境的整體性瞭解與掌控。在現代戰爭中，任何一方若能在戰場覺知 (battlespace awareness, BA) 領域取得優勢地位，無論在戰場決策下達或部隊實際接戰時，都可取得主動迫敵被動因應，從而取得戰場勝利。將情監偵 (intelligence, surveillance, and reconnaissance, ISR) 系統獲得的資訊融合並傳送至部隊或單兵就成為戰鬥

² 黃昱綸，〈解密擴增實境未來視界新樣貌—智慧 AR 趨勢大爆發〉，《智慧財產權月刊》，第 252 期，2019 年 12 月，頁 41-42。

³ 王祥昫、趙宥翔、田嘉豪，〈以擴增實境導入技勤訓練之應用〉，《空軍軍官雙月刊》，第 216 期，2021 年 2 月，頁 31-32。

致勝的關鍵因素。尤其在巷戰與夜戰等極端作戰環境下，AR 技術提供的高精確實時戰場環境覺知功能，將可降低接戰時的高風險與不確定性，並可強化單兵間與部隊間的協同作戰能力。換言之，隨著 AR 技術不斷成熟並運用於戰場，將會改變軍事決策與部隊接戰的固有型態，促使軍事作戰進入一個嶄新領域。⁴

一、戰術擴增實境裝備

- (一) AR 技術應用於作戰領域最為人周知的例子，即是戰機座艙前方玻璃或飛行員頭盔上的抬頭顯示器（Head Up Display, HUD）。這個裝置可將一些重要的戰術諸元，以向量圖形疊加到飛行員觀察方向的視野範圍內，如此可使飛行員不用分心去觀察儀表板上的數據和指針，能將注意力置於接戰時必須掌握的敵我相對態勢的各項實時情資。⁵
- (二) 美軍最新的「雙眼增強型夜視鏡」（ENVG-B）系統被稱為「抬頭顯示器 1.0」（heads-up display version 1.0）。此一應用 AR 技術的夜視設備以圖型疊加的形式為士兵提供更好的夜視和戰術資訊（敵人或友軍的位置等）。除此之外，進一步結合瞄準標線裝置，可藉由無線連接到步槍瞄準鏡，並顯示士兵瞄準的位置。依照美國陸軍步兵學校（Infantry School）指揮官多納休（Christopher Donahue）表示，參與測試者使用擴增實境顯示器的作戰殺傷力大為增加，亦即是武器命中精度提高。最重要的特性是，戰術擴增實境擁有無線網絡連結設計，允許士兵在小隊成員之間共享資訊或在戰情發生變化時得以輸入數據，可以提高士兵與友軍的戰場覺知能力，功能整

⁴ Alan Chen, 〈美軍測試全新視覺整合強化護目鏡系統〉，《TechNews 科技新報》，2021 年 5 月 25 日，<https://reurl.cc/KbZrye>；陳明陽，〈美軍大量採購 IAVS 頭盔，強化士兵情境感知能力〉，《DIGITIMES》，2021 年 3 月 15 日，<https://reurl.cc/vdre31>；李思平，〈整合式視覺增強系統：2021 年底開始讓美軍擁有科幻戰士的能力〉，《尖端科技軍事雜誌社》，<https://reurl.cc/b2Mk4d>。

⁵ Ronald T. Azuma, "A Survey of Augmented Reality," op. cit., p. 9.

合則意味著減少必須攜帶的設備數量，並能更有效率的進行接戰，以快速地做出決策擊退敵人。⁶

- (三) 狙擊槍輔助瞄準系統：由 ThirdEye、美國國防部研發。智能眼鏡供應商 ThirdEye 開發了一套應用於軍事領域的槍支輔助瞄準系統（PAWS），其特點是在槍支瞄準鏡上額外安裝一套電子配件，透過 AR 眼鏡即可為士兵實時顯示：風速、海拔、天氣情況、敵人距離等細節資訊。也就是說，PAWS 可以看作是一套電子瞄準鏡，支持通過 AR 形式實時呈現資訊，大幅提升作戰效率。⁷

二、頭戴式戰術顯示系統

AR 技術在作戰領域的運用除抬頭顯示器外，大多集中於地面戰鬥部隊的穿戴式裝置，例如眼鏡與頭盔等。如同抬頭顯示器般，AR 技術透過

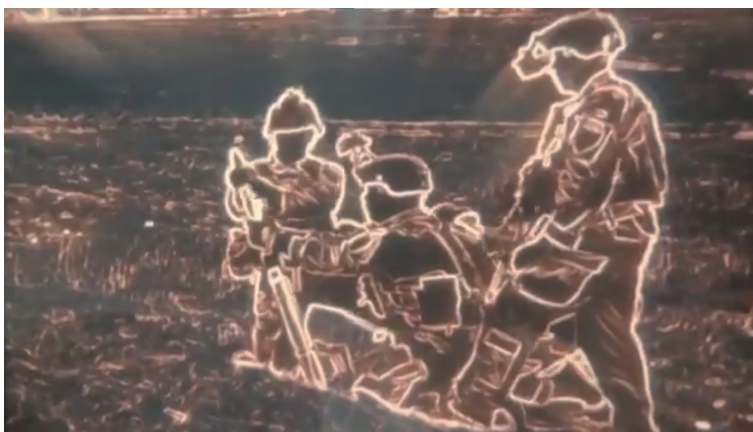


圖 6-2 雙眼增強型夜視鏡（ENVG-B）系統

資料來源：<https://www.cool3c.com/article/161551>。

⁶ Tandeer, 〈美國陸軍全新夜視鏡 ENVG-B 靠 AR 與白框強化夜間視覺 槍砲火線變成藍色〉, 《COOL3C》, 2021 年 5 月 11 日, <https://www.cool3c.com/article/161551>。

⁷ Cristina Brooks, “ThirdEye Gen X2 Smartglasses Take Aim at Military Applications with AR-Enhanced Weapons Sight,” *Next.Reality.news*, October 4, 2019, <https://reurl.cc/pMoLEe>.

與網路通訊的結合，可將作戰現場的地圖提示、建築標識、敵人位置、友軍情況和上級命令等資訊實時傳達給士兵，不僅提升單兵的環境覺知能力，指揮官亦能藉由此一裝備對士兵進行遠程指揮，如此便可建構一個強而有力的指揮與管制架構。⁸對於地面部隊，AR 頭盔和眼鏡可以提供更好的態勢感知能力——這意味著部隊可以精確定位自己的位置，定位周圍的其他人，並準確識別其他人是朋友還是敵人。這種顯示器還可以顯示其他資訊，例如與目標的距離，讓人想起電影「超人」（Superman）、「終結者」（Terminator）般的士兵圖像。

（一）「戰術擴增實境」（TAR）系統使用頭盔式目鏡，該目鏡通過無線連接到小型可穿戴計算機和定位系統。士兵佩戴的熱瞄準器以及武器的瞄準器也可連接到系統，增加了日/夜視圖、方向和武器瞄準數據顯示功能。TAR 取代了典型的手持 GPS 設備和護目鏡。士兵不必低頭檢查他們的 GPS 位置。武器裝備上還可以透過無線連接到 TAR 目鏡和士兵身上的平板電腦，讓士兵可以看到他們瞄準的目標以及與目標的方位距離資訊。顯示器內容可以分成兩部分呈現，士兵可以看到他們的槍指向的位置，同時也可以看到安裝在頭盔上的前置攝像頭的視野。士兵可以看到角落或牆外，沒有任何爆頭的風險。TAR 還包括一個無線網絡，允許士兵在他們的小隊成員之間共享資訊或在情況發生變化時輸入數據。戰術擴增實境平視顯示器可以提高士兵的戰場意識，減少必須攜帶的設備數量，並幫助更有效地擊敗敵人。⁹

（二）美國陸軍和海軍陸戰隊近年來投入大量資源，研發一種稱為「綜合視覺增強系統」（Integrated Visual Augmentation System, IVAS）的新型頭戴式戰術頭盔，該系統將合成訓練環境與真實數據相結合，以提高單兵的戰備狀態和效率。IVAS 項目基於微軟 HoloLens 2 所採用的混合實境（MR）頭顯技術，除可顯示關鍵資訊外，主要目

⁸ 張申、季自力、王文華，〈增強現實技術在戰場上的應用〉，《軍事文摘》，轉引自《每日頭條》，<https://kknews.cc/science/yvoqeqb.html>。

⁹ “Tactical Augmented Reality,” *U.S. Army*, May 24, 2017, <https://reurl.cc/2ZXoXX>.



圖 6-3 戰術擴增實境系統 (Tactical Augmented Reality ,TAR)

資料來源：https://www.researchgate.net/figure/AR-image-of-the-TAR-system-used-by-the-US-military-In-October-2018-Mural-Arts_fig3_349233995。

的在於幫助部隊識別敵軍並能更快地做出決策。此外，IVAS 護目鏡還配備了熱感測器和微光感測器，以幫助使用者在黑暗中辨識環境與目標。此類 MR 系統比手持系統可讓使用者更容易聚焦於重要決策資訊而不容易分心。使用者透過護目鏡獲取即時有用戰場資訊，同時可以不必將視線從戰場實境上移開。IVAS 護目鏡可以結合面部識別功能或與武器連接，使士兵能夠在看不到敵人的情況下開火——這意味著士兵可以，例如將他們的武器放在建築物的轉角處進行準確射擊，同時可保持安全的掩護。¹⁰

以上美國的 TAR、IVAS 與另外類似的以色列陸軍的統治者 (Dominator) 「整合步兵戰鬥系統」 (Integrated Infantry Combat System, IICS)，¹¹ 這

¹⁰ “Integrated Visual Augmentation System PM IVAS,” *Program Executive Office Soldier, U.S. Army*, September 16, 2022 browsed, <https://reurl.cc/ZbErMl>.

¹¹ 〈實時信息共享、單兵戰鬥倍增器，以色列多米尼克步兵綜合作戰系統〉，《每日頭條》，2020年5月4日，<https://kknews.cc/zh-tw/military/x4z63rg.html>; Tamir Eshel, “Elbit Systems Extends Dismounted C2 System to Infantry Squads and SF Teams,” *Defense Update*, October 18, 2012, https://defense-update.com/20121018_dominator_ld.html.



圖 6-4 綜合視覺增強系統 (Integrated Visual Augmentation System, IVAS)

資料來源：<https://www.peosoldier.army.mil/Program-Offices/Project-Manager-Integrated-Visual-Augmentation-System/>。

些系統架構內容大同小異，均透過 AR/MR 技術用來提升並強化單兵的戰場環境覺知能力。

三、數位沙盤

沙盤推演一直是部隊用於作戰計畫、學官 / 員訓練的常見工具。通常以桌上或落地型平台構成，以縮小比例的立體地形、敵我單位模型構成，也稱為兵棋台。然而隨者 AR 技術軍事運用的開發，數位化的兵棋台未來可成為軍事應用的新工具。

- (一) 美國陸軍擴增實境沙盤 (Augmented REality Sandtable, ARES)：美國陸軍研究實驗室於 2015 年完成了 AR 版數位沙盤 (ARES) 的原型開發，主要運用了現成的投影儀、簡單的 LCD 顯示器、筆

記本電腦以及微軟公司的電視遊戲機 X-Box 的 Kinect 技術。ARES 可大幅改進戰場視覺表現，減少製作兵棋台的地形和場景的時間與成本，並可快速切換不同場景，為訓員提供了深入的參與度。由目前的 ARES 數位沙盤發展觀察，其主要特點包括：1. 廣泛的地形類型選擇；2. 可用手勢控制；3. 即時地形生成（可現場用手「塑造」用以表示障地或工事等）；4. 符合人類感官的直觀的界面；5. 可跨區進行遠端程協作，有利不同單位同時參與；6. 系統具高度可擴展性。¹²

- (二) 澳大利亞 AR 海軍作戰系統：由微軟、SAAB、澳大利亞海軍共同研發，為基於微軟 HoloLens 所建構的一種可視化作戰指揮系統，澳大利亞海軍嘗試通過 AR 技術進行輔助作戰，包括查看 3D 可視化作戰系統，可以清晰地看到實時海陸空作戰工具。據悉，該系統最大的亮點是結合了 SAAB 先進的海軍防禦體系，並且以 MR 形

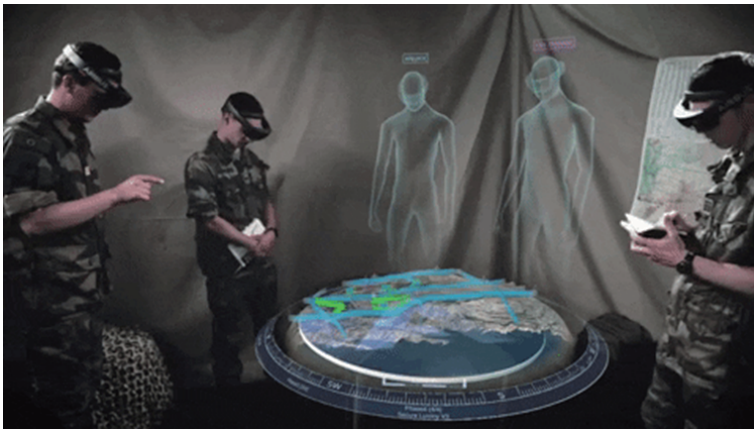


圖 6-5 法國空巴全息戰術沙盒作戰系統

資料來源：<https://hololens.reality.news/news/airbus-previews-military-sandbox-app-for-hololens-0203995/>。

¹² “Augmented REality Sandtable (ARES),” *Youtube*, January 21, 2015, <https://reurl.cc/zNoYop>.

式疊加顯示。而且後續還會結合戰術顯示介面，類似於 3D 全息顯示的方式，使整體作戰系統更清晰、更明確。

- (三) 法國空巴全息戰術沙盒作戰系統：特色在於運用全息顯示輔助決策。此系統與澳大利亞的 AR 海軍戰術指揮方案有些類似，法國空巴國防航空部門也有一套基於 HoloLens 的全息戰術沙盒系統。該應用其實就是一個 AR 版戰術沙盒，特點是基於法國空巴 Fortion Tactical C2 軍事應用系統，讓任務彙報或演習變得更具互動性也更方便、直觀，也可用於輔助決策等。法國空巴表示：與傳統戰術沙盒相比，AR 沙盒更能符合新時代軍隊的需求，同時它的互動方式容易瞭解，除了可以加速軍事計畫準備之外，還可支持遠程協作任務準備，及增強軍人對戰場的感知。利用 HoloLens 的手勢識別技術，可以透過旋轉、標記、操控等動作與全息地圖互動，並從各種角度查看地形，在上戰場之前找出地形優勢。¹³

四、遠端作戰平台

- (一) 以色列在 2019 年推出次世代戰甲車概念設計，利用既有 M-113 裝甲人員運輸車為基礎分成兩大部分改裝，首先將內部改為「玻璃座艙」，藉由大型螢幕提供車外環境，同時也可藉由遠距控制站進行操控，特別適合在城鎮戰環境中運用，除可提高戰場感知外，由於可由遠距控制，更可大幅降低士兵的傷亡。¹⁴
- (二) 挪威在 2017 年間，與 BAE System 公司合作，推出具備「360 度戰場視野」(BattleView360)¹⁵ 能力的 CV-90 步兵戰鬥車新概念設計，車內以大型顯示幕結合車外影像與各類資訊，因此被稱為「玻璃戰車」(Glass Tank)。實際上這都是 AR 的整合運用，可以大

¹³ Tommy Palladino, "Airbus Previews Military Sandbox App for HoloLens," *Next.Reality.news*, August 23, 2019, <https://reurl.cc/RX8v2Z>.

¹⁴ 李思平，〈未來戰鬥車的標準！未來戰鬥載具技術展示車【AUSA 2019】〉，《尖端科技》，2019 年 10 月 18 日，<https://www.dtmdatabase.com/News.aspx?id=903>。

¹⁵ "BattleView360," *BAE SYSTEMS*, <https://reurl.cc/ErkGm1>.

幅提高車組人員的戰場感知與反應能力，若結合遠距影像傳輸與控制系統，則可搖身一變為地面無人載具，如同無人機般進行遠距作戰任務的執行，並可即時接戰。

- (三) 烏克蘭 Limpid Armor AR 坦克作戰系統：烏克蘭本土公司 Limpid Armor 開發了一套結合微軟 HoloLens 的軍事頭盔，以及一套完整的軟體系統。該項目專為裝甲兵種開發。據悉，由於坦克和裝甲兵的環境感知能力較差，視野通常受限。而結合 AR 頭盔之後，裝甲兵可以在坦克內部不用開啟艙門，即可通過 AR 觀察、敵我軍態勢。結合包括坦克集成光學或熱成像傳感器數據等系統數據，可為裝甲兵提供 360 度全場景的戰場覺知能力，甚至可據以指揮作戰行動。¹⁶

從前面各項作戰應用案例可知，在戰場上 AR/MR 是更好的選擇，因為它具有態勢感知能力。它將圖形疊加在透明鏡頭上，這樣就可以看到帶有附加資訊的真實世界。雖然 VR 可以在圖形現實中重現現實生活中的場景，以進行無限的測試運行和練習，但畢竟只是在全虛擬的環境中操作，有利於對高度危險的作業行動場景進行反覆演練，不適合也無法運用於戰場實地，但 AR/MR 可以。通過堅固耐用的 AR/MR 護目鏡，軍隊可以為部隊個員配備高度先進的資訊系統，使用疊加層資訊來識別目標和協助，查看和路徑查找以及資訊蒐集以獲得戰術優勢。

雖然我國地面作戰環境與美軍的遠征特性不同，我國地面部隊通常會在自己熟悉的環境下進行防衛作戰，和美軍動輒在不熟悉的戰場環境進行作戰的需求不同，對於地理環境資訊的依賴性也沒那麼強，但在高強度的戰鬥環境下，原有的地形地貌也會隨之改變。以俄烏戰爭為例，在長時間的敵火攻擊下，市鎮的建築被損毀、道路被殘骸封閉，原有的識別物可能也不復存在，這時，能有類似視覺擴增系統的設備，便能減輕作戰人員的負擔，使其專注在執行作戰任務行動，而不必分心去確認與辨識目前的所在位置。

¹⁶ John Mannheimer, "LimpidArmor AR-Enabled Tank Headset," *HICONSUMPTION*, September 5, 2018, <https://reurl.cc/nOyD3d>.

除此之外，AR/MR 系統的演進，對於地面作戰在指揮層級中，也能提供大幅的優勢。傳統的沙盤系統，受限於物理的沙盤，精細度與尺寸無法兼顧，敵方與友軍的單位即時位置的更新也需要藉由人工來進行調整，但以 AR/MR 技術整合的沙盤，則可以在有限的空間中，收納整個戰區的地理資訊，可進行任務的規劃與演習 / 作戰結束後的任務歸詢，由於相關的數據皆可數位化儲存，因此可以精準地重放整個演習 / 作戰的過程。在實際戰鬥中，前方作戰單位所獲得的即時資訊與感測器資料，也能藉由傳輸與後方決策單位供指揮官掌握即時的戰場資訊，除精簡人力外，視覺化的介面也有利於資訊的接收與處理效率。

參、XR 用於後勤維保醫療

一、使用 XR 技術進行設備維護提升裝備維修效率

運用 XR 技術，可以為武器裝備製作 1:1 的數位化形體，讓設備的每個部件以 3D 形式在顯示器上展現，並分布在對應的虛擬位置。有了它，無論設備多麼龐大，檢修人員都可以隨時檢修設備的任何一個部件，後方專家也可以藉助這一技術，指導現場人員進行檢修操作。基於 XR 技術，戰時裝備維修人員可迅速診斷出裝備的故障原因，並擬定恰當的維修方案，提高裝備維修效率。軍隊中使用的大多數裝備都具高度專業化與技術性，因此維護成本往往相對較高，技術人員需要專門的培訓。維保過程中的失誤不僅可能導致巨額的金錢責任損失，甚至可能使人員的生命處於危險之中。為了讓技術人員具備維修和維護重要裝備所需的專業知識，XR 技術正迅速成為最佳選擇。在 XR 技術協助的說明下，可以創建即時 3D 模型和視覺化指導，以簡化高度複雜的學習過程，從而減少失誤。

GridRaster 是一家應用 AI 與 AR/VR 技術改變軍事設備維護的方式的公司。通過掃描建構裝備的 VR 模型，該公司讓工程技師使用 3D 原理圖來瞭解他們正在處理的內容，然後通過 AR 指導來幫助識別元件。該公司聲稱，擁有不到 1 年經驗的美國軍事工程技師能夠在產品的說明下超越經

驗豐富的人員。¹⁷

AR 技術在工業製程與維修領域的成功運用，促使美國空軍實驗室於 2007 年時和哥倫比亞大學合作進行了「AR 維修」(Augmented Reality for Maintenance and Repair, ARMAR) 計畫，透過引進這項嶄新技術於軍事部門，可使軍事裝備的維護與修理成本大降並且更具效率。¹⁸ 例如，在這套系統的協助下，陸軍工程技師可在裝甲車輛狹窄的砲塔內執行 18 項現場修理工作。¹⁹ 2015 年，微軟公司成功開發 HoloLens，目前已開發到第二代，且已廣泛運用於軍方的維修作業。法國武器裝備總署 (Délégation Générale pour l' Armement) 則引進 AR 技術對戰機引擎進行維修檢驗，由於戰機引擎複雜且施工的工序相當複雜，運用 AR 技術可以有效降低施工人員工作負荷，亦可減少程序錯誤重新翻工所增加的額外成本。²⁰ 2021 年 3 月，美國海軍開發完成「AR 遠距維修支援服務」(Augmented Reality Remote Maintenance Support Service, ARRMSS) 系統，這套系統透過視訊與音訊將兩個不同地方的使用者連結。透過此套系統運用，可使艦隊維修人員在裝備故障與維修時，能與位居遠方的工程師同處一個空間進行討論。²¹ 如此，可減少隨艦出海工程師的數量，同時在裝備故障時能夠立即排除，確保裝備正常運作以利各項任務遂行。前揭不過列舉大端，事實上 XR 技術在軍方維修與保養領域的運用既深且廣，在節約人員與成本的考量下，已成為一股無可抗拒的趨勢。

¹⁷ “Aerospace & Defense,” *GRIDRASTER*, September 16, 2022 browsed, <https://reurl.cc/gMxak4>.

¹⁸ Steven J. Henderson and Steven K. Feiner, *Augmented Reality for Maintenance and Repair* (Ohio, Wright-Patterson AFB: Air Force Research Laboratory, August 2007), *passim*.

¹⁹ Wei Wang, Songgui Lei, Haiping Liu, Taojin Li, Jue Qu and Ang Qiu, “Augmented Reality in Maintenance Training for Military Equipment,” *Journal of Physics Conference Series* 1626(1):012184, October 2020, <https://reurl.cc/oQpZ0l>.

²⁰ Josselin Droff and Benoît Rademacher, “MCO 4.0. Le potentiel destechnologies de l’industrie 4.0 appliquées au maintien en condition opérationnelle (MCO) des équipements de défense, Étude n° 65,” *IRSEM*, April 2019, p. 154.

²¹ “Augmented Reality Headsets Aid Navy Aircraft Maintenance,” *Military & Aerospace Electronics*, March 1, 2021, <https://reurl.cc/O4zEkg>.

二、使用 XR 技術執行戰場遠端醫療

美國 Purdue 大學的研究員 Juan Wachs 指出，「最困難的事情就是 —— 將手術相關專業知識提供給最需要的人（如戰場上缺乏經驗的醫生）」，所以設計出一款「擴增實境的遠距指導」系統，讓缺乏經驗的醫生在戰場、災害或是鄉村等地進行複雜的醫療程序時，皆能受到擁有豐富經驗醫生的遠端幫助。就算沒有資深醫生的領導，藉由穿戴 AR 技術的裝置，並遠端連結全球的專業醫療人員，讓缺乏經驗的醫生治療傷患時，可以及時得到專業醫療人員的指導，而虛擬刀路和實際手術部位的相疊合，也讓治療發揮到最大成效，降低傷亡人數。²²

過去在進行遠端指導（英文稱之為 telestrator）時，手術執行醫生的視線必須在傷患與螢幕間進行來回移動，也因此大大提升失誤產生的可能性，但 Purdue 系統讓使用者可以保持專注力在手術的過程，達到手術潛在失誤率的降低。美國海軍醫務人員已經在現場測試了用於護理提供、培訓和遠程指導應用的擴增實境系統。在 USNS Mercy 號醫院船上進行的一項測試中，一名醫院醫療人員使用 AR 護目鏡將模擬程序的實時影像轉播給聖地亞哥的醫生。當海軍艦艇在海上時，這種遠程呈現系統可以讓岸上的專家提供培訓指導，甚至可提供現場實時的醫療建議。²³

肆、台灣產業特性

國發會於 2018 年 3 月啟動「亞洲·矽谷計畫 —— 推動擴增及虛擬實境產業鏈結全球商機」推動計畫，以「XR EXPRESS TW」為品牌形象，已輔導超過 100 家（次）新創團隊，媒合國內外大型企業，並帶團參加 2018 年 InnoVEX、加拿大 VR/AR Global Summit 與日本 SIGGRAPH Asia

²² “System for Telementoring Using AR,” website of Juan P. Wachs at the School of Industrial Engineering at Purdue University, September 16, 2022 browsed, <https://web.ics.purdue.edu/~jpwachs/>.

²³ “Surgeons May Get Remote Assistance with New ‘Telementoring’ System,” *Purdue University News*, August 24, 2015, <https://reurl.cc/lel7aY>.

等國際型科技展會。此外，為提供更完善的國際交流網絡以及資源互惠共享管道，「XR EXPRESS TW」亦與全球最大 AR/VR 社群矽谷 SVVR、日本首家 AR/VR 育成中心 Tokyo XR Startups 等建立合作關係，期能透過上述資源，幫助台灣新創團隊順利開拓海外市場，將台灣的創新能量帶向國際，並推動國內產業轉型升級。²⁴ 國發會所推動的專案係由「社團法人台灣虛擬及擴增實境產業協會」（TAVAR）²⁵ 承接執行，並於 2019 年開始發布《台灣 XR 產業白皮書》，²⁶ 內容包含台灣與全球 XR 產業發展現況、台灣 XR 產業政策建言以及 XR 產業應用等等資訊。

雖然 XR 能為產業帶來重大的變革，但是當前台灣 XR 的產業環境仍有問題待克服。XR 產業需要資訊管理、3D 圖像、跨領域知識等三面向的人才。目前資訊管理的人才較充足，而 3D 圖像專業人才和跨領域整合人才仍需要學界加速培練補充。

就產業生態來說，XR 完整的產業鏈包含了硬體、內容和服務三大塊，台灣廠商在這三大領域的投入相對失衡，主力廠商幾乎都集中在硬體方面，而內容和服務等軟體方面的廠商數量雖已有提升，因多屬新創，資本規模差距甚遠。對於要投入硬體領域的創業者來說，這樣密集的產業群聚自然是帶來了便於尋找製造團隊的環境，但對於軟體內容開發商來說，由於缺乏資金支持，很難做大，當內容不足，相關的服務也就很難撐起來，綜效也就不容易發揮，如此循環就會深陷畸形的產業環境。為改變這個狀況，政府已將 XR 產業的發展政策視為國家級的戰略，積極整合資源與分配，給予內容開發商更多的支持和扶助，尤其是基於硬體或是專利技術上的整合開發應用，利用我們密集的硬體製造資源，發揮更大優勢。

當然僅僅是扶持相關內容開發商是不夠的，相關法規也必須及早研擬與即時調整，為產業整體鋪設有利的環境。台灣產業發展往往技術領先需求，需求領先法規，法規永遠都是走在最後，因此當相關服務要發展時，

24 〈AR/VR 團隊屢獲國際關注 為台灣新創開啟世界大門〉，《國家發展委員會產業處》，2019 年 2 月 19 日，https://www.ndc.gov.tw/nc_27_32135。

25 https://www.tavar.tw/about_tavar.aspx。

26 《2020 台灣 XR 產業白皮書》，《XR EXPRESS TW》，<https://reurl.cc/LMZ9KX>。

往往會受到現行法規限制。台灣產業約三成集中在電子製造業，而 XR 產品將會是各種產業的重要發展關鍵，政策法規能否及時因應產業的發展，將會影響擁有國際級技術的國內廠商在國內深根發展的意願。

伍、小結

即使世界正在走向和平，世界各地的軍隊仍在繼續為任何糟糕的局勢做好準備。與大多數專注於提高士兵殺傷力的軍事技術不同，XR 專注於提高作戰效率，使其應用通用且具有成本效益。隨著戰術優勢，而不是原始火力成為衡量軍隊實力的新標準，XR 技術在戰爭藝術中找到了永久的立足點。此外，隨著 5G 網路的推出，憑藉其速度、容量和數據響應以及雲技術的處理能力，XR 技術的運用將變得容易，相對地也由於 XR 屬於資訊系統應用的特性，資訊安全保障也須同時確保。XR 這類沉浸式技術追蹤使用者的感受、判斷、反應和更廣泛的特徵等等最私密的一些數據，想像一下當這些資訊落入壞人之手時會發生什麼。另外，假訊息的影響亦需要予以關切，考量一個假訊息突破資安漏洞，透過 XR 裝置將戰士帶到一個有危害的戰區。戰士是否能百分之百放心信任透過 XR 裝置接收到的訊息是可靠的？在將當今的 XR 技術應用於軍事場域時，就像使用人工智能一樣，國防組織領導人需要闡明明確的使用規則和協議，確保單位與個人能以道德、負責任的行為來使用。此外，於創建沉浸式系統和操作方式時，徵詢從神經科學家到行為理論家等的不同領域專業意見，將有助在降低技術風險的同時保護軍事人員。

未來戰場是陸、海、空、天、電多維一體的數字化戰場，擴增實境技術虛實融合、人機交互的特點，對於軍事應用具有得天獨厚的優勢。隨著數據的應用範圍變廣，有越來越多的國家積極將 XR 技術導入作戰環境中，希望藉此加強軍事戰況的分析能力，提升軍隊戰力，走在科技戰爭的前端。

第七章 體感科技的應用：教育與訓練

劉姝廷*

壹、前言

2022年烏俄戰爭爆發，烏克蘭在軍隊戰力、後備動員以及全民防衛等能力，皆體現以弱制強、以小搏大的對抗精神，值得我國參考。¹在中共不放棄武力犯臺的兩岸緊張情勢下，我國如何因應訓練場地、武器裝備及人力資源有限等現實條件，提升軍隊訓練與全民國防教育的品質，是當前亟思的重要課題。此問題涉及兩個層面的探討：一是效率，意即如何妥善運用訓練資源；二是效能，意指如何確實達成訓練目標。由此而言，我國不僅須善用既有優勢，並要藉此發揮加乘效果，而我國的科技實力便是提升教育訓練效率和效能的厚實基礎與最佳解方。

在此脈絡下，教育訓練與數位內容產業的應用逐漸受到重視，隨著「虛擬實境」（VR）、「擴增實境」（AR）、混合實境（MR）及延展實境（XR）等體感科技日益成熟，數位內容產業朝向融合體感科技的趨勢。體感科技是運用科技與內容，讓使用者在任何時間與地點，感受「真實」體驗的技術，其應用於教育訓練，打造出擬真（stimulate）的訓練情境，並彰顯互動的特色，可減輕軍事訓練與國防教育在物力、財力及人力的負擔，並能提升學習成效，在 COVID-19 疫情影響與元宇宙（metaverse）技術發展的趨勢下，尤其受到關注。

* 國防安全研究院國防戰略與資源研究所政策分析員。

¹ 張玲玲，〈【全民國防】烏國頑強抗俄 體現全民國防〉，《青年日報》，2022年7月22日，<https://reurl.cc/5pd5ky>。

貳、我國體感科技產業的特性

一、定義與範疇

根據我國經濟部對體感科技的定義，係指根據特定主題創造出現實或非現實的內容，滿足使用者身歷其境的想像並延展出的產品或服務。體感科技包含「虛擬實境」、「擴增實境」、混合實境及延展實境等，其由三項次領域所支撐：一是軟體內容，意即利用特定的裝置，提供使用者沉浸式的影像空間，以及可操作和體驗的立體式影音內容；二是體驗服務，係指依循特定主題設計的服務方案，給予使用者主題式身歷其境的體驗；三為硬體設備，作為提供使用者沉浸式影像空間及影音式影音內容的媒介裝置或設備。²

體感科技在我國數位內容產業中為動態創新的科技元素，打造出結合「虛擬實境」、「擴增實境」、混合實境的數位遊戲；涵蓋「虛擬實境」、「擴增實境」的電腦動畫；結合「虛擬實境」、「擴增實境」等體感的數位學習。我國數位內容產業的下一步，即是將體感科技融入數位化生態系，以平台、場域等作為展示或應用的介面，例如「虛擬實境」的體驗樂園，並將「虛擬實境」、「擴增實境」、混合實境應用在博物館、學校教育、古蹟歷史的現場再造等生活教育層面。³

二、產業的發展

我國體感科技業者主要為中小型的新創公司，根據調查顯示，以軟體內容的成長率最為突出，是我國發展體感科技的潛力項目。過去多以國外企業主導，近年我國軟體業者與新創公司加入行列，並在建置軟體之外並涵蓋內容的設計。⁴ 例如成境科技研發的 Red Pill Live 軟體，設計動作捕捉與利用聲音驅動臉部動態技術，讓動畫的角色栩栩如生出現在使用者眼

² 經濟部工業局，《110Taiwan 數位內容產業年鑑》，2021年10月，頁105-106。

³ 經濟部工業局，《110Taiwan 數位內容產業年鑑》，2021年10月，頁74。

⁴ XR EXPRESS Taiwan，《臺灣XR產業白皮書（2019-2020）》，2021年5月，<https://reurl.cc/3YLOXX>。

前。此外，訊連科技以結合「擴增實境」與人臉辨識技術的 FaceMe，支援各種行業及應用，例如美國門禁安控業者 MPS 建置健康偵測站，導入 FaceMe 強化防疫檢查。⁵

另一方面，硬體設備部分，我國體感科技業者自行開發「擴增實境」眼鏡與「虛擬實境」頭顯裝置，並將行銷範圍擴至東亞、東南亞、南亞及中東地區的海外市場。例如宏達電 (HTC) 自行開發出輕量 VIVE Flow「虛擬實境」頭戴裝置，以僅 189 公克的重量為亮點，並主打能與手機配對連接使用，為使用者創造更輕便的使用經驗。⁶ 此外，我國業者亦協助國際大廠代工組裝頭顯裝置和智慧眼鏡，例如廣達、緯創資通與鴻海等科技公司，負責協助美國蘋果和 Google 的組裝工作，並與英國「擴增實境」業者 WaveOptics 合作設計頭顯裝置。⁷

三、機會與挑戰

在元宇宙的趨勢推動下，我國過去在影像處理、頭顯裝置、筆電及平板等科技產品，積累了豐厚的研發與製造能量，成為重要的技術優勢。此外，根據《臺灣 XR 產業白皮書 (2019-2020)》顯示，我國體感科技的研發人才和內容創意人亦被視為兩大優勢基礎。目前我國體感科技產業著重的應用層面，包含遊戲、教育、影音娛樂、展場與直播等。其中以遊戲與教育為我國業者著眼的兩大布局領域，特別在教育方面，於我國 2020 年體感科技應用占比 40.63%，相較於 2018 年成長 2.44 倍，可見其深受臺灣體感科技產業的重視並具發展潛力。⁸

5 〈訊連 FaceMe® 人臉辨識技術獲美國 MPS 採用 打造具備口罩偵測功能的智慧健康偵測站〉，《臺灣產經新聞網》，2020 年 7 月 21 日，<https://reurl.cc/4pDMK2>。

6 楊又肇，〈HTC「VIVE Flow」輕量化 VR 頭戴裝置售價曝光 僅 189 公克能與 Android 手機配對〉，《聯合新聞網》，2021 年 10 月 15 日，<https://udn.com/news/story/10222/5818083>。

7 XR EXPRESS Taiwan，《臺灣 XR 產業白皮書 (2019-2020)》，2021 年 5 月，<https://reurl.cc/3YLOXX>。

8 同註 7。

然而，體感科技產業設備購買和技術研發須投入大量資金，而我國體感科技業者屬中小型的新創規模，大多透過投資人與市場資金的挹注，在此情況下，政府的長期規劃與資金補助對於體感科技產業尤為重要。COVID-19 疫情雖衝擊到我國總體體感科技產業的產值，並因政府財政資源排擠而影響補助規模，然而，就技術面而言，居家防疫封鎖政策的實施，帶來遠距辦公、線上會議及數位學習的需求，以及促進民眾對於「虛擬實境」遊戲與運動的興趣，亦擴大了體感科技業者在「虛擬實境」等產業市場的布局。

參、一般教育的應用

一、應用特色

體感科技結合互動遊戲、影像動畫等數位內容，不僅模擬真實的教育訓練環境，更提供多重感官的體驗，進一步強化學習的效果。就學校課程而言，體感科技除了可以激發學生的學習興趣和專注力，亦能精進教師的教學技能，提供多樣化課程的類型。以國小體育課為例，透過建置不受天候影響的「體感教室」，鋪設具備壓力感應器、螢幕和亮彩的互動型運動地墊，經由老師的平板操作，讓學生體驗單人訓練、循環訓練及團隊競賽，包含核心、平衡及反應能力等體能訓練的客製化課程，提升國小體育課的教學品質。⁹

在 COVID-19 疫情下，體感科技在教育訓練的應用，越加受到矚目。體感科技除了可以使教育訓練突破環境的限制，並促進虛擬空間的互動學習，藉由數位內容的軟硬體建置，亦可精簡人力成本，並減少教材用具的消耗。例如開發生物、數學、英文、地理、地球科學、防災教育等體感科技課程，學生配戴「虛擬實境」的頭盔裝置，身歷其境進入生物課的細胞

⁹ 〈鶯歌國小智能地墊體感教室揭幕，學生驚呼體育課更好玩了〉，《新北市教育局》，2021年1月14日，<https://reurl.cc/MNmO8n>。

內、地理課的特殊地理環境，甚至是抽象的數學世界，透過 3D 模擬的真實教育現場，理解和掌握學習對象的特徵，搭配「虛擬實境」遊戲，促進學生自學能力和學習成效。¹⁰

二、國際趨勢

體感科技應用於教育訓練已成為國際趨勢，並在 2020 年爆發 COVID-19 疫情採取封鎖政策下更加顯著，各方皆積極尋求創新的做法，投入體感科技教育訓練的市場。就市場產業面而言，2022 年體感科技裝置出貨量達 1,400 萬台，年成長率 43.9%，例如國際科技巨頭臉書推出的「Oculus Quest 2」與微軟的「Microsoft HoloLens 2」分別在「擴增實境」、「虛擬實境」的市占率居於首位。¹¹ 2021 年臉書更名為「Meta」，致力發展元宇宙，並成立「元宇宙培訓學院」，促進體感科技的多元應用。¹²

從國家政策來看，以美國為例，其不僅是體感科技發展的最大市場，政府更加強扶持力度，其中以製造、軍事國防與教育方面的體感科技應用為重點項目。¹³ 美國教育委員會（Education Commission of the States, ECS）於 2020 年針對 COVID-19 疫情對教育體系的衝擊指出強化線上教學的創新能力。例如美國莫爾豪斯學院（Morehouse College）與「擴增實境」教育供應商「VictoryXR」及「高通」（Qualcomm）合作推出課程，學生配戴「All-In-One『虛擬實境』系統 Oculus Quest 2」頭盔，於虛擬教室遠距上課。¹⁴

¹⁰ 〈教育科技新高機！我國新創用 VR 把生物、微積分課程變有趣〉，《數位時代》，2020 年 7 月 2 日，<https://reurl.cc/MNmO8n>。

¹¹ 〈元宇宙夯 AR/VR 裝置出貨量將達 1,400 萬台、年增四成〉，《經濟日報》，2022 年 2 月 16 日，<https://reurl.cc/8pAvEb>。

¹² 〈Meta 在我國推元宇宙培訓學院！培養 AR 創作者，為虛擬商機做準備〉，《數位時代》，2022 年 8 月 16 日，<https://www.bnext.com.tw/article/71259/meta-arstuff-tw>。

¹³ 〈美國新興體感科技 1：政策脈絡〉，《中華經濟研究院》，2022 年 7 月 26 日，<https://reurl.cc/MNmjA4>。

¹⁴ 〈穿梭古今、往來全球 AR 教室翻轉高等教育〉，《DIGITIMES》，2021 年 3 月 23 日，<https://reurl.cc/Qble3Z>。

三、我國發展

我國政府推動體感科技產業的相關補助計畫，扶持國內多家體感產業相關業者，並打造出多個示範場地與新創空間。例如建設「體感科技園區計畫」，由中央與地方政府共同合作，創立「digiBlock C 數位創新基地」、「高雄體感科技園區」，作為體感科技的實驗場域，促進體感科技商業化發展，將體感科技應用於教育、醫療、觀光、博物館等領域，推動我國科技產業的轉型與升級。此外，我國政府與國內外廠商進行合作，將體感科技產業連接國際市場，引進技術資源與研發設備，累積與國外政府交流及與民間業者合作的案例。

就教育應用來說，我國政府推動「科技教育」政策，致力於將科技融入教學，創新教學課程與帶動相關科技產業發展。體感科技的教育應用，是以內容為出發點，透過互動遊戲式的情境體驗，增加學生的專注力、記憶力與學習興趣。此外，除了「科技教學」外，教育應用亦拓展至「科技運動」，例如由我國教育部體育署與國立體育大學合辦的「新現代五項運動會」，以體感科技如體感偵測、動態捕捉、互動科技與影像辨識等，進行標榜肌耐力的「VR 飛輪」競賽，以及測試專注力的「科技射箭」比賽項目等，在先進科技的輔助下，有助於學子的體能訓練。¹⁵

肆、國防教育與訓練的應用

一、全民國防教育

前述一般教育應用的案例說明體感科技或將有利於全民國防教育的提升。全民國防教育包含提升國防意識的知識學習及國防技能的體驗學習。例如透過學校課程、展覽等途徑，提升國家整體防衛能力。烏俄戰爭對我國產生警示，並激發我國社會學習國防知識的風潮，全民國防教育不僅限於軍事機關、學校場所，亦不只是紙上談兵（手冊說明），民間組織已投

¹⁵ 經濟部工業局，《110Taiwan 數位內容產業年鑑》，2021年10月，頁140。

入全民國防教育領域，例如「黑熊學院」舉辦自費軍事訓練營。¹⁶ 在此脈絡下，以體感科技創新全民國防教育，可依照社會不同年齡層，設計專屬的訓練教材與模擬情境，同時可隨時、隨地，只要有設備就能自行訓練，符合全民國防教育訓練的要旨。

我國全民國防教育推動「虛擬實境」展覽與數位互動教室。例如新北市三重商工創設的「全民國防情境教室」，包含國防資訊看板、投影式射擊模擬器等設施，提供身歷其境的學習空間，強化國防意識。¹⁷ 新北市白雲國小則設計「飛行體驗課程」，政府支援購置「虛擬實境」裝備，讓小學生體驗飛行員的視野，並感受飛行的樂趣。在學校課堂之外，海軍反潛航空大隊和資策會教研所合作開發「反潛直升機 VR 模擬飛行體驗」，提供一般大眾模擬飛行機會，民眾體驗駕駛直升機，並起降於機場以及成功艦，執行追擊的軍事任務。

二、新兵訓練

新兵基本訓練是針對新入營的平民，進行最初級的生理與心理軍事訓練課程，涵蓋體能訓練、基本槍法與基本急救技術等。我國政府近年投入體感科技新式訓練裝備研發，並建置各式訓練模擬器（場、館）。目前各類型訓練模擬器計有 27 類 487 套，戰場抗壓館及合理冒險場各 2 座，¹⁸ 並將持續新建 4 處戰場抗壓館與合理冒險訓練場，¹⁹ 強化軍隊的基本訓練。COVID-19 疫情下國際思索利用體感科技支援新兵基本訓練，例如 2021 年瑞士國防部建置「虛擬實境」全動態模擬器，突破防疫隔離政策限制，讓新兵在家加強基本戰力的訓練。²⁰

¹⁶ 沈朋達，〈借鑑烏克蘭經驗 民間籲全民國防應強化社會參與〉，《中央社》，2022 年 3 月 25 日，<https://reurl.cc/oQd1Y1>。

¹⁷ 〈結合創意與多元 全民國防新面向 新北市政府榮獲國防部 108~109 年「推展全民國防教育工作」〉，教育部學生事務與特殊教育司，2020 年 7 月 10 日，<https://reurl.cc/dWbjG2>。

¹⁸ 〈109 年度國防部所屬單位法定預算書表〉，《台灣國防部》，<https://reurl.cc/e3m7gm>。

¹⁹ 〈111 年度國防部所屬單位法定預算書表〉，《台灣國防部》，<https://reurl.cc/3o5pWL>。

²⁰ “Swiss Department of Defense Commissions VR Sim,” *Halldale Group*, June 8, 2021, <https://reurl.cc/pMbjAe>.

三、後備教育召集訓練

我國於 2022 年 1 月正式成立「國防部全民防衛動員署」，主要任務為負責教育召集之軍事訓練，並在 3 月推出「新制 14 天教育召集訓練」，將原先 7 天的召期延長至 14 天，同時加強教召訓練的強度，例如在災害防救、武備保養、戰傷急救、兵器教練（武器射擊）等訓練課程增加課程時數。²¹ 這顯示教育訓練在後備軍力的重要角色與改革企圖。特別是在往後具有龐大訓練需求，以及固定式訓練課程條件下，透過體感科技的軟體模組搭配硬體設備，將可強化如「灘岸守備」、「城鎮戰」等情境任務，並增進後備部隊的實戰體驗，有效達到教召效果。²²

伍、軍種訓練的應用

一、陸軍訓練

我國陸軍的訓練項目，包含基礎教育、專長訓練與聯合演訓，例如軍種操演的重砲射擊、聯兵旅戰術操演等。我國陸軍陸續推出「組合型戰車訓練模擬器」，發展單車、組、排、連等對抗模式，模擬戰車射擊時產生的後座力與地面震動起伏，訓練學員克服戰場恐懼及緊急應變能力；「T91 步槍射擊模擬器」則模擬戰場環境，中控台並提供各靶位槍枝狀態與彈著結果顯示等監控功能，掌握學員的射擊訓練狀態；「沉浸式互動模擬射擊系統」包含人體姿態感應器組件、通訊系統與頭戴式顯示器等裝置，強調虛擬動態環境的沉浸訓練。²³

在 5G 技術與元宇宙市場趨勢下，各國近年加強陸軍訓練的體感科技應用，例如 2020 年美國陸軍推動「擴增實境」和「虛擬實境」士兵培訓

21 〈召訓構想〉，《國防部全民防衛動員署》，<https://reurl.cc/3YL5nL>。

22 寧博，〈【軍事論壇】AR 科技擴增視角 虛擬戰訓實境〉，《青年日報》，2020 年 4 月 10 日，<https://reurl.cc/GxbOQy>。

23 陳姿萍、机慧瑛，〈「擴增實境」技術運用在陸軍部隊訓練之探討〉，《陸軍後勤季刊》，第 2 期，2020 年 5 月，頁 79-30。

計畫，透過「擴增實境」、遠端協同作業，特別加入 5G 科技支援，建置安全教學場景並進行野外訓練輔助，訓練人員不僅可在「擴增實境」中觀看影像，建置語音紀錄和文件，並透過 5G 提高移動無線通訊的數據傳輸速率，使不同基地的訓練人員在共享的模擬環境中進行訓練，強化「擴增實境」和「虛擬實境」的效率和可行性。²⁴

二、海軍訓練

我國海軍的訓練範疇涉及陸戰體能與技能訓練，以及海上的泊港訓練、耐航訓練及實兵對抗操演等。我國海軍建置「海軍艦艇訓練模擬系統」，整合體感科技的軟硬體設備作為智慧作戰訓練系統，藉由團隊訓練情境的模擬，進行任務性團隊多人協作的模擬演訓。²⁵ 體感科技業者正積極開發海軍訓練項目，例如 BAE Systems 利用 Microsoft HoloLens，研發出英國海軍的「擴增實境」潛艦戰鬥系統，用以觀測周邊海域資訊。此外，印度的 AR、VR 和 MR 開發公司 FusionVR 也與印度的海軍陸戰隊進行合作，被稱之「現代印度的塑造者」。²⁶

近年來，「擴增實境」和「虛擬實境」已成為美軍軍事訓練的常規途徑。例如美國海軍使用 Magic Leap Horizons 開發的「擴增實境」訓練系統，訓練人員戴上 Magic Leap One AR 頭戴的裝置，可在各種模擬場景，包含充滿危機的戰鬥場景中進行「擴增實境」軍事訓練。此外，美國海軍執行的「BlueShark」計畫，讓訓練人員練習控制船艦，在虛擬環境下訓練協作系統。此外，「Avenger」專案為訓練美國海軍飛行員，利用「擴增實境」技術實施管理飛機和執行任務的訓練課程。²⁷

24 〈美國新興體感科技 1：政策脈絡〉，《中華經濟研究院》，2022 年 7 月 26 日，<https://reurl.cc/MNmjA4>。

25 〈海軍艦艇訓練模擬系統〉，《全球動力科技公司》，<https://reurl.cc/D3M25E>。

26 XR EXPRESS Taiwan，《臺灣 XR 產業白皮書（2019-2020）》，頁 36，<https://reurl.cc/3YLOXX>。

27 〈【Wired 硬塞】美軍正在打造自己的元宇宙〉，《INSIDE》，2022 年 5 月 19 日，<https://reurl.cc/YX5ad0>。

三、空軍訓練

我國空軍主要的訓練範圍，涵蓋飛行前置訓練、模擬機訓練、飛行訓練等課程。我國體感科技產業積極朝向空軍訓練的應用，例如美國空軍採購宏達電（HTC）VIVE Pro 頭戴裝置進行模擬飛行訓練，打造擬真且低成本的模擬場景，提升飛行員學習效率。²⁸除了基礎的訓練課程，美國空軍推出「虛擬實境」程式訓練器（VRPT）系統，改變傳統戰鬥機訓練方式，讓訓練人員在沉浸式的飛行環境更快進入狀況。此外，美國空軍 F-15C 戰機的訓練中心，利用「虛擬實境」眼鏡，作為新進訓練人員的初級飛行訓練，應用體感科技進行訓練程度的分級有利提升訓練效率。²⁹

陸、小結

體感科技不僅可減輕軍事訓練與國防教育在物力、財力及人力的負擔，提升學習成效，並在軍事訓練的應用過程中，依不同的訓練程度和目標，呈現發展潛力並發揮重要作用。例如全民國防教育的「虛擬實境」展覽與數位互動教室；新兵基本訓練的體感技能訓練與抗壓模擬訓練；後備教育召集的情境實戰任務與救護模擬訓練等。體感科技亦應用於不同軍種的訓練，例如陸軍的戰鬥車模擬訓練、海軍的艦艇訓練模擬系統與空軍的虛擬空戰培育訓練，展現專業化特徵。

各國國防產業正跟上元宇宙的趨勢，以體感科技加速升級，如軍事訓練和全民國防教育的應用。在政府長期規劃與國家資金挹注下，將體感科技結合軍事教育訓練，將可進一步提升我國軍備戰力與社會韌性，帶動體感科技產業朝向國防與軍民兩用發展。體感科技在我國數位內容產業中扮演重要的推進角色，其透過軟體內容、體驗服務及硬體設備等三項次領域

28 〈美空軍採 VR 模擬培訓 提升飛行員學習效率〉，《DIGITIMES》，2020 年 7 月 30 日，<https://reurl.cc/7pA811>。

29 〈美國空軍新進學員「B 課程」：VR 電玩訓練飛行〉，《中時新聞網》，2021 年 10 月 18 日，<https://reurl.cc/aGbYm3>。

支撐，以體感科技的軟體內容應用成長率最為突出，過去多受跨國企業主導，近年我國軟體業者與新創公司加入行列，在我國科技研發與創意人才的優勢基礎上，將帶動科技產業的升級，並促進國防教育和軍事訓練的多元應用。

壹、前言

2022年9月發布之《2022年聯合國科學報告》(United in Science 2022)指出,2018年至2022年之全球均溫已較1850年至1990年工業革命前水準上升1.17度,¹逐步逼近2015年《巴黎氣候協定》(Paris Agreement)希望將升幅控制在1.5度以內的限度。而依據2022年2月聯合國政府間氣候變遷專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第6次評估之第二工作小組報告《衝擊、調適與脆弱度》(AR6 WGII ‘Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability’)顯示,升溫幅度、極端氣候與天氣事件的增加,會使全球部分區域的跨國衝突情勢惡化或延長;²極端氣候與天氣事件頻繁發生的「新常態」(new normal),對於維繫國家安全及區域穩定的國防單位帶來極大挑戰。一方面,當大型自然災害發生前後,國防單位需要出動人力及軍用設備資源協助支援減災、防救災作業;另一方面,極端天氣亦會影響國防單位的運作,包含軍事基地

* 國防安全研究院國防戰略與資源研究所政策分析員。

¹ “Climate Change Impacts ‘Heading into Uncharted Territory’, Warns UN Chief,” *UN News*, September 13, 2022, <https://news.un.org/en/story/2022/09/1126511>; World Meteorological Organization (WMO), United Nations Environment Programme (UNEP), Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), Global Carbon Project (GCP), UK Met Office, “United in Science 2022: A Multi-organization High-level Compilation of the Most Recent Science Related to Climate Change, Impacts and Responses,” September 2022, https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=11305.

² IPCC, 2022: Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, February 27, 2022, pp. 3-33.

與基礎設施、部隊平日演習活動與戰備力，乃至戰時所需的後勤運補等。

美國國防部首席永續官 Joe Bryan 即表示，對國防單位而言，氣候變遷並非帶來外部性（externality）的不利因素，而是持續且根本性地去形塑美國在軍事防衛的各個面向，並已成為政策制定所依據的脈絡，包含：戰區地形、部隊戰力、美國與盟邦及敵對競爭國之間的關係，因此須正視氣候變遷對國防單位所帶來之衝擊意涵，及去理解為何要投資國防預算來減輕衝擊；³ 其中綠能之應用，則被視為強化國家安全與部隊韌性的重要環節。誠然，在淨零碳排的全球趨勢下，屢出現要求國防單位應進行減碳及揭露碳排放量的呼聲，然而在執行軍事碳排放估算與揭露仍有諸多困難的現況下，較為實際可行之做法，除了研擬如何減少現有基地設施之能源消耗、提高軍事運輸裝備之能源效率外，亦須關注如何以綠能增進國防單位的能源選擇，並維繫其在區域衝突或極端天氣事件影響下的戰備力及韌性。本章即聚焦於軍事綠能應用，首先檢視綠能於非戰場與戰場兩大應用層面之國際現況，續探討我國國防單位順應國家 2050 年淨零碳排路徑而可考慮採行之處。

貳、軍事綠能應用之國際趨勢

一、非戰場層面之綠能科技

（一）軍營綠能微電網

1. 美國

近年極端天氣事件的衝擊，以及中國積極拓展綠能科技並稱霸全球的野心，促使美國拜登政府訂定相對應之扶植綠能及國家安全政策，並規劃於 2050 年前實現淨零碳排的國家目標。2022 年 8 月，美國國防部負責環境與能源韌性事務的副助理部長基德（Richard Kidd）明確表示，面對中國在各種清潔能源技術的投資，美國不會讓其專美於前，亦刻正投入研發

³ “Addressing Climate Change in US Defense Strategy and Budget,” *Brookings Institution*, May 22, 2022, <https://www.youtube.com/watch?v=sf76fcBFRss>.

能支援部隊作戰且協助減碳的綠能科技，以確保能跟進或甚至領先中國。而結合太陽光發電、電池儲能之微電網系統即為重點項目之一，據估計美國國防部對於國內微電網市場需求占比近三成，微電網建置除可大幅減少偏遠軍事基地的能源運補需求，亦可帶動國內綠能產業發展。⁴

早先於 2021 年 9 月美國國防部發布《氣候調適計畫》（Department of Defense Climate Adaptation Plan）臚列五項待優先執行之「行動主軸」（Line of Efforts, LOEs），其中第四項主軸「供應鏈韌性與創新」（Supply Chain Resilience and Innovation）已提及將藉由國防部的購買力，驅動具軍事任務效益，亦可減緩氣候變遷的關鍵技術發展，例如微電網和電池儲能系統（Battery Energy Storage System, BESS）。⁵ 隨後於 2022 年 2 月發布《美國陸軍氣候戰略》（United States Army Climate Strategy）則進一步明定 2035 年前所有分布在全球各地、總計超過 130 處的美國陸軍設施都要安裝微電網，2040 年前所有陸軍設施必須以綠電與電池儲能滿足核心任務之能源需求，而任務保障設施（Mission Assurance Installation）、⁶ 動員戰力設施（Mobilization Force Generation Installation, MFGI）⁷ 及投射平台

⁴ David Vergun, “U.S. Should Not Surrender Clean Energy Technology to China, DOD Official Says,” *DOD news*, August 25, 2022, <https://www.defense.gov/News/News-Stories/Article/Article/3064183/dod-preparing-for-climate-change-impacts-official-says/>.

⁵ Department of Defense, Office of the Undersecretary of Defense (Acquisition and Sustainment), “Department of Defense Draft Climate Adaptation Plan, report submitted to National Climate Task Force and Federal Chief Sustainability Officer,” September 1, 2021, pp. 4, 6.

⁶ 任務保障（Mission Assurance）指為達成軍事任務韌性、確保任務必要功能及資產（包括人員、設備、網絡、資訊、基礎設施和供應鏈等）所採取的行動；U.S. Department of Defense, Instruction Number 3020.39: Mission assurance policy for the Defense Intelligence Enterprise (DIE), September 21, 2020, https://www.esd.whs.mil/Portals/54/Documents/DD/issuances/dodi/302039p.pdf?ver=JPHOUDssXNNUJ_zp15tWcw%3D%3D.

⁷ 動員戰力設施（Mobilization Force Generation Installation, MFGI）指任何軍隊動員的關鍵設施；Joseph Whitlock, “The Army’s Mobilization Problem,” *War Room – U.S. Army War College*, October 13, 2017, <https://warroom.armywarcollege.edu/articles/armys-mobilization-problem/>.

(Power Projection Platform)⁸ 等將會獲得電力優先分配。⁹ 目前美國陸軍已執行 950 多項綠能方案，包括肯塔基州陸軍諾克斯堡 (Fort Knox) 太陽光電場 2.1 千瓩 (Megawatt, MW)，發電裝置容量總共達 480 千瓩，並規劃於 2024 年前再行安裝 25 座微電網。¹⁰

繼美國陸軍發布《氣候戰略》之後，美國海軍於 2022 年 5 月公布《2030 年氣候行動計畫》(Department of the Navy Climate Action 2030)，表示自 2008 年以降海軍部門的能源消耗已下降，且自 2012 年已開始提供多餘綠電至商業電網，未來規劃以公私合作與第三方融資的方式投入分散式發電 (Distributed Generation)、智慧電網 (Smart Grid) 與控制系統，並最大化地建置具網路安全的綠能微電網和長時間電池儲能設備，以強化電網穩定性並維繫海軍及海軍陸戰隊核心任務作業之連續性。¹¹ 位於加州的米拉馬海軍陸戰隊航空站 (Miramar Marine Corps Air Station Miramar) 即為前述 2012 年起提供多餘綠電至商業電網的範例，該基地起初使用鄰近垃圾掩埋場所提供的沼氣進行發電，發覺此模式具潛在經濟效益，遂與美國能源部之國家再生能源實驗室 (National Renewable Energy Laboratory,

⁸ 投射平台 (Power Projection Platform) 指可進行戰略動員、部署一或多個優先現役常備部隊或後備部隊之陸軍設施，配合戰略海港和機場支援國家戰略之執行；Natalie R. Myers, Michelle E. Swearingen and James P. Miller, “Integrated Climate Assessment for Army Enterprise Planning: Deployment Infrastructure,” *U.S. Army Engineer Research and Development Center (ERDC) and Construction Engineering Research Laboratory (CERL)*, February 2017, <https://erdclibrary.erdcdren.mil/jspui/bitstream/11681/26421/1/ERDC-CERL%20TR-17-6.pdf>.

⁹ Department of the Army, Office of the Assistant Secretary of the Army for Installations, Energy and Environment, “United States Army Climate Strategy,” February 2022, https://www.army.mil/e2/downloads/rv7/about/2022_army_climate_strategy.pdf.

¹⁰ “Microgrids: the Way forward,” *International Microgrid Association*, September 2021, <https://internationalmicrogrids.org/wp-content/uploads/2022/01/2022.01.12-Microgrids-The-Way-Forward.pdf>; Department of Defense, “Fiscal Year (FY) 2023 Budget Estimates: Military Construction, Family Housing, Defense-Wide, Justification Data Submitted to Congress,” March 2022, https://comptroller.defense.gov/Portals/45/Documents/defbudget/fy2023/budget_justification/pdfs/07_Military_Construction/Military_Construction_Defense-Wide_Consolidated.pdf; “Microgrid at Marine Corps Air Station Miramar,” *Official U.S. Marine Corps Website*, June 30, 2021, <https://www.marines.mil/News/News-Display/Article/2677033/microgrid-at-marine-corps-air-station-miramar/>.

¹¹ Department of the Navy, Office of the Assistant Secretary of the Navy for Energy, Installations, and Environment, “Department of the Navy Climate Action 2030,” May 2022, <https://www.navy.mil/Portals/1/Documents/Department%20of%20the%20Navy%20Climate%20Action%202030%20220531.pdf>.

NREL) 合作，打造結合沼氣、太陽光電、太陽熱能 (Solar Thermal Energy)，傳統天然氣與柴油發電，以及電池儲能的先進微電網，可在緊急事件或停電的情況下，提供整座基地近 21 天的電力需求，亦可提供緊急電力予當地社區，而 2021 年 3 月該基地在微電網建置完成後，已減少對聖地牙哥市近 45% 的電力依賴，至今並降低超過 9,000 萬美金的能源支出。¹²

除了美國本土的基地，配合美軍在印太與歐陸地區軍力部署分配，以及境外屬地或境外州的減碳政策，美國國防部亦刻正強化海外基地之綠能微電網。例如關島已設定 2045 年全島 100%、2030 年全島 50% 使用綠電的目標，而島上自 2015 年即啟動太陽光電場運作，雖有助減輕對化石燃料的依賴，卻也受限於天氣與颱風影響而有電網不穩的問題，裝置容量達 25 千瓩的太陽光電場，其發電量最低也可能跌落至 5 千瓩。¹³ 目前美軍即占島上近兩成的用電量，2024 年前更要容納更多自日本沖繩轉調而來的兵力，因此關島電力局 (Guam Power Authority) 已研擬以電池儲能系統穩定電力頻率及太陽能發電波動，此外關島海軍基地 (Naval Base Guam) 亦將於 2023 年建置配電系統，以改善電網不穩對基地執行核心任務的衝擊。¹⁴ 另一個案例則位於夏威夷檀香山「珍珠港—希卡姆聯合基地」(Joint Base Pearl Harbor-Hickam) 的 West Loch Annex 海軍營區，2019 年已建置裝置容量 20 千瓩的太陽光電場，2024 年起將進一步於面積達 53 公頃的閒置土地上，建置裝置容量達 42 千瓩的太陽光電場及 16.8 萬度 (kWh) 的

¹² 同註 10。

¹³ Tim Allen, "Grid Control Steadies Renewables in Storms," *T&D World*, May 18, 2022, <https://www.tdworld.com/distributed-energy-resources/article/21237893/grid-control-steadies-renewables-in-storms>; Steve Limtiaco, "CCU Approves GPA Plan for Renewable Energy," *Pacific Daily News*, https://www.guampdn.com/money/ccu-approves-gpa-plan-for-renewable-energy/article_0671d6ac-7e4d-11ec-9330-43b7c9093e7b.html.

¹⁴ "Microgrids: the Way forward," *International Microgrid Association*, September 2021, <https://internationalmicrogrids.org/wp-content/uploads/2022/01/2022.01.12-Microgrids-The-Way-Forward.pdf>; Department of Defense, "Fiscal Year (FY) 2023 Budget Estimates: Military Construction, Family Housing, Defense-Wide, Justification Data Submitted to Congress," March 2022, https://comptroller.defense.gov/Portals/45/Documents/defbudget/fy2023/budget_justification/pdfs/07_Military_Construction/Military_Construction_Defense-Wide_Consolidated.pdf.

儲能系統，並將多餘電力售予夏威夷電力公司（Hawaiian Electric）。¹⁵

2. 英國

英國陸軍於 2022 年 5 月發布的《戰場電氣化方針》（Battlefield Electrification Approach）表示 2030 年前將部署微電網，並最大化減少基地對柴油發電機的依賴。¹⁶ 配合英國政府 2050 年淨零碳排政策，英國陸軍於 2021 年則投入 2,000 萬英鎊啟動「普羅米修斯計畫」（Project PROMETHEUS）以增進綠能使用，同年 4 月在英格蘭北部約克郡萊康菲爾（Leconfield）之國防運輸學院（Defence School of Transport）建置英國陸軍首座太陽光電場，總面積達 4 公頃，共有超過 4,000 座太陽能板，尖峰容量達 2.3 千瓩可提供該基地近 1/3 的電力。¹⁷ 作為英國陸軍的綠能先期示範項目，「普羅米修斯計畫」除萊康菲爾營區之外，尚有另外 3 個營區預計於 2022 年前建置完成：包含位於包含英格蘭西南部 South Cerny 的格洛斯特公爵營區（Duke of Gloucester Barracks）以及該營區搭配儲能之熱電池（Thermal Energy Storage）設施、英格蘭東部 Suffolk 的洛克營區（Rock Barracks）、英格蘭南部 Thorney 島上的貝克營區（Baker Barracks），2028 年前並規劃進一步在英國其他營區設置 80 座太陽光電場。¹⁸

¹⁵ Andy Colthorpe, “Ameresco to Build Solar Plant with 168MWh Battery Storage at Pearl Harbor Base,” *Energy Storage News*, June 6, 2022, <https://www.energy-storage.news/ameresco-to-build-solar-plant-with-168mwh-battery-storage-at-pearl-harbor-base/>; Joint Base Pearl Harbor Hickam Solar PV Park – Battery Energy Storage Systems, US.

¹⁶ UK Ministry of Defence (MOD), “British Army Approach to Battlefield Electrification,” May 2022, p. 13, <https://www.army.mod.uk/media/17010/british-army-approach-to-battlefield-electrification.pdf>.

¹⁷ “The Army’s First Solar Farm Will be the Size of 6 Football Pitches,” *The British Army*, April 7, 2021, <https://www.army.mod.uk/news-and-events/news/2021/05/prometheus-work-begins/>; “New Era of Solar Power at Yorkshire Base,” *The British Army*, September 30, 2021, <https://www.army.mod.uk/news-and-events/news/2021/05/prometheus-work-begins/>.

¹⁸ 同註 14；Ministry of Defence and Jeremy Quin MP, “Army’s Solar Farms Support Commitment to Sustainability,” *GOV.UK*, April 7, 2021, <https://www.gov.uk/government/news/armys-solar-farms-support-commitment-to-sustainability>.

3. 日本

2021年4月日本政府更新其國家減碳目標，2030年前溫室氣體排放量須較2013年水準減少46%、2050年前達淨零排放。2021年10月更進一步規定所有中央部會於2030年前必須將溫室氣體排放量較2013年水準減少50%。¹⁹日本防衛省約25萬人，2020年用電量約12.6億度(kWh)，占當年日本中央政府43%總用電量且居所有部會之首。²⁰為展現氣候變遷衝擊下維護國內外社會局勢及減碳決心，防衛省於2020年6月宣布加入「RE100」國際再生能源倡議，以及由日本國內民間自行推動、促進中小企業和中央地方政府等機構減碳之「再生能源100宣言RE Action」，成為繼日本環境省、外務省後，第三個加入該兩項倡議作為「綠電使者」(RE100/RE Action Ambassador)之中央部會，目標為2050年前全國防衛設施用電100%使用綠電，電力來源包含生質能、地熱、太陽光電、水力及風力發電。²¹

¹⁹ 內閣官房地球温暖化対策推進本部，〈政府がその事務及び事業に関し温室効果ガスの排出の削減等のため実行すべき措置について定める計画の実施要領〉，《內閣官房副長官補室(內政)》，2021年10月22日，<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/kaisai/dai48/pdf/mousiawase.pdf>。

²⁰ 防衛省・自衛隊，〈政府全体の電力量のうち防衛省の割合について〉，《環境対策に関する取組》，2022年，https://www.mod.go.jp/j/approach/chouwa/kankyo_taisaku/pdf/r04_chotatsu_wariai.pdf。

²¹ 「RE100」，是由非營利機構「氣候組織」(The Climate Group)及「碳揭露計畫」(CDP)於2014年發起之國際再生能源倡議，旨在促使年度用電量高於100百萬度(GWh)大型跨國企業(不含石化、軍火、武器、博奕、菸草產業)訂定目標，其綠電使用占比至少應於2030年前達60%、2040年前達90%、2050年前達到100%，目前全球已有超過370家大型企業簽署。“Japan’s Ministry of Defence endorses RE100, as more companies commit to 100% renewable power on World Environment Day,” *RE100*, September 13, 2020, <https://www.there100.org/our-work/news/japans-ministry-defence-endorses-re100-more-companies-commit-100-renewable-power>; “About us,” *RE100*, 2022, <https://www.there100.org/about-us/>; “RE100 Joining Criteria,” *RE100*, May 2022, <https://www.there100.org/sites/re100/files/2022-06/RE100%20Joining%20Criteria%20May%202022.pdf>。「再生能源100宣言RE Action」則為日本國內民間團體與智庫，包括綠色採購網路組織(Green Purchasing Network, GPN)、地方政府永續發展理事會日本辦公室(ICLEI Japan)、全球環境策略研究院(Institute for Global Environmental Strategies, IGES)、日本氣候領袖夥伴關係(Japan Climate Leaders Partnership, JCLP)、全國全球暖化預防推廣中心(Japan Network for Climate Change Actions, JNCCA)等於2019年10月成立之倡議，鼓勵年度用電量低於50百萬度(GWh)的中小企業、地方政府、教育及醫療單位訂定2050年前達成100%綠電之目標。〈再エネ100宣言について〉，《再エネ100宣言RE Action》，2019年，<https://saiene.jp/about>；〈アンバサダーからのメッセージ〉，《再エネ100宣言RE Action》，2019年，<https://saiene.jp/ambassador#support>；防衛省・自衛隊，〈令和4年度における再生可能エネルギー電力の調達の促進のための指針について〉，《環境対策に関する取組》，2021年11月16日，https://www.mod.go.jp/j/approach/chouwa/kankyo_taisaku/pdf/r04_chotatsu_shisin.pdf。

2022 年防衛省預計採購 3.2 億度綠電，不僅是整個防衛省預期總電力消耗 12.8 億度的 1/4，亦占日本中央政府總用電量的 11%。²² 2022 年 8 月 29 日更進而公布《防衛省氣候變化戰略》，表示將針對基地及相關基礎建設之制定綠色路徑圖，使用現行可行減碳技術如太陽光電與微電網，2030 年以前達到提供防衛省建物電力一半以上的目標。²³ 自 2020 年以來日本國內自衛隊 964 個單位當中，已有 199 處其電力 100% 來自綠能，而 2022 年將達成使用 100% 綠電的單位有陸上自衛隊的霞浦、伊丹駐地，航空自衛隊的入間、浜松、岐阜、松島基地，以及海上自衛隊的下總、大湊基地，防衛裝備廳的艦艇裝備研究所等處。²⁴

（二）非戰術車輛電動化

1. 美國

非戰術車輛（non-tactical vehicles, NTVs）之電動化目的，除了減碳外，更重要的是降低後勤對化石燃料的過度仰賴，減少運補過程中遭攻擊爆炸傷亡事故，此外其運轉較安靜的特性亦可應用於偵察等作戰行動，²⁵ 為軍事綠能近期推動的重點之一。2021 年 9 月美國陸軍裝備司令部（U.S. Army Materiel Command）發布指令，規定該司令部往後車輛採購與租賃須優先選擇電動車（electric vehicles, EVs），油電混合車次之，只有在特別例外的情形下才能選擇傳統燃油車輛；2022 年 2 月《美國陸軍氣候戰略》更設定目標，2027 年前將以電動車取代所有輕型非戰術車隊，2035

²² 防衛省・自衛隊，〈防衛省氣候變動対処戰略〉，《防衛省氣候變動タスクフォース》，2022 年 8 月 29 日，https://www.mod.go.jp/j/approach/agenda/meeting/kikouhendou/pdf/taishosenryaku_202208.pdf。

²³ 同註 19。

²⁴ 防衛省・自衛隊，〈再生可能エネルギー電気の調達の取組〉，《環境対策に関する取組》，2022 年 7 月 22 日，https://www.mod.go.jp/j/approach/chouwa/kankyo_taisaku/；防衛省・自衛隊，〈令和 4 年度再生可能エネルギー電力の調達を行った施設のうち再生可能エネルギー電力量（kWh）上位 10 施設〉，《環境対策に関する取組》，2022 年 7 月 22 日，https://www.mod.go.jp/j/approach/chouwa/kankyo_taisaku/pdf/r04_chotatsu_shisetsu.pdf。

²⁵ Andrew Eversden, “Army Electric Vehicle Goals ‘Pretty Darn Achievable,’ but Challenges Remain,” *Breaking Defense*, March 2, 2022, <https://breakingdefense.com/2022/03/army-electric-vehicle-goals-pretty-darn-achievable-but-challenges-remain/>.

年以前非戰術車隊須達到全面電動化，中間並以油電混合車作為過渡工具。²⁶

2022年6月美國民主黨籍聯邦參議員華倫（Elizabeth Warren）、廣野慶子（Mazie Hirono）、馬基（Edward Markey）、無黨籍聯邦參議員金恩（Angus King）等人提出《軍用車隊電氣化法案》（S. 4380: Military Vehicle Fleet Electrification Act）。此案屬於2023會計年度《國防授權法案》（National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2023, FY 2023 NDAA）之一環，目的在於要求由美國國防部或總務署（General Services Administration）所租賃及採購之非作戰車隊，包含轎車、貨車、輕型卡車，車輛總計17萬4,000部，其中3/4以上須由電動車或零排放車輛（zero-emission vehicle, ZEVs）取代，同時該法案亦授權美國國防部使用將近600萬美元的金額來強化軍營之電動車充電基礎建設。²⁷

電動車及充電基礎建設的擴增，須搭配軍營的微電網及離網供電設施共同運作，才能最大程度發揮綠能可貢獻的戰備能力。如美國海軍之《2030年氣候行動計畫》列舉美國喬治亞州海軍陸戰隊奧本尼後勤基地（Marine Corps Logistics Base Albany）為美國境內達首座淨零碳排、能源自產高於需求的營區，結合鄰近垃圾掩埋場之生質能、太陽光電和地熱發電，亦採購BEAM Global EV ARC移動式太陽能電動車充電站。²⁸此為2021年1月27日拜登上任發布之「應對美國境內外氣候危機」（Tackling the Climate Crisis at Home and Abroad）行政命令中，要求2035年聯邦政府機構用車全面需電動化的一環，美國海軍陸戰隊共採購21座Beam EV ARC 2020移動式太陽能電動車充電站，部署於美國本土及夏威夷等14個營區，此移動式充電站能克服固定式電動車充電設施需花時間進行挖溝、

²⁶ 同註12。

²⁷ “Senate Bill Would Electrify Nontactical Military Fleet,” *Government Fleet*, June 15, 2022, <https://www.government-fleet.com/10174833/senate-bill-would-electrify-nontactical-military-fleet>; “S. 4380: 117th Congress: Military Vehicle Fleet Electrification Act.,” *GovTrack*, September 27, 2022, <https://www.govtrack.us/congress/bills/117/s4380>.

²⁸ 同註14。

部署配線及併網等限制，也能節省施工費用。²⁹

此外來自民間私部門企業的投入，對於非戰術車輛電動化乃至其他軍事線能應用極為關鍵，可協助實現軍民兩用之效益及帶動相關產業供應鏈發展。例如美國國防部宣布將以電動車及混合動力汽車打造非戰術車隊之後，美國汽車大廠通用公司（General Motors）即表示會投入 350 億美元研發先進車用技術，包含電動車之動力推進系統，公司並規劃於 2035 年前將提供超過 30 種電動車產品選項。³⁰

2. 英國

為配合英國政府 2050 年淨零排放目標，英國國防部 2021 年 3 月發布《氣候變遷與永續戰略方針》（Climate Change and Sustainability Strategic Approach），其中亦納入車隊電動化之規劃，並表示電動車不僅可協助軍隊減碳，亦可減輕噪音及熱氣排放而提升運作之隱蔽性。³¹ 英國陸軍於 2022 年 5 月發布的《戰場電氣化方針》（Battlefield Electrification Approach）則指出，電動車可於併、離網時提供電力生產與儲存，例如與新型武器系統整合、提供其所需電力以增加武器之致命力。³² 由英國國防創新基金（Defence Innovation Initiative）支持之「金牛計畫」（Project TAURUS）一環，英國陸軍於 2020 年起在英格蘭南部安多弗（Andover）的陸軍總司令部設置首座太陽能停車棚，搭配 10 座充電樁可提供 20 輛電動車電力，2021 年 11 月底正式運轉，並預計進一步推展至其他陸軍營區。³³

²⁹ Jennifer Parks, “MCLB Albany among First to Receive Mobile Solar Electric Vehicle Charger,” *Official U.S. Marine Corps Website*, March 15, 2022, <https://www.albany.marines.mil/News/News-Article-Display/Article/2967126/mclb-albany-among-first-to-receive-mobile-solar-electric-vehicle-charger/>.

³⁰ Jon Harper, “U.S. Military Wants Its Vehicles to Go Electric - With Detroit’s Help,” *National Defense*, February 4, 2022, <https://www.nationaldefensemagazine.org/articles/2022/2/4/military-wants-its--vehicles-to-go-electricwith-detroits-help>.

³¹ U.K. Ministry of Defence, “Ministry of Defence Climate Change and Sustainability Strategic Approach,” *GOV. UK*, March 30, 2021, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/973707/20210326_Climate_Change_Sust_Strategy_v1.pdf; U.K. Ministry of Defence, “Defence Outlines Greener Future,” *GOV. UK*, March 30, 2021, <https://www.gov.uk/government/news/defence-outlines-greener-future>.

³² 同註 19。

³³ “Work Begins on the First Solar Carport at Army Headquarters,” *The British Army*, August 3, 2021, <https://www.army.mod.uk/news-and-events/news/2021/08/the-first-solar-carport-at-army-headquarters/>.

3. 日本

2022年8月公布之《防衛省氣候變化戰略》規定，2022年度以後凡是新採購或汰換的非作戰車輛一律須為電動車，其包含純電動車、油電混合動力車（hybrid vehicles）、插電式混合動力車（plug-in hybrid vehicles）、燃料電池電動車（fuel cell vehicles）等，除非在無電動車選項的情況下才能選購傳統燃油車輛，另外防衛省的非作戰公務用車中電動車占比僅7.3%，2030年度以前將提升至100%。³⁴

（三）軍營建物低碳化

1. 美國

美國國防部表示，軍事設施為戰備力要項，而推動設施低碳化可提升基地面對人為或天災威脅的韌性。³⁵美國國防部在500餘處軍事基地上擁有總計超過28萬棟以上的建物，建物能源消耗量占整個部門的三成，整年需花費超過30億美元的經費支出，也因此其已針對建物進行節能措施，2019年及2020年度能源消耗量均有下降的趨勢。³⁶美國國防部並推行「公用事業電表政策」（Utilities Meter Policy），要求所有單位於2024年9月30日前，將智慧電表及水表安裝率由60%提升至85%，以掌握相關能資源消耗資訊，藉此強化軍事設施的韌性及任務保證。³⁷

³⁴ 防衛省・自衛隊，〈防衛省がその事務及び事業に関し温室効果ガスの排出の削減等のため実行すべき措置について定める計画〉，《環境対策に関する取組》，2022年5月27日，https://www.mod.go.jp/j/approach/chouwa/kankyo_taisaku/pdf/gasu.pdf。

³⁵ David Vergun, “Official Details DOD Efforts to Improve Housing, Climate Resilience, Energy Efficiency,” *U.S. Department of Defense*, June 22, 2021, <https://www.defense.gov/News/News-Stories/Article/Article/2666862/official-details-dod-efforts-to-improve-housing-climate-resilience-energy-effic/>.

³⁶ “Department of Defense Annual Energy Management and Resilience Report (AEMRR) Fiscal Year 2020,” *Office of the Assistant Secretary of Defense for Sustainment*, September 2021, <https://www.acq.osd.mil/eie/Downloads/IE/FY%202020%20AEMRR.pdf>.

³⁷ Assistant Secretary of Defense, “Department of Defense Utilities Meter Policy,” *Office of the Assistant Secretary of Defense for Sustainment*, January 14 2021, <https://www.acq.osd.mil/eie/Downloads/IE/DoD%20Utilities%20Meter%20Policy%2014%20Jan%202021.pdf>.

此外，美國國防部亦必須配合美國能源部對聯邦政府建物能源規範的要求，美國能源部最新規範為 2023 年 4 月之後，所有聯邦政府建物須遵照「2021 版國際能源管理規範」（2021 International Energy Conservation Code, IECC）及「2019 版美國冷凍空調工程師協會建築能源效率標準 90.1」（ASHRAE Standard 90.1-2019, Energy Efficiency Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings）。³⁸ 各聯邦政府並可向能源部申請「聯邦政府建物節能設施」補助費（Assisting Federal Facilities with Energy Conservation Technologies, AFFECT），而 2021 年度獲選之 17 個聯邦政府補助案中，即包含美國國防部總部五角大廈的節能改造案。事實上自 2010 年以來，五角大廈因安裝 100 餘智慧電表及分表追蹤電力、天然氣及熱水消耗量，已降低近 11% 的建築能源密度。³⁹

2. 英國

2022 年 6 月英國皇家海軍在英格蘭南部的朴茨茅斯海軍基地（Portsmouth Naval Base）啟用其首座碳中和建築「伊莉莎白女王級航空母艦正向物流中心」（The Queen Elizabeth Carrier Forward Logistics Centre），該中心負責伊麗莎白女王號（HMS Queen Elizabeth）與威爾斯親王號（HMS Prince of Wales）2 艘航空母艦之物流倉儲作業，中心屋頂所安裝 678 太陽光電板，及停車場設置的太陽能電池陣列，可分別生產 250 瓩與 1 千瓩電力，提供中心照明、暖氣、電腦機房及推高機所需電力。⁴⁰

³⁸ “DOE Releases Energy-Saving Rules for Federal Buildings and Proposes New Standards for Consumer Appliances,” *U.S. Department of Energy*, March 30, 2022, <https://www.energy.gov/articles/doe-releases-energy-saving-rules-federal-buildings-and-proposes-new-standards-consumer>.

³⁹ Scott Minos, “Majorly Awesome Military Energy Savers - We Salute You,” *U.S. Department of Energy*, May 20, 2022, <https://www.energy.gov/energysaver/articles/majorly-awesome-military-energy-savers-we-salute-you>.

⁴⁰ UK Ministry of Defence, “Aircraft Carriers to be Supported by New Logistics Facility,” *GOV.UK*, June 21, 2022, <https://www.gov.uk/government/news/aircraft-carriers-to-be-supported-by-new-logistics-facility>; “Royal Navy Aims to Create One of the World’s Greenest Fleets,” *Royal Navy*, July 6, 2022, <https://www.royalnavy.mod.uk/news-and-latest-activity/news/2022/july/06/220706-net-zero-week>.

3. 日本

防衛省已將 LED 照明、「零耗能建築」(Net Zero Energy Building, ZEB) 等節能措施納入政策考量。2022 年 8 月《防衛省氣候變化戰略》規劃現階段新建案要達成或優於「零耗能導向建築」(ZEB Oriented)，亦即占地 1 公頃以上、節能達 30% 至 40% 以上之設施；2030 年度以前，基地設施將全面使用 LED 照明，建物則須為節能達 50% 以上之「準零耗能建築」(ZEB Ready) 或節能比例更優者。⁴¹

二、戰場綠能裝備

1. 美國

降低戰場上軍隊對配電網絡及化石燃料的能源需求，有助於實現戰術自主及提高戰鬥力，戰術車隊與船艦的配置則極大程度決定了持續戰力的強度，也因此，美國國防部除了近期致力將非戰術車隊電動化，也著手提升野戰車隊及海上艦艇之能源效率，並積極開發混合動力及電動化設備。2022 年公布之《美國陸軍氣候戰略》即訂定 2035 年前打造專用混合動力戰術車隊，2050 年以前戰術車隊達全面電動化的目標，具體做法包括在既有戰術平台上安置戰術車輛電動套件 (Tactical Vehicle Electrification Kits, TVEK)，可防止車輛怠速、減輕約 25% 的平均油耗，並在發動機關閉時仍提供車載電力予通訊等輔助設備，從而降低戰術車輛運轉所產生的噪音及廢氣，提高其戰場發揮功效，例如 2022 年 3 月美國陸軍展示聯合輕型戰術車 (Joint Light Tactical Vehicle, JLTV) 所安裝的電動套件，2 分鐘的快充可執行 6 分鐘無須引擎運轉之寧靜作戰行動，往後在戰場上將以 20 分鐘快充來執行 1 小時任務。⁴²

⁴¹ 同註 26。

⁴² Jerome Aliotta, "Anti-idle Technology Reduces Fuel, Extends Silent Watch," *U.S. Army*, March 29, 2022, https://www.army.mil/article/255156/anti_idle_technology_reduces_fuel_extends_silent_watch.

此外，美國陸軍亦預計於 2023 年秋季前完成首輛電動輕型偵察車（Electric Light Reconnaissance Vehicle, eLRV）之測試，做法為開放民間企業公司競標全電動車，2022 年 7 月美國陸軍已向通用汽車購買悍馬全電動車（GMC Hummer EV），另亦與 Canoo 新創企業簽署電動車採購契約，後續軍方將就採購之商業車款進行軍用功能改造與評估。⁴³

美國海軍在《2030 年氣候行動計畫》亦表示將配合美國國防部之跨軍種協調，進行地面戰術車輛之混合動力與電動化，以減少被偵測的機率與維護成本，例如與美國陸軍合作，將可安置於地面戰術混合動力車輛之 6T 鋰離子電池進行標準化作業，其可提供比傳統鉛酸電池更多的電池容量，以太陽能或其他形式充電時亦相對安靜，不僅能提升軍隊戰鬥彈性及生存力，設備標準化也有益於簡化軍用供應鏈物流作業。⁴⁴

美國空軍作戰能源辦公室（Air Force Operational Energy）於 2020 年起與民間公司 Twelve 合作，研發「E-Jet」飛機替代燃料，即自空氣中捕捉二氧化碳，並與綠電電解水所產之氫氣反應製出合成氣（Syngas），目前正評估將此替代燃料生產規模化。⁴⁵ 此外，美國空軍亦於 2020 年委託 Pvilion Solar 公司研發「HEXT」太陽能野戰帳篷，其摺疊後長寬僅 1 公尺，按下按鈕在 3 分鐘內即可自動豎立為長寬各約 6 公尺、高 3.3 公尺的帳篷，由上方太陽電板雨遮提供電力，可協助空軍達成訴求精簡敏捷的「彈性戰鬥部署」（Agile Combat Employment, ACE），擴大部署範圍並降低敵方預測能力。⁴⁶

43 同註 9；“U.S. Army Contracts \$67,500 to Canoo for EV,” *Government Fleet*, July 14, 2022, <https://www.government-fleet.com/10176865/canoo-to-provide-electric-vehicle-to-u-s-army>; Jonathon Ramsey, “U.S. Army Purchases GMC Hummer EV for Light Recon Vehicle Testing,” *Autoblog*, <https://www.autoblog.com/2022/07/20/gmc-hummer-ev-military-testing/>.

44 同註 14。

45 Corrie Poland, “The Air Force Partners with Twelve, Proves It’s Possible to Make Jet Fuel out of Thin Air,” *Air Force Operational Energy*, October 21, 2021, <https://www.af.mil/News/Article-Display/Article/2819999/the-air-force-partners-with-twelve-proves-its-possible-to-make-jet-fuel-out-of/>.

46 Tina Casey, “US Air Force Deploys Solar Power For New Self-Assembling Tent,” *CleanTechnica*, April 11, 2022, <https://cleantechnica.com/2022/04/11/us-air-force-deploys-solar-power-for-new-self-assembling-tent/>; Greg Hadley, “Air Force Releases First Doctrine Note on Agile Combat Employment,” December 14, 2021, <https://www.airforcemag.com/air-force-first-doctrine-note-agile-combat-employment/>.

2. 英國

英國陸軍於 2022 年公布之《戰場電氣化方針》（Battlefield Electrification Approach）指出，目前已投入 1,000 萬英鎊改造德曼（Man SV）運輸卡車、獵狐犬（Foxhound）輕型巡邏裝甲車、豺狼（Jackal）偵察裝甲車為混合動力型，可減少噪音與廢氣排放而隱蔽行蹤，而 1 台德曼運輸卡車則可提供相當於 9 座發電機、超過 500 瓩的電力，可作為野戰醫院或災區救援隊之緊急電力；此外並將同「新型機器人與自動化系統」（Novel Weapons Robotics and Autonomous Systems）之充電技術一併進行量產前置規劃。⁴⁷

英國皇家海軍規劃於 2030 年以前將混合動力應用至軍艦，2021 年開始向企業徵詢技術方案，2022 年 1 月與奇異集團子公司「GE Power Conversion」合作，推出全球首艘「整合式全電力推進」（integrated full electric propulsion, IFEP）之戰艦：「45 型勇敢級驅逐艦」（Type 45 Destroyer - Daring Class），該艦型大於其所取代的 42 型驅逐艦，但燃料卻減少 45%，且其船舶電網以 4.16 千伏（kV）的電壓生成主電源和輸入推進轉換器，高裝置電力則可因應往後在艦上將大幅擴增的雷達及其他導能武器，未來亦容易與外部低碳或零碳電力來源結合，此外其整體傳動系統運轉安靜，有助於提高航行安全與戰鬥能力。⁴⁸

3. 日本

2022 年《防衛省氣候變化戰略》表示，將於 2050 年前引進可配合減碳措施及能改變戰場規則之先進軍事技術，包括電動或混合動力類型之偵察車輛、便攜式太陽能發電和儲能設備，此外亦與美軍合作研發混合動力

⁴⁷ “Army Sparks up ‘Electrifying’ Plan for Future Battlefields,” *The British Army*, May 3, 2022, <https://www.army.mod.uk/news-and-events/news/2022/05/army-sparks-up-electrifying-plan-for-future-battlefields/>.

⁴⁸ “Type 45 Destroyer - Daring Class World’s First Full Electric Propulsion Combatant Ship,” *GE Power Conversion*, January 18, 2022, <https://www.gepowerconversion.com/case-study/type-45-destroyer-daring-class-worlds-first-full-electric-propulsion-combatant-ship>; “Upgrading the Royal Navy’s Type 45 Destroyers,” *Navy Lookout*, April 4, 2022, <https://www.navylookout.com/upgrading-the-royal-navys-type-45-destroyers/>.

之大型戰術車輛，期望在未來戰場上發揮電力供給、安靜偵測的功能。⁴⁹此外，航空自衛隊亦與民間企業合作開發電動牽引車，由基地綠能獲取電力，目前已實施於 T-4 教練機在內等 9 機種之牽引作業。⁵⁰

參、台灣軍事綠能可發展方向

配合台灣 2050 年淨零碳排路徑之政策，並參考國際上的軍事綠能趨勢，我國國防單位可先擬定短期內將非戰術車隊工具汰換為電動或混合動力型態的計畫。由於國內新售電動小客車須於 2030 年、2035 年及 2040 年前分別達到全年新車銷售量之 30%、60% 及 100%，亦將推行電動公務車，並以廣布充電樁、劃設充電格位等方式完備電動車使用環境，因此順勢推行非戰術車隊電動化，將可節省汰換車輛及設置充電站之成本。此外，配合政府將扶植國內電動車產業，補助大客車關鍵零組件研發，亦可媒合國內軍工單位與國內電動車業者，評估將電動或混合動力組件應用於戰術車輛的可行性。

由於分散式電網亦將為我國未來電業發展推動重點，各營區可善用合適地段發展太陽光電，或結合鄰近掩埋場生質能，建造分散式綠能電網及儲能系統，以此提高營區供電自主比例、滿足非戰術電動車輛所需電力，並可支援地方社區緊急用電需求。建議可先以基地或軍種為單位，盤點各單位能耗需求，並調查可安置綠能發電設備之土地或建物等資源，短期內可參考陸軍官校「國防綠能實踐基地」，挑選國內其他基地多點增設先期試驗區，亦可借鏡英國朴茨茅斯海軍基地碳中和建築及後勤物流案例，使綠能應用不單停留在展示層面，而是進入實際作業階段，再視其成效優缺點，規劃中長期的拓展目標。

⁴⁹ 同註 26。

⁵⁰ 航空幕僚監部，〈2022 年度版航空自衛隊の概要〉，《航空自衛隊》，<https://www.mod.go.jp/asdf/special/download/gaiyou/pdf/gaiyou2022.pdf>。

另一方面，建議我國國防單位可與國內業者合作，多樣化開發野戰便攜式個人充電裝置，以及野戰綠能帳篷等輕便裝備，並參考美軍「彈性戰鬥部署」概念，爰請離島前線或偏遠營區部隊於平日演練活動時，先試行相關裝置之穩定性及實用度。此外，待戰術電動車輛或推進設備之雛形款式產出後，可於前線區域試驗其寧靜偵察及相關運作維修作業的效度，所面臨之功能窒礙與挑戰，亦可參照國外案例，進一步開放至商業市場上尋求技術支援及創新方案，以加速實現進程。

肆、小結

綜觀國際趨勢，可發現近期軍事綠能應用發展除了一方面回應減碳潮流，更重要的乃是維繫部隊於極端氣候或是戰爭衝突下的戰備量能，藉由綠能裝置低噪音和廢氣排放的特點，掩蔽行蹤及提升偵察能力、減少戰術工具的燃料需求，降低兵力損耗及傷亡，以達到有效戰鬥資源配置。我國現階段雖尚未有如美國、英國與日本國防單位或軍種所提出之極端氣候應對及軍事綠能應用策略，仍可藉「台灣 2050 淨零排放路徑」之政策走向，順應國內扶助綠能產業之時機，以電動或混合動力逐步汰換非戰術車輛、建置分散型綠能電網，此外亦可積極尋求綠能於戰術車輛及動力推進設備的研發，提升偵察能力及整體兵力的防衛韌性。

基於民主體制信仰，武力使用被視為最後使用的手段（last use of force）。同時，台灣「戰略守勢」的原則並未改變也絕不會發動「第一擊」，因此軍事戰略是「嚇阻」的建軍設計。要達到此目標就必須確保「第二擊」的能力與可信度才能「有效嚇阻」，因此成本較低、具備高存活力的精準彈藥就成為優先選擇。並可善用台灣地緣特性與內線作戰的特性，建立多層的機動防衛火力。

因此，應急戰備的主軸是「精準彈藥先於載台」的思維，可使台灣在有限資源下獲得最大戰力，短時間提升整體防衛能力，真正符合創新不對稱的戰力投資。也就是發揮「以陸制海、以陸制空」的區部海空優，使敵方無法成功登陸台灣。這都有賴於關鍵軍事科技的系統化整合運用。

相對地，法體系的配套也至為重要，首先是安全管理。全球目前焦距在供應鏈安全與科技安全將成為競爭力核心，由於美國為科技龍頭，其主要政策的依據為川普政府在2018年10月5日，美國國防部公布《評估並強化美國國防產業的製造基礎與供應鏈韌性》（Assessing and Strengthening the Manufacturing and Defense Industrial Base and Supply Chain Resiliency of the United States），提出明確警訊，中國對美軍各式裝備所需關鍵零組件、原物料的供應構成巨大且日漸升高的風險，可能影響美軍裝備的關鍵原物料、零組件供應造成的安全威脅與漏洞。其次則為拜登政府則於2021年6月8日公布「建立韌性供應鏈，重振美國製造業，促進全面成長」（Building Resilient Supply Chains, Revitalizing American Manufacturing, and Fostering Broad-Based Growth）的調查報告，在掌握其科技管理的脈絡後，包括敏感科技管理、人才管理，以及參考美國防體系推動的網路成熟度（CMMC）的資安韌性，以強化台灣法體系的整備將有助於確保台灣與民主國家的互信，先進技術的獲得與市場的維持。

同時非常重要的實驗計畫模式的導入，也就是關鍵軍事科技與裝備發展屬風險投資。此二大方向值得在《採購法》、《國防產業發展條例》後續調修法時可考量的修訂方向，以避免政策風險責任阻滯創新。

時至今日，軍事單位先進科技開發的預算仍為有限，加上新興技術開發風險過大，同時技術變遷迅速，這些都需要產業提供奧援方能有效。鑑於這項因素，當前各國在發展與引進新興軍事科技時，通常採用「兩用科技」途徑進行，藉由民間產業龐大資源挹注支援，將既可用於軍事亦可用於民間的「軍民兩用」科技列為重點。過去，國軍在「軍民融合」研發新興技術上未取得實質成果，隨著《國防產業發展條例》立法通過，未來國軍應加強與產業與學界的聯繫合作，共同合作研發新興軍事技術。台灣整體國力遠遜中國，國家整體預算中能夠用於軍事科技研發的金額有限，我們無法在此領域同中國進行競爭。然而，台灣產業，尤其是半導體產業在全球居於領先地位，這個產業是未來軍事競爭的最關鍵技術領域，台灣軍方應善加利用此一有利態勢，將其與相關產業與軍事技術研發進行創意式結合，為台灣的國防建軍提供有力的奧援。

國家圖書館出版品預行編目 (CIP) 資料

國防科技趨勢評估報告 .2022 : 關鍵軍事科技與台灣國防產業之整合 / 蘇紫雲, 翟文中主編 .

-- 初版 -- 臺北市 : 五南圖書出版股份有限公司, 2022.12
面 ; 公分

ISBN 978-626-343-609-1 (平裝)

1.CST: 國防戰略 2.CST: 科學技術

595

111020472

**2022 國防科技趨勢評估報告 ——
關鍵軍事科技與台灣國防產業之整合**

發行人：霍守業

總策劃：林成蔚

主編：蘇紫雲、翟文中

出版者：財團法人國防安全研究院

地址：100 台北市中正區博愛路 172 號

電話：(02) 2331-2360

承印商：五南圖書出版股份有限公司

地址：106 台北市大安區和平東路 2 段 339 號
4 樓

電話：(02) 2705-5066

傳真：(02) 2706-6100

網址：<https://www.wunan.com.tw>

出版日期：2022 年 12 月初版一刷

定價：新臺幣 450 元