

高光譜影像儀發展及影像市場前景

The Development of Hyperspectral Imager and Images Market Forecast

李龍正

Long-Jeng Lee

高光譜影像應用非常廣泛，結合影像及光譜，使得影像訊息富含資訊。目前主流應用在遙測及顯微光譜。遙測主要應用在於資源遙測，如精準農業、礦產林業、生態、及水質管理；高光譜顯微應用主要仍在於生物螢光影像及化學成分影像。本文介紹拍攝高光譜影像之儀器發展情形及影像相關應用，也對目前影像市場前景進行分析。

With rich geometric and spectral information, applications of hyperspectral images have been highly expected; they have been mainly applied to remote sensing and microscopy presently. The major application to remote sensing is focused on the earth resource investigation and environmental monitoring, such as precision agriculture, mineralogy, forest, ecology, and water quality monitoring, while the application to microscopy is on bio-fluorescence study and spectral images of chemical composition. Development of hyperspectral instruments and image application will be introduced, and the future market forecast will be discussed.

一、前言

雖然科技日益昌明，但人們已無法忍受無法掌握某些資訊，如癌症最前期症因和太空資源及環境氣候變化的掌控，這些都跟人們生活息息相關，但我們僅能處於被動式的了解和改善。至於要如何才能揭開這些神秘面紗以掌控先機呢？這應該從細處著手，從源處探索。就檢測儀器而言，高分辨率、高空間解析率的影像技術，已帶來研究及視覺上極大便利，若能從點開始使研究人員了解各種材料特性、成分能譜及結構狀態，將更能確實掌握反應的

起因與結果；若再將空間各點的光譜資訊結合成影像，那就更能了解整體變遷的行為和相互關係，所以光譜影像的發展及相關應用，在近年來就逐漸深入各項領域，為影像學提增豐蘊的知識。

什麼是光譜影像？有人稱之為化學影像，因為那是化學成分影像。每個成分都有其特性光譜，藉由這些特性光譜信號強弱即可定量或定性何種物質。這種影像和一般光學影像有很大的不同，一般光學影像為物理影像，和物理形狀、顏色及偏光有關。不同的物質有相同形狀及顏色，在一般光學影像是分辨不出來的。但這些物質卻有不同光譜譜

線，可以藉由這些譜線來釐清這些成分和其結構情形，所以這種結合光譜學和影像空間解析所產生的影像，稱之為光譜影像⁽¹⁾。

光電遙測技術發展約分為二大主流。一是追求空間上的高解析度，應用於國防及土地變遷、國土規劃等，早期遙測研究均朝此方面進行。另一是追求光譜解析上的需求，以因應在資源遙測及其他相關科學研究，這種高頻譜解析的影像被通稱為高光譜影像 (hyperspectral image)。有別於早期低光譜解析影像 (僅 4-50 譜帶數，光譜解析度 100 nm)，這類影像譜帶數可達 100-250，光譜解析度達 3 nm，由於光譜解析度較高，利於各類物種判識。這類影像資料頗為龐大，一個影像檔高達 1 GB，且由於進光量較多光譜影像小，空間解析度須降低，所以於遙測應用發展，影像解析度要求不高，光譜解析度要求一般為 5 nm。

在顯微影像應用上，因其量測空間小，所以有時須同時強調高空間解析及高光譜解析，例如生物螢光影像之光譜解析度要求 10-50 nm，譜帶數較少，而拉曼光譜影像之光譜解析度要求 0.5 nm，譜帶數已超過 500。特別是顯微光譜影像已朝向 3D 立體結構發展，其未來發展及對科學研究貢獻，將有革命性的進展。

本文首先介紹高光譜影像儀目前發展，再討論高光譜影像目前可能的市場應用，說明遙測方面高光譜影像發展近況，及各項資源觀測應用。此外也介紹其在顯微影像的熱門應用，以其未來儀器發展趨勢。

二、高光譜影像儀發展情況

高光譜影像儀主要設計概念是掃取的影像每一點都有其光譜，供使用者分析。如圖 1 所示，左方影像最上方為某一光譜之二維幾何影像，在下一層為同一地區另一光譜之幾何影像，因此幾何影像每個點皆有相同光譜範圍之光譜資料，可供使用者就所得光譜加以分析及分類。圖 2 說明高光譜影像儀光學設計概念，光學鏡頭將所得影像成像於狹縫上，由狹縫所得影像如同掃取空間的一直線，再將這一直線上的各點經分光元件 (光柵、稜鏡…) 分光，而後光譜成像記錄於 CCD 感測器上。在飛行過程中某一瞬間可得每條線的光譜影像，經由飛行運動提供二維幾何掃描資訊。所得影像將各個光譜帶結合即可得該光譜波段影像，再將每一個波段的光譜影像結合就是高光譜影像。

高光譜影像儀器發展於 1980 年代，那時奈米

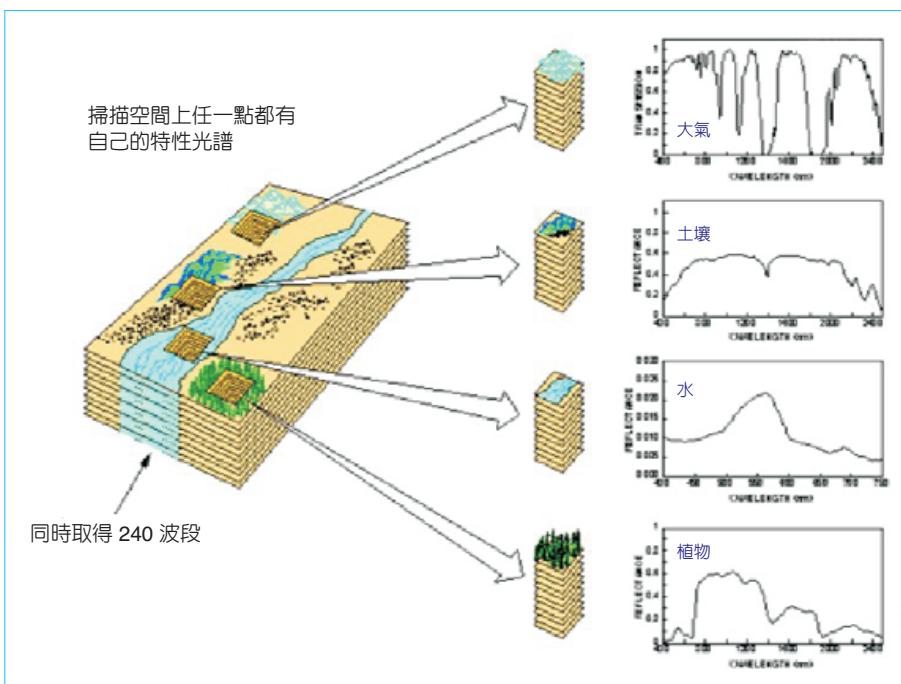


圖 1. 高光譜影像概念。

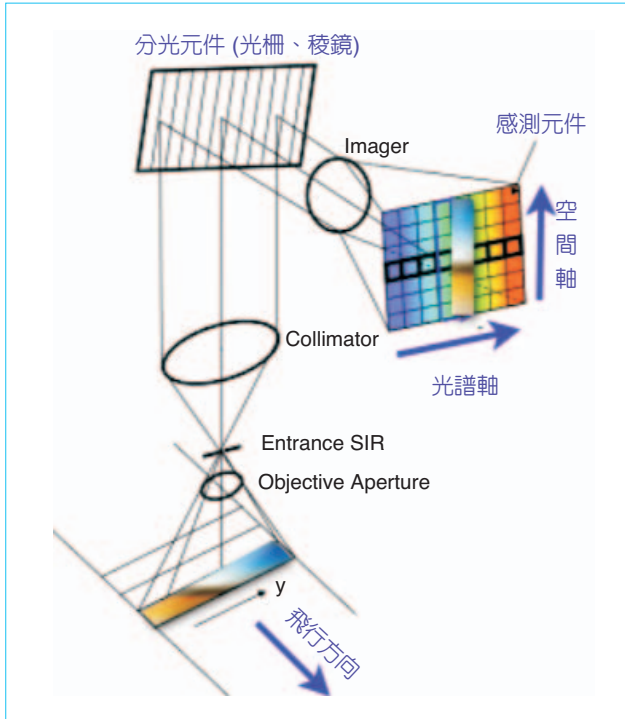


圖 2. 高光譜影像儀光學設計概念。

探測儀器也開始萌芽，而在 1985 年後高光譜影像概念漸入一般光學顯微鏡，不過就系統而言，太空科技儀器發展總是比較成熟。第一個機載高光譜感測器是由美國太空總署 (NASA) 的噴射推進實驗室 (JPL) 於 1982 年首次航測，第一個推掃式 (pushbroom) 機載成像光譜儀為加拿大 Moniteq 的 FLI (Fluorescence Line Imager, 1984 年)，而星載成像光譜儀是德國 DLR 的 MOS-IRS (Multispectral Optoelectronic Scanner, 1996 年)，那是屬於多光譜影像儀，但第一台星載高光譜為美國 TRW 所推出 HIS (Hyperspectral Spaceborne Imager, 1997 年)，後續發展為 NASA 衛星 EO-1 的 Hyperion 酬載，Hyperion 是首顆發射且取像成功高光譜影像儀酬載 (2000 年 11 月)。第一個商業型星載高光譜影像儀計畫於 2001 年推出 OrbView/WF-1 及 NEMA 兩個衛星計畫，然 OrbView/WF-1 於 2001 年 9 月發射失敗。所幸於 2002 年歐盟 ESA 之 Envisat-1 衛星 (搭載 MERIS) 及日本 NASDA 之 ADEOS-2 衛星 (搭載 GLI) 皆發射成功。未來尚有衛星 NEMO (Naval Earth Map Observer)，民間企業聯盟 (Auspac, ACRES, Earth Resource Mapping Pty 及

CSIRO) 的 ARIES-1，及歐盟的 PRISM 和 PROBA 等高光譜衛星將相繼推出。

一些前期高光譜影像關鍵技術起源大都來自 NASA 的 JPL，如圖 3，由其中可以瞭解高光譜影像儀從機載開發到預備星載升空，其中遭逢 SISEX (1997) 發射失敗及經費來源短缺，整個計畫 (HIRIS) 取消，併入 EO-1 衛星。然從其發展過程，已提供衛星發展規格指標。國際機載高光譜遙測影像儀發展方面，於可見光及近紅外光區 (450–900 nm) 已開發成熟，並有規格產品出售，然因其價格不菲及受高科技管制，因此未能在國內研究普及化。而在短波紅外光區 (900–2500 nm)、中紅外光區 (2–5 μm) 及遠紅外光 (7–15 μm) 的高光譜影像研究仍屬個案大型計畫，早期都使用鏡片掃描 (揮掃式) 於單一線型感測器而組合成像，最近這光譜區域面型感測器已經推出太空規格，也應用於衛星。表 1 及表 2 分別為機載和星載高光譜影像儀規格比較。

分光元件方面，衛星酬載採取反射式光柵或楔角濾光鏡 (wedge filter)，機載儀器也多沿用此種設計方式。而芬蘭 AISA 採用 PGP (prism-grating-prism) 組合，其優點是光譜成像將微笑曲線降低，光軸在直線軸上，再者使用穿透式光柵，光偏極化干擾減少很多。AISA 目前推出多款機載高光譜影像儀。

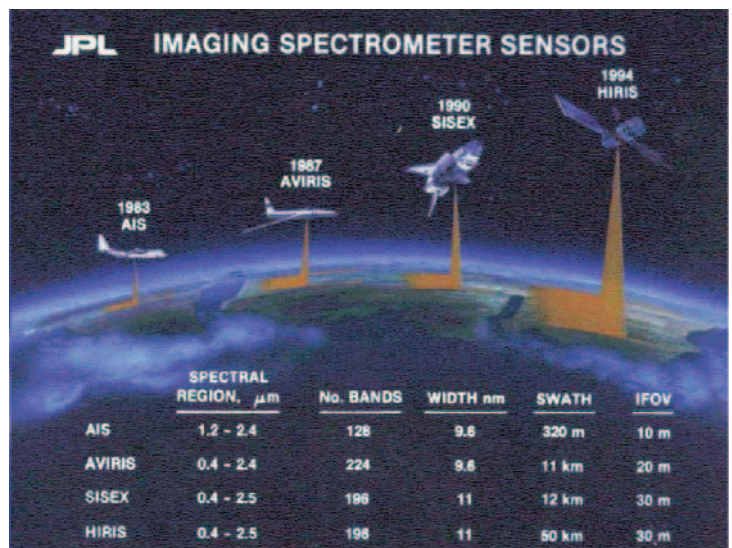


圖 3. 美國太空總署推進實驗室高光譜影像儀發展歷程。

表 1. 機載高光譜發展近況。

機載	公司	光譜範圍及解析度	視場 (mrad)	視角 FOV (度)	分光方式	工作期間
AIS	JPL 美國	128 bands 800–1600 nm @ 10 nm 1200–2400 @ 10 nm	2.05	7.3	Grating	1986–1987
AISA	SPECIM, Ltd.	286 bands 450–900 nm @ 2.4 nm	1	21	PGP	1993
Dais 7915	GER Corp.	79 bands 400–12000 nm	3.3–5	64–78		1993
AMSS	澳洲	82 bands 490–1090 nm @ 2.5 nm	2.1 × 3.1	92		1985
AVIRIS	JPL 美國	224 bands 400–2500 nm @ 10–12 nm	1	30		1987
CASI	加拿大	288 bands 430–870 nm @ 1.8 nm	0.3–2.4	35		1990
HYDICE	NRL	210 bands 400–2500 nm @ 7.6–14.9 nm	0.5	8.94		
HyMap	Integrated Spec- tronics	200 bands 400–2500 nm @ 10–20 nm 8–12 m @ 200 nm	1–3	60–70		
FLI	加拿大	288 bands 430–805 nm @ 2.5 nm	0.66	70		1990–1991
PHI	中國	244 bands 400–850 nm @ 7.6–14.9 nm	< 5	1.1		1997
TRWTSB	TRW 美國	90 bands 450–880 nm @ 4.8 nm	0.4–2	5–25		1991
HSI	PIDC 台灣	240 bands 450–850 nm @ 3 nm	0.3	20–40	PG	2004

表 2. 星載高光譜發展近況。

衛星／酬載	經費來源	光譜範圍及解析度	掃描範圍	分光方式	發射日期
EO-1 Hyperion	NASA 美國	220 bands 400–2500 nm @ 10 nm	7.5 km × 100 km	Grating	Nov. 21st, 2000
EO-1 LEISA AC	NASA 美國	309 bands 850–1600 nm @ 2.4 nm	7.5 km × 100 km	Wedge filter	Nov. 21st, 2000
Envisat-1 MERIS	ESA 歐盟	15 bands (tunable) 390–1040 nm @ 2.5 nm	1150 km × 17500 km		Mar. 5th, 2002
ADEOS-2 GLI	NASDA 日本	19 bands 375–865 nm @ 8–20 nm 6 bands 1050–2210 nm @ 20–220 nm 7 bands 3715–12000 nm @ 330–1000 nm			Dec. 14th, 2002
NEMO	U.S. Navy	400–2500 nm			
PROBA CHRIS	歐盟	62 bands 400–1050 nm @ 1.25–11 nm	18.6 km × 18.6 km	Grating	Oct. 22nd, 2001

近來近紅外光區 (1–2.5 μm) 的資源遙測需求頗為殷切，因這個波段對水氣含量、林地植被種類及土地礦石等分辨能力優於可見光區。最近這個波段的面型偵測器相繼推出，這種面型偵測器及其週邊溫控技術要求非常嚴格，否則影像品質很差且不穩定。這些技術和元件取得非常不容易，然現在已有很多遙測公司投入，積極發展近紅外波段推掃式高光譜影像儀。

國科會精密儀器發展中心也於 2003 年推出掃描式高光譜影像儀工程體 (成品如圖 4)，供地面研

究取像，並於 2004 年進行機載測試，所用波段為 450–850 nm，具有 240 波段，解析度 3 nm，感測器使用 CCD，其成像掃描方式為推掃式。

三、高光譜影像市場應用

高光譜影像一直是官方資源政策管理依據之一。高光譜衛星目前並未有商用型，太空市場人士期望 Orbview-4/Warfighter-1 發射成功為高光譜影像市場加分，然事與願違，於 2001 年發射失敗。

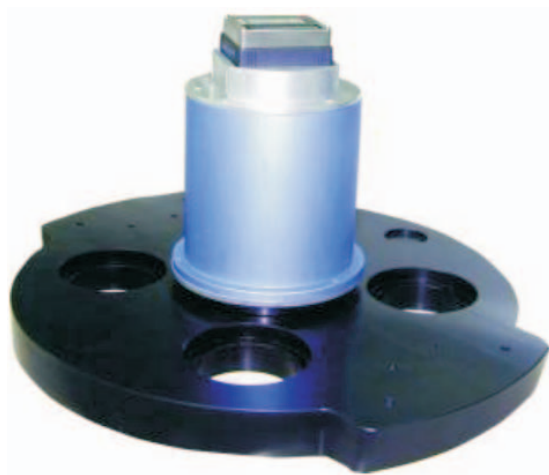


圖 4. 國人自製高光譜掃描儀(左)，機載高光譜影像儀工程體(右)。

目前市場仍以機載為主導，高光譜衛星僅有美國 NASA 之 EO-1 衛星的 Hyperion、歐盟 ESA 之 Envisat-1 衛星的 MERIS 與 PROBA 衛星的 CHRIS 及日本 NASDA 之 ADEOS-2 衛星的 GLI，須透過官方管道才能取得影像。於此僅就高光譜影像的市場應用分析如下。

1. 礦產

地質的光譜呈現蘊藏礦產成分，從地表土壤土質的光譜可推知礦產的分布。礦產種類如礦石及金屬礦，這些土質礦產的光譜大都發生於 2–2.5 μm ，金屬礦產的光譜也見於 1–2.5 μm 。MINEO (Monitoring and assessing the environmental impact of mining in Europe using advanced Earth Observation Techniques) 計畫是以法國為首，配合星載 (EO-1) 及機載高光譜影像儀 (HyMap) 調查歐洲礦產分布及歐洲受金屬污染區域^(2,3)。加拿大是世界最大礦產國之一，其國內有超過 60 多種礦產，於 1998 年輸出礦產達 45.2 百萬美元，所以加拿大太空中心計畫即將推出星載高光譜影像儀，以供其國內和世界各區域使用。其影像應用分類如圖 5⁽⁴⁾，其中含有高嶺石 (kaolinite)、蒙脫石 (montmorillonite) 與明礬石 (alunite) 分布及其特性光譜。

2. 原油及天然氣

目前原油探測技術主要為地質檢測技術，大都

採用人為實地勘察，所以政府、業者及科學家無不企望從遙測影像來輔助尋找原油來源，以廣泛了解原油分布位置，從而進行政策制定，以達有效資源管理。由於石油屬碳氫化合物，且深藏於地下，無

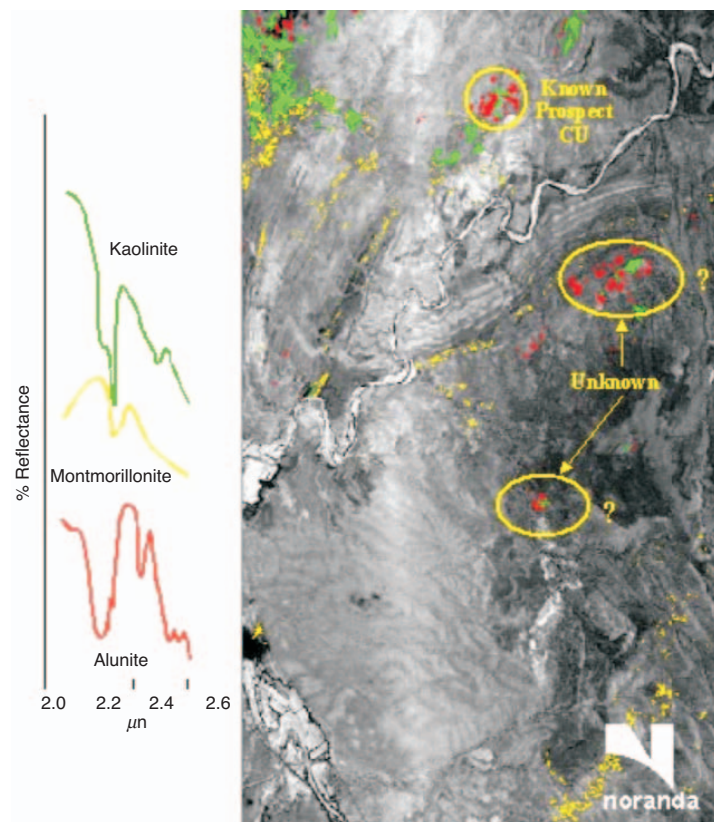


圖 5. 高光譜影像在礦產上的應用。

法於地表觀看，然而這些碳氫化合物會影響土質，觀看土質的光譜就可以推測該地區地下是否有油田。其光譜圖如圖 6，判斷依據為石油光譜指數 R ， R 越大表示可能性越高。這種檢測方式無法很精確，須配合現場地質量測。但這種高光譜輔助性的探測，可以除卻很多漫無目標的檢驗⁽⁵⁾，所以石油業者願意投資高光譜影像分析公司，進行油田的探查。目前石油公司 ChevronTexaco 已投資相當多經費於高光譜影像探索油田，也有不錯的結果⁽⁶⁾。

3. 高經濟林業及原生種植群管理

一些高經濟林木如紅檜及紅豆杉，近來在政府有效林業管理下，培植育林成效顯著。台灣紅豆杉早期未被林木業者所青睞，然近來抗癌藥物紫杉醇被發現，台灣紅豆杉也隨之禁伐，令相關業者為之扼腕，故高經濟林木培育管理非常重要。然一些原生林區受文化保育令保護，如台灣原生種山毛櫸(台灣水青岡)植物皆在未開發地帶，就其生長情況有必要一併管理。高光譜在林業植被的分類分布及健康發育週期應用，國內已有研究人員進行⁽⁵⁾。

4. 精準農業

農作物產量和植物含氮量有很大的關係，而土壤土質、酸鹼質及土壤養分也會影響農作物成長過程，造成產量變少或成長緩慢，受重金屬污染的土壤亦會影響其成長期。一般遙測影像觀看植被成長，最常用的方法就是植被指數 (normalized difference vegetation index, NDVI)。由 NDVI 變化觀察植被成長及植被分類，這在多光譜遙測研究已有多人在研究，然而追求精緻及嚴密觀察，高光譜影像則可提供高光譜解析的影像。可選取較適當的近紅外光譜帶及紅光譜帶，另外在 700–800 nm 區域，植被從紅光區 (650 nm) 到近紅外光區 (800 nm) 的反射率遽升，中間點被稱紅色邊緣 (red edge)，這個紅色邊緣會隨著生長期而改變，從這個生長期變化可預期農獲量，這是以往多光譜無法提供的訊息。當然從植被含氮量也可以推估農獲量，從紅色邊緣及 NDVI 亦可推估植物病害現況及警戒。

Hydrocarbon Detection

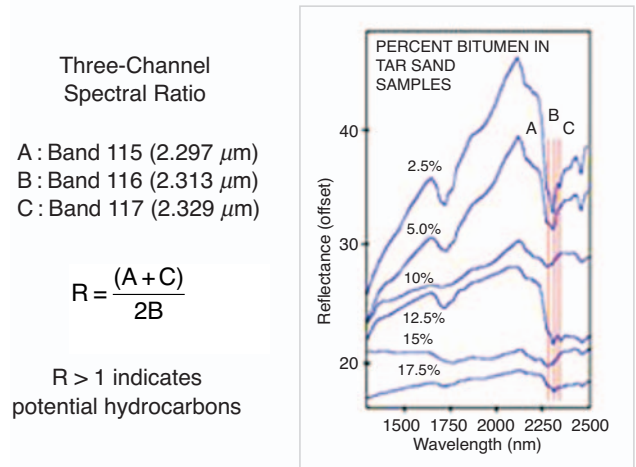


圖 6. 石油探測光譜圖。

5. 水資源管理

隨著文明的腳步，工廠及民用廢水隨意排放，一些離子 (氮磷) 肥料使藻類大量增生，以至於覆蓋水面，造成魚類和水中植物無法生存，而屍體腐爛分解會消耗水中的氧氣，形成水中缺氧狀態，造成嚴重優養循環。遙測儀器可以量測水質、水溫，但不能觀看水中一切，但從水面藻類分布，可以推測優養現象。利用衛星遙測儀器觀看湖泊河域優養現象，從藻類葉綠素光譜做為分析依據，瞭解水域優養狀態，從影像觀看優養分布，可知河域污染源頭，以做為政策施行依據。這種藉由水中藻類光譜影像以達水質監測，也適用魚塢養殖。目前高光譜應用於水庫及其河域在國外已有很多論文報導⁽⁵⁾。

6. 生態保育

濕地是所有生命的起源，濕地保育可確保生態完整。海邊濕地保育，可避免地層下陷，增生國土面積；高山濕地保育，可使山中保持一定濕度，可聚結雲氣，保持一定水源供給。濕地內含各種水生植物及各種微生物，可用於污染防治工程。濕地的光譜大都含有植被光譜，例如葉綠素 AB (吸收藍光 470 nm 及紅光 650 nm，並於 800 nm 處高反射)、葉黃素及胡蘿蔔素 (吸收藍綠光 500 nm)，植被含水量是檢查濕地最重要指標，950 nm、1350

nm 及 1950 nm 等區域光譜是檢查重點波段。以前國人為了發展經濟，引進一些所謂經濟農作物或林木，銀合歡是外來植物，其含羞草素酸化土壤，造成其他植物無法生存，其所產生的木蝨嚴重影響其他林木的生存，也因此在台灣恆春半島有半數以上皆為銀合歡覆蓋，原有生態瀕臨破壞，希望藉由高光譜影像了解銀合歡分布，提供其生態變化，再尋求政策解決。

7. 環保助手

前面曾探討利用高光譜影像來搜尋原油碳氫化合物及水域優養現象，同樣也可利用這種檢驗方法探討原油及河域污染問題，從河域優養現象，瞭解污染源頭及區域，以做為防污重點區域。

8. 基礎科學研究

螢光影像是生物技術最根本檢測儀器，但是材料成分檢定大都採用紅外線光譜或電子能譜。電子能譜都採用電子束或中子束掃描而得能譜影像。最近紅外線光譜技術結合顯微鏡技術，再依掃描平台而組成紅外線光譜影像。一些生物體含水量高，不適用於紅外線及電子能譜，可使用拉曼光譜檢驗。最近拉曼光譜結合顯微鏡，而產生顯微拉曼光譜影像，也成功應用於材料及臨床醫學檢定。這類光譜帶數，有些已超過 500 個，故又可歸類於超光譜影像 (ultraspectral images)。目前這類儀器大都已商品化，成為這類檢測儀器新的規格與趨勢。

四、高光譜影像儀市場經濟指數

根據太空科技公司 (Aerospace Corporation) 的經濟市場分析中心 EMAC (Economic and Market Analysis Center) 所提供的分析資料⁽⁷⁾，星載和機載高光譜影像儀的市場前景如圖 7，可見機載高光譜影像市場需求逐漸飽合，在 EO-1 衛星發射成功後 (2000 年 11 月)，於 2001 年後使用者會增加，其需求將遠超過機載需求。而 2002 年日本 NASDA 及歐盟 ESA 的高光譜衛星發射成功，加上未來 NASA 將發射 NEMA 高光譜衛星，並提供商業機能於民間，相信未來高光譜市場會比預期更燦麗。

五、未來高光譜影像儀可能發展

微機電系統技術逐漸成熟，高光譜影像儀也開始微型化研究，這是目前高光譜遙測另一熱門尖端指標。將微型高光譜影像系統植入小型遙控飛機，再由遙控飛機適時擷取所需波段光譜影像，藉由無線電傳回影像，這是目前美國國防部反制恐怖活動構想計畫之一，其成像光譜儀須用波長可調式干涉濾光鏡片。目前這類干涉式濾光鏡片微型化發展已非常成熟，相信很快會推出，這些技術在高光譜影像多元化應用將有革命性發展。

成像光譜影像儀普遍應用於顯微鏡⁽¹⁾，主要係觀測待測樣品的光譜影像，由不同光譜影像，可以觀測待測物內各種成分的空間分布，藉以瞭解檢測成份成長或反應後的分布。在生醫應用如拉曼光譜影像在癌細胞切除也有實際臨床研究。

在國際遙測應用領域中，高光譜影像遙測在資源及環保應用逐漸受重視，然國內的發展仍處於萌芽階段。國科會精密儀器發展中心已完成高光譜影像儀工程體研製及機載測試，目前正進行高光譜飛行體研製，除了可協助國內遙測學者於上述高光譜領域的研究，未來也將結合顯微鏡供生醫及化學檢定應用。近來生物技術及奈米技術對於產業經濟產生很大衝擊，特別如 DNA 定序及檢定等皆仰賴螢光檢定技術，早期以掃描平台單點逐一掃描非常耗時，未來高光譜影像儀走向模組化後，可植入顯微鏡系統，以單軸掃描，除了加速掃描速度外，在波長選取上也將較傳統濾光鏡更具彈性。

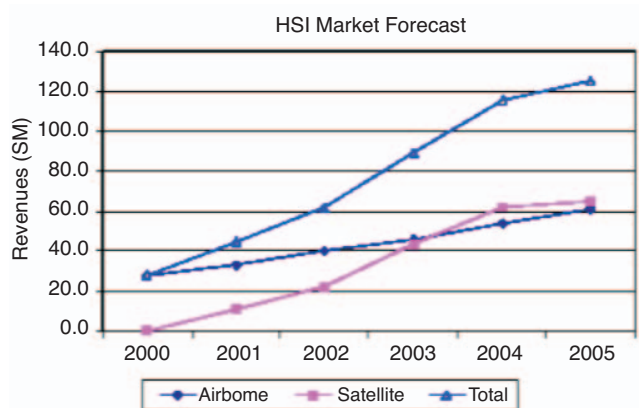


圖 7. 高光譜影像市場前景。

六、結論

高光譜影像在國際遙測領域扮演了重要角色，然於國內發展仍處於萌芽階段，原因在於高光譜影像難以取得，國科會精密儀器發展中心所發展高光譜影像儀系統，可協助國內遙測學者於高光譜領域的研究，如海藻及森林農作物、生態環境及環境污染等。近來在國外已有多篇論文討論高光譜影像於上述領域的研究，很明顯各項預期分析很能符合現況需求。

高光譜影像在自然基礎科學研究應用早已行之有年，而其光譜影像的需求，因其影像資料量未若遙測影像大，所以發展方向也朝高光譜解析及高空間解析進行。就產業經濟而言，未來高光譜影像儀走向模組化後，可植入顯微鏡系統，取得各空間(3D)完整光譜資料，這對物種在反應前後的空間分布分析有很大的幫助。

參考文獻

1. 李龍正, 精儀中心簡訊, 25, 15 (1998).
 2. S. Chevrel, V. Kuosmannen, R. Belocky, S. Marsh, T. Tukiainen, H. Mollat, L. Quantal, P. Vosen, V. Schumacher, E. Kuronen, and P. Aastrup, Fifth International Airborne Remote Sensing Conference, San Francisco, California, 17-20 Sep. (2001).
 3. S. H. Marsh, C. Cotton, G. Ager, and D. G. Tragheim, Fourteenth International Conference on Applied Geologic Remote Sensing, Las Vegas, Nevada, 6-8 Nov. (2000).
 4. B. Rivard, V. Singhroy, Ed Cloutis, and G. Borstad, "User Requirements Report for Mineral Exploration", Canadian Hyperspectral Users and Science Team, Canadian Space Agency (2002).
 5. <http://www.hymap.com/HyMapPapers.htm>
 6. <http://www.dfg.ca.gov/ospr/misc/etworkshop/powerpoint/PSamuels.pdf>
 7. N. Y. Lao and F. C. Wong, Aerospace Report No. TOR-2001 (8511)-1 (2001)
-
- 李龍正先生為國立清華大學化學博士，現任國家科學委員會精密儀器發展中心副研究員。
 - Long-Jeng Lee received his Ph.D. in chemistry from National Tsing Hua University. He is currently an associated researcher at Precision Instrument Development Center, Nation Science Council.