



# 視訊式地球資源衛星之發展與影像去模糊化分析

張智安<sup>1,\*</sup> 陳品涵<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 國立陽明交通大學土木工程學系教授

<sup>2</sup> 國立陽明交通大學土木工程學系碩士生

## 摘要

本研究聚焦於視訊式遙測衛星的發展與其影像去模糊化之分析。視訊式衛星透過高時間解析度的連續動態影像，能有效彌補傳統靜態衛星影像在時間連續觀測上的不足，並在智慧監控、災害應變及城市規劃等領域具有顯著潛力。然而，影像解析度低、衛星運動造成的模糊，以及劇烈照明變化所引起的影像失真，嚴重限制其進一步應用。本研究針對此問題，利用兩階段金字塔式影像去模糊技術，透過模糊核估計與反卷積重建方法，提升視訊衛星影像品質。實驗使用 SkySat 視訊影像進行測試，結果顯示使用單一模糊核重建的影像，其峰值訊噪比與結構相似性顯著提升，證明該技術能有效改善影像的細節呈現與整體視覺品質，推動視訊衛星影像在動態目標監測及細節分析的實務應用。

**關鍵詞：**SkySat、小型衛星、地球資源衛星、視訊式、影像去模糊化

---

\* 通訊作者：張智安

電子郵件：tateo@nycu.edu.tw

（收件日期：2025 年 6 月 13 日；修正日期：2025 年 7 月 11 日；接受日期：2025 年 7 月 14 日）



# Development and Image Deblurring Analysis of Video-Based Earth Resources Satellites

Tee-Ann Teo<sup>1,\*</sup>, Pin-Han Chen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Professor, Department of Civil Engineering, National Yang Ming Chiao Tung University

<sup>2</sup>Master Student, Department of Civil Engineering, National Yang Ming Chiao Tung University

## Abstract

This study focuses on the development of video-based remote sensing satellites and the application of image deblurring techniques. Video-based satellites, capable of capturing continuous dynamic image sequences with high temporal resolution, effectively address the limitations of traditional static remote sensing imagery in continuous temporal observation. These capabilities offer significant potential in fields such as intelligent monitoring, disaster response, and urban planning. However, further applications are restricted by challenges like low spatial resolution, motion-induced blur caused by satellite movement, and distortion from rapid illumination changes. To overcome these issues, this research employs a two-stage pyramid-based deblurring approach, using kernel estimation and deconvolution reconstruction methods to enhance satellite video imagery quality. The experimental evaluation conducted with SkySat satellite imagery demonstrates that images reconstructed using a single average blur kernel significantly improved peak signal-to-noise ratio and structural similarity index, indicating effective recovery of fine details and overall visual clarity. These improvements support advanced image analysis tasks, including dynamic object monitoring and detailed feature analysis, thus significantly enhancing the practical applications of satellite video imagery.

**Keywords:** SkySat, small satellite, Earth resources satellite, video-based, image deblurring

---

\* Corresponding Author: Tee-Ann Teo  
E-mail: tateo@nycu.edu.tw

# 壹、前言

## 一、小型衛星 (Small Satellite) 的發展及應用

小型衛星為衛星任務的重要發展方向，其特色是以較低的成本發展微小衛星，因成本較低，故有機會形成多顆衛星組成的星系 (Satellite Constellation)，聯合許多微衛星協同資料獲取任務，可應用於地球資源觀察或衛星通訊等，例如 Planet Lab 商用衛星公司部署超過 100 顆 Dove 衛星星群，能提供較以往更高時間密度的影像，提升時序衛星影像取得的便利性，也促進了更多元化的應用。國際間有許多微衛星相關的重要任務或計畫，例如美國太空總署 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) Small Satellite Missions 測試微衛星之效益、澳洲政府 SmartSat 計畫分析微衛星智慧化之應用、日本 AxelSpace 公司的 AxelGlobe 計畫發射 50 顆 2.5 公尺空間解析度 GRUS 微衛星、英國 Surrey 公司客制化微衛星服務、SpaceX 的 Starlink 計畫已發射 1,500 個低軌道微衛星等。低成本小衛星為實現衛星物聯網 (Internet of Things, IoT) 發展的關鍵載具，也是未來衛星產業、衛星科學任務及民生用途的關鍵發展 (NewSpace Lab 商業太空實驗室, 2021)。

小型衛星依照其重量可以簡單區分為奈米衛星 (Nano-Satellites, 1 ~ 10 kg)、微衛星 (Micro-Satellites, 10~ 100 kg) 及迷你衛星 (Mini-Satellites, 100 ~ 500 kg) (Liang and Wang, 2019)，本計畫依 Union of Concerned Scientists (UCS) Satellite Database (僅更新至 2023 年 5 月 1 日) 的地球資源衛星 (Earth Observation Satellite) 進行數量統計，2013 ~ 2022 年之間發射的地球資源衛星中，小型衛星 (210 + 169 + 97 = 476 顆) 的數量已超過大衛星 (36 + 123 = 159 顆) 的數量 (表 1)，例如 Planet Labs 2017 ~ 2022 年已發射 174 顆 Dove 奈米衛星及 21 顆 SkySat 迷你衛星進行光學影像任務，而芬蘭 ICEYE 公司也已發射 20 顆 ICEYE 微衛星進行雷達影像任務 (UCS, 2023)。由於小型衛星相較於大型衛星有較低的成本，因此在現今地球資源衛星的發展中，小型衛星成為地球資源衛星任務的重要發展方向。

表 1 2013 ~ 2022 年地球資源衛星依重量分類統計表

Year	Nano-Satellites (1 ~ 10 kg)	Micro-Satellites (10 ~ 100 kg)	Mini-Satellites (100 ~ 500 kg)	Medium Satellites (500 ~ 1,000 kg)	Large Satellites (> 1,000 kg)
2013	0	0	8	0	10
2014	0	5	5	2	12
2015	1	5	5	1	12
2016	3	12	9	6	11
2017	34	10	10	4	11
2018	21	17	8	10	17
2019	16	20	7	3	13
2020	33	28	9	1	8
2021	57	22	12	2	14
2022	45	50	24	7	15
Sum	210	169	97	36	123

資料來源：本研究整理自 UCS (2023)。

## 二、視訊式遙測衛星之資料特性

視訊式遙測衛星指能夠擷取連續動態影像序列之衛星系統，其成像特性有別於傳統靜態遙測影像，具備每秒多張影像之時間解析度，得以觀測地表目標在時間軸上的動態變化。此類衛星可針對特定區域進行連續觀測，進而擷取物體之移動軌跡、速度與方向等動態資訊，對於動態目標之辨識與行為分析具有應用潛力。單一高解析度衛星在單星模式下之重訪週期通常需時2~5日，限制其在連續監測任務中的適用性。雖然由多顆輕小型衛星所構成之星系可有效縮短重訪時間，部分彌補傳統光學遙測系統在時間覆蓋上的不足，但在實際應用中，對特定地表目標進行高頻率之觀測需求仍難以完全滿足。因此，視訊式遙測技術之出現，補足既有衛星遙測在時間連續性上的限制，並拓展地表動態觀測之應用研究。視訊式遙測衛星為相幅式成像，透過二維矩陣感測器拍攝連續相幅式影像，形成高重疊相幅式影像，屬於同軌連續成像，所擷取之每一幀影像皆具有明確的時間關聯性、空間對應性與內容相似性，其優點是高重疊，可獲取地表局部小區域的動態變化。相較於傳統靜態遙測影像，視訊式遙測衛星資料透過持續拍攝，形成一連串具時序關聯的影像序列，使得地面目標在時間軸上的變化趨勢得以被完整觀測與分析。由於具有高度的時間連續性與相幅間的重疊性，因此可利用相鄰相幅之特徵資訊來補足單一影像的判別不足。

## 三、研究目的

視訊式遙測衛星能夠提供地表區域的連續動態觀測資訊，相較於傳統靜態影像，其時間解析度大幅提升，使地面物體的移動趨勢與變化可被準確捕捉，應用於智慧監控、都市規劃、災害應變等場景皆具高度潛力。然而，視訊式遙測衛星在發展應用上仍面臨許多限制，其中最關鍵的便是影像解析度與資料品質問題 (Yang et al., 2016)。本研究有兩個目標：(一) 探討現行視訊式遙測衛星之發展；(二) 針對視訊式衛星資料進行影像去模糊化 (Deblurring) 及品質分析。

首先，目前多數衛星視訊式遙測衛星的空間解析度為公尺等級，遠低於一般航拍與地面攝影的解析度。這使得影像中物體尺寸普遍偏小，例如車輛、船舶與飛機僅占數個至數十個像素，導致外觀細節、紋理特徵與邊界模糊不清，限制了後續如物體偵測、追蹤與分割等高階任務的準確性。此外，在衛星運行過程中，平臺本身的不穩定運動將導致全域背景移動，進一步降低影像清晰度與特徵一致性。再者，由於成像視角高、拍攝距離遠，衛星視訊容易出現「運動模糊」(Motion Blur)，照明條件的劇烈變化也會造成影像遮蔽與失真，進一步惡化目標辨識條件。這些因素導致衛星視訊資料呈現目標特徵不明顯、背景干擾高、解析度降低、邊界模糊等問題，對各項任務皆造成挑戰 (Zhao, Li, Xuan, Kou, Gong, and Zhou, 2022)。

因此，如何提升資料品質與資訊表徵能力，已成為當前衛星視訊應用的關鍵問題。應用影像超解析 (Super Resolution) 相關技術成為解方，其目標為透過深度學習或資料處理技術，從低解析度影像中還原出更具細節與質感的高解析度畫面。透過對幀間重複資訊的處理，超解析技術能有效補足原始資料中所缺乏的細節紋理，使小型目標在空間上具備更明確的輪廓與結構，進而提升後續任務 (如偵測、追蹤、分割等) 的辨識率與穩定性 (Gu, Liu, Wang,

Li, and Gao, 2020)。同時，超解析亦可搭配多目標追蹤、物體分割、場景分類等模型進行特徵強化，提升整體系統效能。從現有研究觀察，結合超解析的衛星視訊系統不僅能改善視覺品質，亦能提升模型對複雜背景、遮蔽與尺度變化的適應性 (Li et al., 2023)。

## 貳、視訊式遙測衛星之發展

### 一、視訊式攝影測量 (Videogrammetry) 的發展

傳統攝影測量 (Photogrammetry) 是以重建物體幾何之三維坐標為主要考量，使用攝影測量進行三維重建的三大要素為影像比例尺 (或空間解析度)、影像重疊率及交會角。傳統攝影測量經由網形設計獲取不同測站之重疊影像，測站間的基線需考量基線航高比，優點是有較佳的交會幾何，但影像重疊率較視訊式攝影測量低。相較於傳統攝影測量，視訊式攝影測量 (Gruen, 1997) 以視訊方式獲取影像進行量測，傳統類比式視訊式攝影測量是以動態追蹤 (Motion Capture) 為主要考量，過去的主要應用領域為工業近景量測中的動態追蹤、工程中結構破壞分析 (Crash Monitoring) 等。數位式視訊式攝影測量取樣頻率高 (如每秒顯示 30 格)，優點是影像重疊率高，短基線有利影像匹配，故在運動回復結構 (Structure-from-Motion, SfM) 的應用上具有優勢 (Torresani and Remondino, 2019)，缺點是相幅大小及空間解析力相較傳統攝影測量差。比較傳統攝影測量及視訊式攝影測量，視訊式有較佳的時間解析度，故偵測動態物件有較佳的表現，可同時獲取三維地表及移動物件之軌跡 (Gruen, 1997)。由於視訊式攝影測量經由連續影像達成高重疊，視訊資料在 SfM 處理中具有相鄰影像高相似度的優勢，且可同時滿足三維重建及物件追蹤之需求 (Taketomi, Uchiyama, and Ikeda, 2017)，因此視訊式攝影測量有其優勢。

### 二、視訊式衛星影像處理技術的優勢

隨著數位感測器技術的發展，視訊式攝影測量也從傳統地面 (Ground-Based) 近景攝影測量 (Teo, 2015) 發展到空中無人機 (Drone-Based) 視訊式攝影測量，更進一步擴展到衛載 (Space-Borne) 感測器。衛載視訊推幅式衛星影像的優勢如下：(一) 具有在軌多相幅超解析 (On-Orbit Multi-Frame Super-Resolution) 提升影像空間解析度 (Anger, Ehret, de Franchis, and Facciolo, 2020)；(二) 多視角在軌輻射率定 (Multi-Angle On-Orbit Relative Radiometric Calibration) 提升輻射品質；(三) 連續多視角影像 (Continuous Multi-Angle Remote Sensing) 提升地表判識精度 (Yao et al., 2021)；(四) 大範圍移動物件偵測 (Ahmadi, Ghorbanian, and Mohammadzadeh, 2019)；(五) 多移動目標追蹤 (Multi-Object Tracking) (Wu, Su, Yuan, Shen, and Zhang, 2022) 等優勢。相較傳統的航帶型 (Strip-Based) 衛星影像，此視訊式衛星新興領域具研究潛力與應用價值，現行具有視訊推幅式能力的衛星包含 Planet Lab SkySat-1 Video、UrtheCast Iris、印尼 LAPAN-A1/A2 等等，視訊推幅式感測器是現行地球觀測的重要發展趨勢。

### 三、視訊式衛星相關文獻探討

具備視訊功能的 SkySat-1 於 2013 年 11 月 21 日發射成功，相較其他視訊式遙測衛星已累積大量不同應用。d'Angelo, Kuschik, and Reinartz (2014) 針對 SkySat 視訊產品進行分析研究報導，未使用地面控制點的直接地理對位均方根誤差 (Root Mean Squared Error, RMSE) 約 100 公尺，使用控制點及有理函數平差的 RMSE 約 10 公尺，對 1 公尺空間解析度的 SkySat Video 而言，10 公尺的精度可能是受到控制點品質的影響。Murthy, Shearn, Smiley, Chau, Levine, and Robinson (2014) 則是針對 SkySat 三航帶影像的相對精度進行分析，經由地面影像處理工作站，可將航帶間的相對精度提升到 1 個像元的精度。d'Angelo, Mátyus, and Reinartz (2016) 進一步分析比較 SkySat Video 及 WorldView-3 衛星，使用相同的處理程序，分析結果顯示 SkySat 微衛星軌道較不穩定，更依賴地面控制點的數量，使用 38 個地面控制點及有理函數平差可達到 RMSE 2.5 像素，但 WorldView-3 只需要使用 3 個地面控制點；實驗中比較光達及 60 幅 SkySat Video 匹配產生的數值地表模型，高程差異平均值及 RMSE 均為 1.8 公尺。d'Angelo and Reinartz (2021) 則比較 SkySat 三種不同產品建立數值地表模型的品質，這三種產品分別是立體對、三重疊立體對及視訊影像。經有理函數改正及影像匹配，視訊影像重疊率最高，所建立的數值地表模型品質最佳，而三重疊立體對的精度 (RMSE 2.5 公尺) 比立體對的精度 (RMSE 5.2 公尺) 佳。

### 四、視訊式遙測衛星介紹

視訊式遙測衛星能夠針對特定區域提供大量的靜態與動態資訊，拓展了遙測衛星的觀測能力，表 2 整理指標性的視訊式遙測衛星。美國 Planet Lab 的 SkySat 具備視訊式功能，該星系中的第一顆衛星 SkySat-1 於 2013 年 11 月 21 日發射升空，該衛星由美國 Skybox Imaging 公司開發，支援全色態成像，全色影像解析度約為 1.1 公尺，每次拍攝可持續約 90 秒，提供連續的動態觀測能力，且每秒 30 張影像，能夠捕捉快速變化的地面動態；每次成像可覆蓋約  $1.1 \times 2$  平方公里的地區，適合用於精細的地面目標監測。

印尼的 LAPAN (eoPortal, 2012) 系列衛星星系亦具備獲取視訊影片的能力，其中 LAPAN-TUBSAT 是印尼第一顆獲取視訊影片的衛星 (Hasbi and Widayastuti, 2007)，而另一顆視訊式衛星 LAPAN-A2 於 2015 年 9 月 28 日成功發射升空，相較於美國 SkySat 衛星所提供的全色視訊資料，LAPAN-A2 最大的特點在於搭載 SpaceCam C4000 彩色數位相機模組，能夠提供 RGB (Red, Green, Blue) 三色影像的錄影資料，進一步提升其在色彩資訊判釋與地物分類方面的應用能力。LAPAN-A2 的影像地面空間解析度約為 6 公尺，每次成像掃描可覆蓋約  $12 \times 12$  公里 (即約 144 平方公里) 的地表區域。這種中等解析度搭配動態錄影的能力，特別適用於海洋環境監測 (如漁船活動追蹤、油污監測、海岸變遷觀測) (Julzarika, 2017) 以及災害監測 (如火災地形) 等需要時序性與區域性兼具的應用場景。

吉林 (Jilin) (eoPortal, 2025) 星系是中國第一個自主研發及營運的商用遙測衛星系統，該系統的首顆衛星 Jilin-1，於 2015 年 10 月 7 日成功發射升空。截至 2023 年 8 月，Jilin-1 星系在軌衛星數量已突破 100 顆，涵蓋多型態觀測模組，具備光學、高光譜、廣域成像與動態視訊等多重觀測能力。藉由大規模微衛星，該系統可對全球任一地區進行每日多次的重

訪，在自然災害、農業監測、城市變遷、國土安全等應用領域展現出顯著優勢。在視訊動態成像能力方面，Jilin-1 星系的視訊衛星具備先進的 4K 高畫質錄影技術，可以每秒 30 幀的速度拍攝 RGB 彩色影片。其地面解析度達 0.92 公尺（全色），單次成像範圍約為  $11 \times 4.6$  公里，適合用於大範圍持續監控與動態變化追蹤。該能力在應用層面已廣泛應用於港口監視、交通流量分析、環境異常監測等領域。

不同於商業公司或政府所發射的微衛星，LuoJia-3 則是由學界所發展，是由武漢大學研發的衛星，於 2023 年 1 月 15 日成功發射，是全球首顆具備在軌智慧處理的地球資源衛星，能夠在衛星載體即時完成幾何校正、目標偵測與數據壓縮等操作，該衛星具備約 0.7 公尺的地面解析度，能夠靈活應對不同視訊觀測任務的需求。由於衛星快速移動及高頻的變化，該衛星視訊觀測的特性是採用一套「物體空間一致性實時穩定算法」，能在軌端自動修正影像幾何扭曲，確保視訊內容呈現穩定、清晰的對地畫面，獲取高品質動態影像（Wang, Wu, Xiao, Li, and Yang, 2024）。

不同於發射微衛星進行視訊資料獲取，加拿大 UrtheCast 公司在國際太空站上部署兩臺攝影機，其中一臺中解析度相機 Theia 用於拍攝靜態影像，另一臺高解析度相機 Iris 則是用於拍攝高解析度視訊影片，並能追蹤目標，Iris 可拍攝解析度約為 1 公尺的高畫質影片，並具備可轉向平臺以追蹤特定地面目標，能夠以每秒 3 幀的速度拍攝 RGB 彩色影片，且可連續拍攝約 60 秒的彩色高畫質影片（Tuia, Moser, and Le Saux, 2016）。

視訊式遙測衛星的發展展現了空間與光譜解析度的顯著躍進，從 6 公尺灰階影像，提升至具備 0.7 公尺解析度與 RGB 彩色的 4K 高畫質影片，視訊式遙測衛星可提升時間解析度，在空間解析度及光譜解析度的提升下，可搭配即時影像處理與穩定化演算法。未來，視訊衛星將朝向高解析、智慧處理與全球即時監控發展。

表 2 視訊衛星詳細配置與特性

衛星平臺	發射年份	地面解析度 (公尺)	成像色彩	拍攝時長 (秒)	每秒影格數 (FPS)	成像範圍 (公里)
SkySat-1	2013	1.10	Pan	90	30	$2.0 \times 1.1$
ISS : UrtheCast Iris	2014	1.00	RGB	60	3	$\leq 4.1 \times 2.2$
TT-2	2014	$\geq 5.00$	Pan	$\leq 180$	25	$3.1 \times 2.4$
LAPAN-A2	2015	6.00	RGB		15	$12.0 \times 12.0$
Jilin-1	2015	$\geq 0.92$	RGB	120	$\leq 20$	$11.0 \times 4.6$
Zhuhai-1 OVS-1	2017	1.98	RGB	$\leq 90$	20	$8.1 \times 6.1$
Carbonite-2	2018	1.20	RGB	120	$\leq 25$	$5.9 \times 5.9$
Zhuhai-1 OVS-2	2018	0.90	RGB	$\leq 120$	25	$4.5 \times 2.7$
LuoJia-3-01	2023	0.70	RGB			

註：RGB：指紅（Red）、綠（Green）、藍（Blue）三原色；Pan：全色態。

資料來源：修改自 Chen et al. (2024)。

## 參、視訊式遙測衛星之影像去模糊化

### 一、研究方法

視訊式衛星影像具有高影像重疊率及高時間解析度的優勢，然而衛星動態取樣，可能會降低影像品質，照明條件的劇烈變化與軌道運動也會造成影像遮蔽與失真，造成影像細節紋理不足，本研究以視訊式遙測衛星影像為資料基礎，實作分析單影像超解析技術（Single Frame Super-Resolution, SISR）應用於影像去模糊化，經由影像去模糊化技術提升影像品質，並使用精度評估指標，評估影像細節重現與品質提升之表現差異。

「去模糊化」與「超解析」都是從劣化（Degraded）影像中推估出原始清晰影像（Latent Image）的方法，兩者皆屬於典型的影像復原（Image Restoration）任務，在解算處理邏輯與目標上具有高度相似，但在本質上有些許差異：（一）去模糊化旨在提升清晰度與對比細節，修復模糊區域，空間解析度不變，例如推估成像的點散函數；（二）超解析則著重於提升影像的空間解析度，產成更多細緻的像素，例如影像內插；（三）本研究的核心目標在於針對視訊式衛星影像中常見的運動模糊現象，考量成像運動物理特性，使用去模糊化進行影像復原，藉此提升整體影像品質。運動模糊源於衛星移動與成像過程中的相對動態，特別是在低軌及高頻率拍攝任務中更加顯著。本研究並非以超解析提升空間解析度為主要目的，而是借助去模糊化架構中對影像細節建模的能力，用於重建清晰的影像細節，聚焦解決運動模糊問題，以期有效提升視訊式衛星影像之視覺品質。

#### （一）影像去模糊化研究方法

本研究採用兩階段模糊核（Blur Kernel）估計之影像去模糊方法（Xu and Jia, 2010），針對衛星影像中常見之運動模糊進行有效還原與品質提升。整體流程首先將模糊影像（Blurred Image）建構成多層次金字塔影像結構，以降低初期估計計算量並提升整體穩定性。於最高層（即最低解析度）執行初始模糊核估計與粗略影像重建，接著逐層將模糊核與影像放大，並在每一層級持續優化模糊核與影像還原品質，由粗到細，直至回復至原始解析度完成最終重建。模糊影像可被表示為清晰影像與模糊核的卷積（Convolution）結果加上雜訊，定義如式（1），提升影像品質的目標是通過模糊核和消除模糊的數值方法，經由反卷積（Deconvolution）從模糊影像  $x$  還原至清晰影像  $y$ ：

$$y = x \otimes k + \epsilon \quad (1)$$

其中， $x$  為觀測到的模糊影像， $y$  為未知的清晰影像， $k$  為模糊核（點擴散函數 [Point Spread Function, PSF] 表示模糊的方式）， $\otimes$  為卷積運算符號， $\epsilon$  為高斯雜訊（Gaussian Noise）。

為提升估計穩定性與運算效率，反演最可能的清晰影像  $y$  與對應模糊核，並重建原始資訊，整體流程設計為金字塔式兩階段方法（Two-Stage Pyramid-Based Deblurring）（Xu and Jia, 2010），在初始階段（Coarse Stage），將輸入模糊影像降採樣形成金字塔底層，在低解析度下進行初始模糊核  $k$  的估計，如式（2）：

$$E(k) = \left\| \nabla I_s \otimes k - \nabla y \right\|^2 + \gamma \left\| k \right\|^2 \quad (2)$$

其中， $\nabla I_s$  是影像中有顯著梯度的邊緣； $k$  是初始模糊核； $\gamma$  為正則化的權重，使用快速傅立葉變換求解，快速計算取得初始模糊核。

從低解析度影像獲取的初始模糊核可能包含雜訊或過於稀疏（即大多數元素為零），研究中採用支援區域（Support Region）進一步精化初始模糊核。支援區域是指在目前估計的初始 kernel 中，那些值較大的元素所對應的位置，也就是被認為「真正代表模糊方向或軌跡」的位置。這些位置會被認定為「支援」（Support），如式（3），後續在優化中會給予較小的懲罰項（Regularization），以保留其值，避免被過度抑制：

$$S_{i+1} = \{j: k_j^i > \epsilon_s\} \quad (3)$$

其中， $j$  是模糊核中每個位置的索引。 $\epsilon_s$  是自適應閾值，用於選擇非零的高數值元素； $S_{i+1}$  是支援區域的重要集合。

在漸進式細化階段（Refinement Stage）中，通過迭代支持檢測（Iterative Support Detection, ISD），去除雜訊影響，提升模糊核的精確性。式（4）中，僅使用支援區域內的像素進行模糊核的計算，每一輪更新後會再重新偵測支援區域，並根據新的支援區域重新估計模糊核，使其逐漸收斂為稀疏且具代表性的形式：

$$E(k) = \frac{1}{2} \left\| \nabla I_s \otimes k - \nabla B \right\|^2 + \gamma \sum_{j \in S_i} |k[j]| \quad (4)$$

## （二）精度評估指標

為評估超解析模型的性能以及超解析影像的品質，本研究使用兩種關鍵的精度指標峰值訊噪比（Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR）及結構相似性指數（Structural Similarity Index, SSIM），假設影像寬高分別為  $W$  與  $H$ ，影像去模糊化精度指標說明如下：

1. PSNR：用於度量超解析影像與原始高解析度影像之間的相似性，它定義了最大訊號功率與干擾該訊號的功率比值，單位為分貝（dB）。PSNR 的值越高表示去模糊化影像與原始影像之間的相似性越高，公式如下：

$$PSNR = 10 \times \log_{10} \left( \frac{MAX^2}{MSE} \right) \quad (5)$$

其中， $MAX$ （Maximum）是影像的最大像素值，在 8 位元影像中，通常為 255； $MSE$ （Mean Squared Error）是原始影像與重建影像的像素差異平均值。

2. SSIM：是一個綜合考量亮度 (Luminance)、對比度 (Contrast) 和結構 (Structure) 相似性的指標，其計算包含比較局部均值 ( $\mu_x, \mu_y$ )、標準差 ( $\sigma_x, \sigma_y$ ) 和協方差  $\sigma_x\sigma_y$ ，以量化兩個影像間的相似性，SSIM 指數介於  $\pm 1$  之間，越接近 1 表示兩個影像越相似，公式如下：

$$SSIM = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (6)$$

其中， $x$ 、 $y$  分別是原始影像和重建影像的局部區； $\mu_x$ 、 $\mu_y$  為區塊的平均值，衡量亮度； $\sigma_x^2$ 、 $\sigma_y^2$  為區塊的方差，衡量對比度； $\sigma_{xy}$  為區塊的協方差，衡量結構的相似性； $C_1$ 、 $C_2$  為穩定常數，用於避免分母為 0 的情況；通常設置為  $C_1 = (K_1L)^2$ ； $C_2 = (K_2L)^2$ ； $K_1 = 0.01$ ； $K_2 = 0.03$ ； $L$  是像素值範圍 (如 255)。

## 二、實驗資料

本實驗所使用之資料為 SkySat 高雄地區的多視角衛星視訊影像 (如圖 1)，取樣日期為 2021 年 4 月 23 日，衛星視訊共擷取 900 張連續影像作為超解析重建基礎，取樣時間長度為 30 秒，取樣頻率為每秒 29.97 幅全色態影像，平均地面空間解析度為 0.885 公尺，對應地面大小約為  $2,265 \times 955$  公尺。為利分析與比對，研究選取其中 20 張影像為主要測試樣本，進行兩種影像超解析模式比較。第一種模式是每張影像計算一個模糊核  $\text{kernel}_{\text{each}}$ ，每幅影像使用不同的對應  $\text{kernel}_{\text{each}}$ ；第二種模式是把所有 20 個模糊核取平均，去除雜訊，得到平均模糊核  $\text{kernel}_{\text{mean}}$ ，所有影像使用相同的單一  $\text{kernel}_{\text{mean}}$ 。

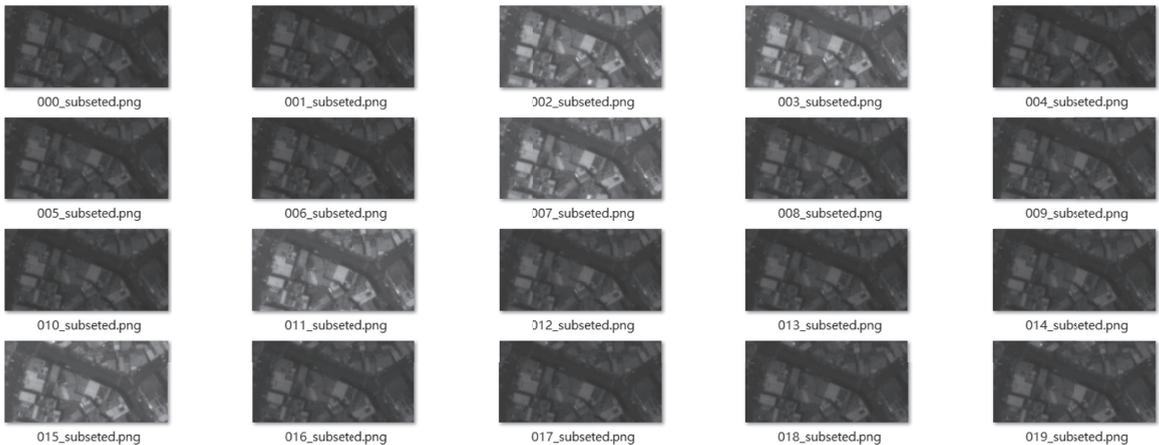


圖 1 裁切合適範圍之連續影像 20 幀實驗資料

資料來源：本研究產製。

### 三、實驗成果分析

圖 2 為本研究採用之實驗流程，透過模糊核推估與去模糊化提升影像品質。研究中採用視訊影片中的連續 20 幀影像進行影像模糊化，並使用 PSNR 與 SSIM 兩項指標作為精度評估指標，比較單一  $kernel_{mean}$  與對應  $kernel_{each}$  於提升影像品質之效果。

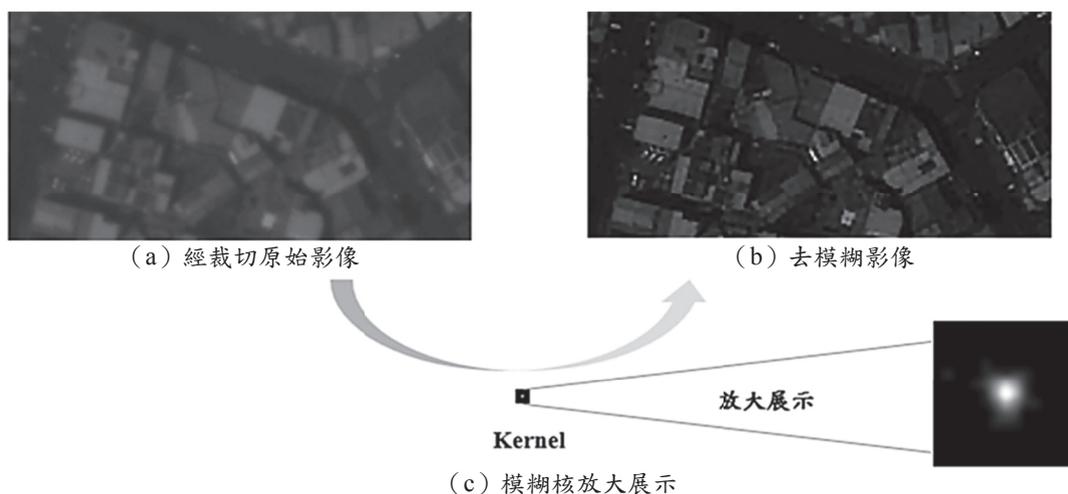


圖 2 實驗程序示意圖

資料來源：本研究產製。

首先，觀察對應  $kernel_{each}$  的 20 幀影像實驗結果（如圖 3），可見 PSNR 平均值為 18.2049 dB，標準差僅 0.2151 dB，顯示所有影像在空間解析度提升後的品質變異性低；SSIM 方面，平均值為 0.5999，標準差為 0.0546，變異性略高於 PSNR，可見部分幀別在結構細節與亮度對比的還原上仍有差異。經比較發現，PSNR 與 SSIM 整體呈現正相關，表示品質較佳的影像不僅在數值層面具備較高訊號強度，也在視覺結構與細節重建上具有一致性。

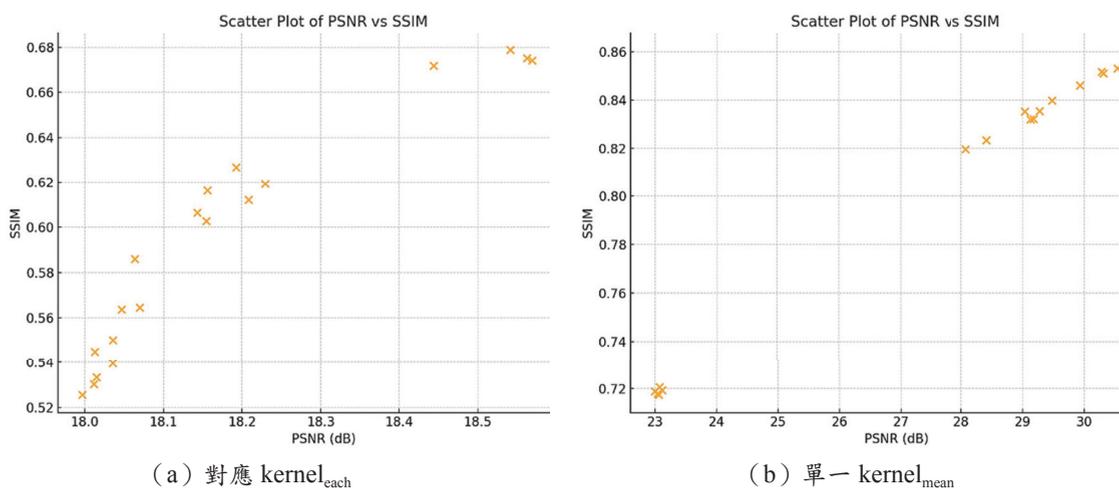


圖 3 對應模糊核實驗結果之敘述統計

資料來源：本研究產製。

表 3 為比較對應  $\text{kernel}_{\text{each}}$  與單一  $\text{kernel}_{\text{mean}}$  之量化成果，觀察使用單一  $\text{kernel}_{\text{mean}}$  的 20 幀影像實驗結果，可見 PSNR 平均值為 28.106 dB，標準差為 3.091 dB；SSIM 方面，平均值為 0.812，標準差為 0.057，變異性略高於 PSNR，顯示部分影像在結構細節與亮度對比的還原上仍有差異。整體比較發現，PSNR 與 SSIM 呈現正相關。表 3 比較  $\text{kernel}_{\text{mean}}$  與  $\text{kernel}_{\text{each}}$  的量化成果， $\text{kernel}_{\text{mean}}$  的 PSNR 提升約 10 dB，SSIM 則提升 0.2，顯示重建後的影像在數值強度與視覺結構上皆有顯著改善。使用  $\text{kernel}_{\text{mean}}$  的 PSNR 標準差略高，代表整體視覺還原效果具有優勢。

表 3 比較對應  $\text{kernel}_{\text{each}}$  與單一  $\text{kernel}_{\text{mean}}$  之量化成果

統計指標	對應 $\text{kernel}_{\text{each}}$		單一 $\text{kernel}_{\text{mean}}$	
	PSNR (dB)	SSIM	PSNR (dB)	SSIM
Average	18.205	0.600	28.106	0.812
STD	0.215	0.055	3.091	0.057

註：PSNR：峰值訊噪比（Peak Signal-to-Noise Ratio）；SSIM：結構相似性指數（Structural Similarity Index）。  
資料來源：本研究產製。

圖 4 為原始影像與經過去模糊化處理後之影像。比較影像可知原始影像存在顯著模糊情形，建物邊界、屋頂輪廓與道路水體區域皆不清晰，紋理細節缺乏，整體可判讀性偏低；去模糊化影像於邊緣清晰度與紋理細節上皆有明顯改善。建物外型較為立體可辨，有助於後續目標辨識、分類與變遷偵測任務的應用。儘管超解析影像整體視覺品質有所提升，局部邊緣仍可能出現不自然的銳化痕跡，特別是陰影處或紋理密集區。如圖 5 所示，本研究方法雖可有效提升整體視覺品質，惟於部分特殊區域（如陰影與紋理密集處）仍觀察到不自然的銳化痕跡。這是因為陰影區域（藍框標示）由於影像梯度弱及對比度低，去模糊化進行反卷積時容易產生過度強化，進而放大原本應模糊過渡的細節，造成邊緣過曝（Overshooting）效應；另一方面，紋理密集區域（紅框標示處）如屋頂與牆面交界處，結構複雜且方向多樣，易使模型過度強化局部梯度訊號，導致不符合真實結構的人工銳化結果。

## 肆、結論

本研究首先從小型衛星的發展趨勢出發，分析低成本、高效能的小型衛星星系已成為衛星任務的重要發展方向。衛星視訊觀測通過提供動態且連續的地表觀測資料，可彌補傳統衛星遙測在時間解析度上的不足，並在動態目標追蹤與細節變化偵測上展現應用潛力。在視訊式遙測衛星的發展方面，近年來已有顯著進展，尤其在視訊影像資料的擷取能力、空間解析度及即時智慧處理等領域均取得突破性成果。視訊衛星如 SkySat、Jilin-1 及 Luojia-3 等，已展現出在動態監控、災害應變與城市規劃方面的顯著應用潛力。隨著技術逐步成熟與成本降低，衛星視訊觀測正邁向規模化與日常化。然而，衛星視訊依然面臨資料傳輸量大、即時處理需求高及資料解析能力提升等技術挑戰。



(a) 原始影像



(b)  $\text{kernel}_{\text{each}}$  去模糊化影像



(c)  $\text{kernel}_{\text{mean}}$  去模糊化影像

圖 4 視覺化成果比較

資料來源：本研究產製。

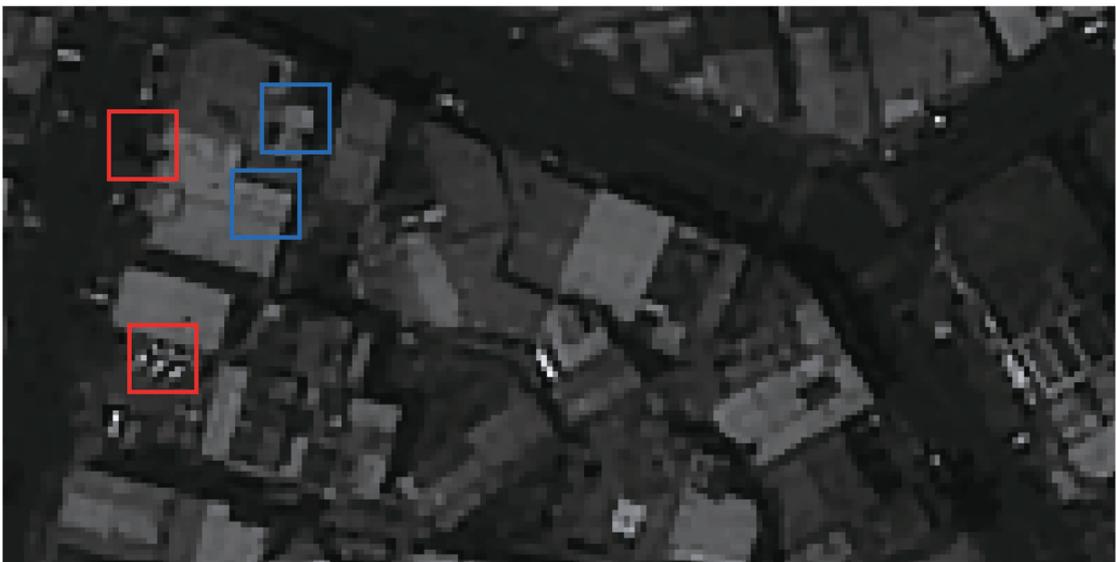


圖 5 過度銳利化現象分析

資料來源：本研究產製。

針對上述需求與挑戰，本研究應用影像去模糊技術，以提升衛星影像解析度與視覺品質，並以 SkySat 衛星於高雄地區的連續動態影像進行實際驗證。通過兩階段金字塔式去模糊化方法，利用初始模糊核估計與精細的反卷積重建程序，有效克服衛星運動所造成的模糊現象以及細節資訊缺乏的問題。實驗分析證明此技術顯著提升了影像清晰度與細節保留能力。本研究進一步比較了兩種去模糊策略：單一  $\text{kernel}_{\text{mean}}$  與每幀影像各自對應  $\text{kernel}_{\text{each}}$ 。實驗結果表明，使用單一  $\text{kernel}_{\text{mean}}$  的影像品質有顯著改善，其 PSNR 平均提升至約 28.11 dB，而 SSIM 則達到 0.812，分別比每幀影像各自估算模糊核的方式提高約 10 dB 和 0.2。雖然此法可能出現局部的過度銳化現象，但整體視覺效果提升顯著，有助於後續更精確的目標識別、變遷偵測及動態追蹤等高階應用。

未來視訊式遙測衛星的發展仍須持續解決影像處理速度、即時性與智慧化分析的難題。本研究所提出的影像去模糊方法，已證明可顯著提升衛星視訊資料的應用價值。未來可進一步探討多源視訊衛星影像融合技術，以進一步提高影像解析度與資訊豐富度，從而更有效地推動視訊衛星影像技術在城市規劃、災害應變及環境監測等領域的實務應用與學術研究。

## 致謝

本研究承蒙國家科學及技術委員會計畫支持，及國家太空中心提供測試資料得以順利完成，謹此致謝。

## 參考文獻

- NewSpace Lab 商業太空實驗室，2021 年 6 月 1 日，〈踏入商業太空產業的 10 個創新機會，你會從哪開始？〉，<https://reurl.cc/MzmZAn>（瀏覽日期：2025 年 8 月 12 日）。
- Ahmadi S. A., Ghorbanian A., and Mohammadzadeh A., 2019, "Moving Vehicle Detection, Tracking and Traffic Parameter Estimation from a Satellite Video: A Perspective on a Smarter City," *International Journal of Remote Sensing*, 40(22), 8379-8394. doi:10.1080/01431161.2019.1610983
- Anger J., Ehret T., de Franchis C., and Facciolo G., 2020, "Fast and Accurate Multi-Frame Super-Resolution of Satellite Images," *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 5(1), 57-64. doi:10.5194/isprs-annals-V-1-2020-57-2020
- Chen Y., Tang Y., Xiao Y., Yuan Q., Zhang Y., Liu F., He J., and Zhang L., 2024, "Satellite Video Single Object Tracking: A Systematic Review and an Oriented Object Tracking Benchmark," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 210, 212-240. doi:10.1016/j.isprsjprs.2024.03.013
- d'Angelo P., Kusch G., and Reinartz P., 2014, "Evaluation of Skybox Video and Still Image Products," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information*

- Sciences*, XL-1, 95-99. doi:10.5194/isprsarchives-XL-1-95-2014
- d'Angelo P., Mátyus G., and Reinartz P., 2016, "Skybox Image and Video Product Evaluation," *International Journal of Image and Data Fusion*, 7(1), 3-18. doi:10.1080/19479832.2015.1109565
- d'Angelo P. and Reinartz P., 2021, "Digital Elevation Models from Stereo, Video and Multi-View Imagery Captured by Small Satellites," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B2-2021, 77-82. doi:10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-77-2021
- eoPortal, 2012/6/1, "LAPAN-A2 Microsatellite of Indonesia," <https://www.eoportal.org/satellite-missions/lapan-a2#mission-status> (accessed June 10, 2025).
- eoPortal, 2025/3/3, "Jilin/Gaofen Constellation," <https://www.eoportal.org/satellite-missions/jilin-con> (accessed June 10, 2025).
- Gruen A., 1997, "Fundamentals of Videogrammetry—A Review," *Human Movement Science*, 16(2-3), 155-187. doi:10.1016/S0167-9457(96)00048-6
- Gu Y., Liu H., Wang T., Li S., and Gao G., 2020, "Deep Feature Extraction and Motion Representation for Satellite Video Scene Classification," *Science China Information Sciences*, 63, 140307. doi:10.1007/s11432-019-2784-4
- Hasbi W. and Widayastuti R., 2007, "The Use of LAPAN-TUBSAT Satellite Video Data for Earth Observation," paper presented at International Workshop on Earth Observation Small Satellites for Remote Sensing Applications, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Julzarika A., 2017, "Utilization of LAPAN Satellite (TUBSAT, A2, and A3) in Supporting Indonesia's Potential as Maritime Center of the World," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 54(1), 012097. doi:10.1088/1755-1315/54/1/012097
- Li S., Sun X., Gu Y., Lv Y., Zhao M., Zhou Z., Guo W., Sun Y., Wang H., and Yang J., 2023, "Recent Advances in Intelligent Processing of Satellite Video: Challenges, Methods, and Applications," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 16, 6776-6798. doi:10.1109/JSTARS.2023.3296451
- Liang S. and Wang J. (Eds.), 2019, *Advanced Remote Sensing: Terrestrial Information Extraction and Applications*, 2nd ed., San Diego, CA: Academic Press. doi:10.1016/C2017-0-03489-4
- Murthy K., Shearn M., Smiley B. D., Chau A. H., Levine J., and Robinson M. D., 2014, "SkySat-1: Very High-Resolution Imagery from a Small Satellite," in *Proceedings of SPIE 9241, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XVIII*, Bellingham, WA: International Society for Optics and Photonics, 92411E. doi:10.1117/12.2074163
- Taketomi T., Uchiyama H., and Ikeda S., 2017, "Visual SLAM Algorithms: A Survey from 2010 to 2016," *IPSN Transactions on Computer Vision and Applications*, 9(1), 16. doi:10.1186/s41074-017-0027-2
- Teo T., 2015, "Video-Based Point Cloud Generation Using Multiple Action Cameras," *The Inter-*

- national Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-4/W5, 55-60. doi:10.5194/isprsarchives-XL-4-W5-55-2015
- Torresani A. and Remondino F., 2019, “Videogrammetry vs Photogrammetry for Heritage 3D Reconstruction,” *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W15, 1157-1162. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-1157-2019
- Tuia D., Moser G., and Le Saux B., 2016, “2016 IEEE GRSS Data Fusion Contest: Very High Temporal Resolution from Space Technical Committees,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 4(1), 46-48. doi:10.1109/MGRS.2016.2515107
- Union of Concerned Scientists, 2023/5/1, “UCS Satellite Database: In-depth Details on the 7,560 Satellites Currently Orbiting Earth, Including Their Country of Origin, Purpose, and Other Operational Details,” <https://www.ucsusa.org/resources/satellite-database> (accessed August 12, 2025).
- Wang M., Wu Q., Xiao J., Li D., and Yang F., 2024, “Luojia 3-01 Satellite—Real-Time Intelligent Service System for Remote Sensing Science Experiment Satellite,” *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17, 8250-8257. doi:10.1109/JSTARS.2024.3386958
- Wu J., Su X., Yuan Q., Shen H., and Zhang L., 2022, “Multivehicle Object Tracking in Satellite Video Enhanced by Slow Features and Motion Features,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 5616426. doi:10.1109/TGRS.2021.3139121
- Xu L. and Jia J., 2010, “Two-Phase Kernel Estimation for Robust Motion Deblurring,” in *Computer Vision—ECCV 2010: 11th European Conference on Computer Vision*, Berlin, Germany: Springer, 157-170. doi:10.1007/978-3-642-15549-9\_12
- Yang T., Wang X., Yao B., Li J., Zhang Y., He Z., and Duan W., 2016, “Small Moving Vehicle Detection in a Satellite Video of an Urban Area,” *Sensors*, 16(9), 1528. doi:10.3390/s16091528
- Yao Y., Leung Y., Fung T., Shao Z., Lu J., Meng D., Ying H., and Zhou Y., 2021, “Continuous Multi-Angle Remote Sensing and Its Application in Urban Land Cover Classification,” *Remote Sensing*, 13(3), 413. doi:10.3390/rs13030413
- Zhao M., Li S., Xuan S., Kou L., Gong S., and Zhou Z., 2022, “SatSOT: A Benchmark Dataset for Satellite Video Single Object Tracking,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 5617611. doi:10.1109/TGRS.2022.3140809