

國立交通大學

土木工程學系
碩士論文

特徵匹配於AVNIR-2影像與PALSAR影像



**Feature-based Image Registration of
AVNIR-2 and PALSAR Images**

研究生：陳信瑜

指導教授：張智安

中華民國一百年七月

特徵匹配於 AVNIR-2 影像與 PALSAR 影像之影像套合

Feature-based Image Registration of

AVNIR-2 and PALSAR Images

研究生：陳信瑜

Student : Hsin-Yu Chen

指導教授：張智安

Advisor : Tee-Ann Teo

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master

in

Civil Engineering

July 2011

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百年七月

特徵匹配於 AVNIR-2 影像與 PALSAR 影像之影像套合

學生：陳信瑜

指導教授：張智安

國立交通大學土木工程學系

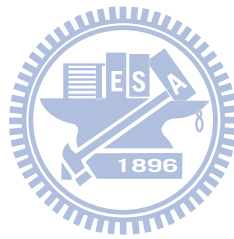
中文摘要

遙感探測以非接觸的方式進行觀測，感測器主要分為被動式光學感測器和主動式雷達感測器，光學影像的成像原理為角度投影，並接收物體反射太陽的電磁波；雷達影像則使用距離投影成像，主動發射能量並接收地表反射的電磁波。兩種影像擁有不同的資訊，因此整合這些影像有利後續之應用，例如災害監控、地物分類、影像融合和變遷偵測等，然而影像整合的首要工作為影像套合。本研究以互訊息匹配 (Mutual Information Matching)、面特徵匹配(Patch-based Matching)及線特徵匹配(Edge-based Matching)三種方法進行異質影像套合，其中互訊息匹配利用移動視窗的熵 (Entropy)計算影像間的互訊息資訊量，互訊息資訊量最高者為相似性最高的區域；面特徵匹配是以分水嶺影像分割法進行面特徵萃取，並以成本函數(Cost Function)計算面特徵的相似度進行匹配；線特徵匹配是先以 Canny 萃取線特徵，再最小化兩組影像間邊緣線的距離，並以影像金字塔由解析度粗到細進行匹配。

本研究分別使用兩組 AVNIR-2 光學影像及 PALSAR 雷達影像，第一組資料位於日本東京灣，光學及雷達影像的影像等級分別為 Level 1A 和 Level 1.1，第二組資料位於台灣北部，光學及雷達影像的影像等級分別為正射影像及 Level 1.5，並就不同地表覆蓋物、地形起伏及影像品質衛星影像擷取測試區，分別使用上述三種匹配方法進行套合，最後以人工量測的檢核點作為精度評估的依據。實驗成果顯示，初步套合誤差約為 25 個像元的測試區一，互訊息匹配成果的均方根誤差約為 4.27 個像元，面特徵匹配為 23.38 個像元，線特徵匹配為 3.41 個像元；於山區地形的測試區二，初步套合誤差約為 5.3 個像元，互訊息匹配成果的均方根誤差值約為 4.65 個像元，面特徵匹配為 4.51 個像元，線特徵匹配為 2.15 個像元；於地表覆蓋物複雜的測試區三，初步套合誤差約為 2.92 個像元。

元，互訊息匹配的成果的 RMSE 值約為 2.38 個像元，面特徵匹配為 2.69 個像元，線特徵匹配為 2.62 個像元；於河道區域的測試區四，初步套合誤差約為 3.72 個像元，互訊息匹配的成果的 RMSE 值約為 3.76 個像元，面特徵匹配為 3.25 個像元，線特徵匹配為 3.21 個像元，成果顯示三種方法均能有效提升異質影像之套全精度。

關鍵字：衛星影像、影像套合、影像匹配、特徵匹配



Feature-based Image Registration of

AVNIR-2 and PALSAR Images

Student : Hsin-Yu Chen

Advisor : Tee-Ann Teo

Department of Civil Engineering

National Chiao Tung University

Abstract

Remote sensing is a technology which acquired data that is not in contact. The sensors of remote sensing include optical active sensor and radar passive sensor. Optical image is an angular projection and receives the measure energy that is naturally available. Radar image is a distance projection and provides its own energy source for illumination. These sensors contain different information. The integration of these images may be beneficial to many applications such as disaster monitoring, classification, image fusion and change detection. Image registration is the most important part before data fusion. The proposed methods include mutual information matching, patch-based matching and edge-based matching. Mutual information (MI) matching uses the entropy of moving windows to determine the mutual information between images and find out the area with the highest mutual information as the most similar area. Patch-based matching uses watershed segmentation for region extraction. Then, it calculates the similarity between regions with a cost function. Edge-based matching uses Canny edge detector and minimizes the distance between edges on the pair of images. The image pyramid is also utilized to improve the result of registration from coarse-to-fine.

This study contains two data sets. The test image are AVNIR-2 optical image and PALSAR radar image. Case one is an AVNIR-2 Level 1A image and a PALSAR Level 1.1 image which are located in Tokyo Bay. Case two is an AVNIR-2 orthoimage and a PALSAR

Level 1.5 image which are located in the northern part of Taiwan. Three matching methods are applied to different images as well as different land covers. Then, we use the independent check points to assess their results. In test 1, the accuracy of initial registration is about 25 pixels, the root mean square error (RMSE) of MI, patch-based and edge-based matching are 4.27 pixels, 23.38 pixels and 3.41 pixels, respectively. Test 2 is a mountain area and the accuracy of initial registration is about 5.3 pixels. The RMSE of MI, patch-based and edge-based matching are 4.65 pixels, 4.51 pixels and 2.15 pixels, respectively. Test 3 covers complex surface and the accuracy of initial registration is about 2.92 pixels. The RMSE of MI, patch-based and edge-based matching are 2.38 pixels, 2.69 pixels and 2.62 pixels, respectively. Test 4 is a watercourse area and the accuracy of initial registration is about 3.72 pixels. The RMSE of MI, patch-based and edge-based matching are 3.76 pixels, 3.25 pixels and 3.21 pixels, respectively. The experiment indicates that these three methods can improve the results of the initial registration by a few control points manually.

Keywords: satellite image, image registration, image matching, feature-based matching.

致謝

兩年的研究生活終於結束了！這兩年內無論是課業、研究還是生活方面都讓我學到很多。謝謝張智安老師不厭其煩的教導，無論在研究或是待人處事方面都給我許多啟發，雖然我一直都是個不認真的學生，但是老師從來沒有因此而放棄，在此致上最高的謝意。承蒙口試委員蔡富安老師及徐百輝老師在百忙之中抽空參加我的口試，並給予很多寶貴的建議，使學生的論文能夠更加完善，感謝兩位老師。

感謝一起學習及泳渡作業海的同學們，在碩一最艱難的時刻都有你們陪伴，日以繼夜得寫作業，在寫作業這條漫長的道路上互相扶持，使作業能夠順利完成，謝謝你們。碩二時，幸虧有悶悶學長、亨利學長、卡拉、暉尊、珊姊、昭儀、薇肥、蓓蓓、世咩、升哥、膿哥和翟翟的陪伴並安排了許多紓壓活動，使趕論文的龐大壓力能夠得到紓解，此外，更督促我盡快完成論文不能夠過於鬆懈，這也使我的論文能夠順利完成，非常高興能夠認識大家，也非常謝謝大家。

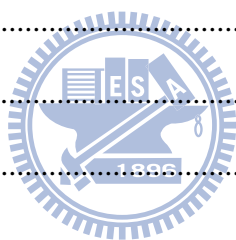
最後要謝謝一直支持我的家人，謝謝阿母總是在我心情不好的時候跟我說「賣阿捏拉，兩年很快就過去了」。謝謝我最愛的黃子玲在我被作業淹沒的時候能夠給我愛的鼓勵也一直叫我不要放棄，在我心情低落的時候能夠安慰我，沒有你的支持我的碩士學位就無法順利完成。

目錄

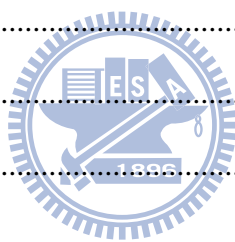
中文摘要	I
ABSTRACT	III
致謝	V
目錄	VI
圖目錄	IX
表目錄	XII
第一章 前言	1
1.1 研究動機與目的	1
1.2 文獻回顧	2
1.2.1 特徵匹配	2
1.2.2 區域匹配	12
1.3 研究目的與方法	15
1.4 論文架構	15
第二章 衛星與感測器介紹	16
2.1 ALOS 衛星簡介	16
2.1.1 PALSAR 感測器介紹	17
2.1.2 AVNIR-2 感測器介紹	18
2.1.3 PRISM 感測器介紹	19
第三章 研究方法	20
3.1 影像前處理	20
3.1.1 光學影像前處理	21



3.1.2 雷達影像前處理	21
3.1.2.1 斜距影像轉地距影像	21
3.1.2.2 灰度值處理	22
3.1.2.3 雜訊濾除	23
3.2 影像的初步套合	23
3.3 面特徵套合	25
3.3.1 面特徵萃取	25
3.3.2 面特徵匹配	26
3.4 線特徵套合	27
3.4.1 線特徵萃取	27
3.4.2 線特徵匹配	28
3.4.3 影像金字塔	29
3.5 區域套合	30
3.5.1 互訊息匹配	30
3.6 建立轉換模型	32
第四章 研究資料	34
4.1 原始影像	34
4.2 測試區影像	35
第五章 成果分析	40
5.1 測試區一成果分析	40
5.1.1 測試區一初步套合	40
5.1.2 測試區一互訊息匹配	41
5.1.3 測試區一面特徵匹配	44
5.1.4 測試區一線特徵匹配	46
5.1.5 測試區一成果比較	50



5.2 測試區二成果分析	51
5.2.1 測試區二初步套合	51
5.2.2 測試區二互訊息匹配	52
5.2.3 測試區二面特徵匹配	55
5.2.4 測試區二線特徵匹配	57
5.2.5 測試區二成果比較	61
5.3 測試區三成果分析	62
5.3.1 測試區三初步套合	62
5.3.2 測試區三互訊息匹配	63
5.3.3 測試區三面特徵匹配	66
5.3.4 測試區三線特徵匹配	68
5.3.5 測試區三成果比較	72
5.4 測試區四成果分析	73
5.4.1 測試區四初步套合	73
5.4.2 測試區四互訊息匹配	74
5.4.3 測試區四面特徵匹配	77
5.4.4 測試區四線特徵匹配	79
5.4.5 測試區四成果比較	83
第六章 結論與建議	84
參考文獻	87



圖目錄

圖 1、面特徵編碼範例(Abbasi-Dezfouli and Freeman, 1994).....	3
圖 2、像點匹配示意圖(Hong and Schowengerdt, 2005).....	4
圖 3、面特徵屬性示意圖(Zhang et al., 2004).....	5
圖 4、shape context 演算法範例 (Huang and Li, 2010).....	7
圖 5、虛擬角點示意圖(Su et al., 2007)	8
圖 6、研究流程圖	20
圖 7、斜距投影	21
圖 8、原始雷達影像之灰度值(左)，經灰度值處理後(右).....	22
圖 9、控制點量測	24
圖 10、初步套合成果	24
圖 11、分水嶺分割法	26
圖 12、非最大壓縮示意圖	28
圖 13、線特徵匹配以單一像元為例	28
圖 14、線特徵匹配	29
圖 15、影像金字塔	29
圖 16、成立聯合直方圖	30
圖 17、互訊息匹配之單窗移動示意圖	31
圖 18、互訊息資訊量矩陣圖	32
圖 19、測試區一及測試區二分布位置	36
圖 20、測試區一光學影像(左)及雷達影像(右).....	37
圖 21、測試區二光學影像(左)及雷達影像(右).....	37
圖 22、測試區三及測試區四分布位置	38
圖 23、測試區三光學影像(左)及雷達影像(右).....	39

圖 24、測試區四光學影像(左)及雷達影像(右).....	39
圖 25、測試區一檢核點分布圖	40
圖 26、測試區一初步套合之棋盤影像	41
圖 27、測試區一互訊息資訊量矩陣圖	42
圖 28、測試區一互訊息匹配之棋盤影像	43
圖 29、測試區一互訊息匹配之檢核點分布圖	43
圖 30、測試區一面特徵匹配共軛點分布圖	44
圖 31、測試區一面特徵匹配之棋盤影像	45
圖 32、測試區一面特徵匹配之檢核點分布圖	46
圖 33、測試區一線特徵匹配共軛點分布圖	47
圖 34、測試區一線特徵匹配之棋盤影像	49
圖 35、測試區一線特徵匹配之檢核點分布	49
圖 36、測試區二檢核點分布圖	51
圖 37、測試區二初步套合之棋盤影像	52
圖 38、測試區二互訊息資訊量矩陣圖	53
圖 39、測試區二互訊息匹配之棋盤影像	54
圖 40、測試區二互訊息匹配之檢核點分布圖	54
圖 41、測試區二面特徵匹配共軛點分布圖	55
圖 42、測試區二面特徵匹配之棋盤影像	56
圖 43、測試區二面特徵匹配之檢核點分布圖	57
圖 44、測試區二線特徵匹配共軛點分布圖	58
圖 45、測試區二線特徵匹配之棋盤影像	60
圖 46、測試區二線特徵匹配之檢核點分布圖	60
圖 47、測試區三檢核點分布圖	62
圖 48、測試區三初步套合成果之棋盤影像	63

圖 49、測試區三五訊息資訊量矩陣圖	64
圖 50、測試區三五訊息匹配之棋盤影像	65
圖 51、測試區三五訊息匹配之檢核點分布圖	65
圖 52、測試區三面特徵匹配共軛點分布圖	66
圖 53、測試區三面特徵匹配之棋盤影像	67
圖 54、測試區三面特徵匹配之檢核點分布圖	68
圖 55、測試區三線特徵匹配共軛點分布圖	69
圖 56、測試區三線特徵匹配之棋盤影像	71
圖 57、測試區三線特徵匹配之檢核點分布圖	71
圖 58、測試區四檢核點分布圖	73
圖 59、測試區四初步套合之棋盤影像	74
圖 60、測試區四互訊息資訊量矩陣圖	75
圖 61、測試區四互訊息匹配之棋盤影像	76
圖 62、測試區四互訊息匹配之檢核點分布圖	76
圖 63、測試區四面特徵匹配共軛點分布圖	77
圖 64、測試區四面特徵匹配之棋盤影像	78
圖 65、測試區四面特徵匹配之檢核點分布圖	79
圖 66、測試區四線特徵匹配共軛點分布圖	80
圖 67、測試區四線特徵匹配之棋盤影像	82
圖 68、測試區四線特徵匹配之檢核點分布圖	82

表目錄

表 1、特徵匹配之文獻回顧總表	11
表 2、區域匹配之文獻回顧總表	14
表 3、ALOS 衛星規格	16
表 4、PALSAR 感測器規格	17
表 5、AVNIR-2 感測器規格	18
表 6、PRISM 感測器規格	19
表 7、研究資料一	34
表 8、研究資料二	35
表 9、測試區總表	35
表 10、測試區一初步套合成果	41
表 11、測試區一互訊息匹配成果	42
表 12、測試區一面特徵匹配成果	45
表 13、測試區一線特徵匹配成果(RMSE).....	48
表 14、測試區一線特徵匹配成果(Average)	48
表 15、測試區一成果比較	50
表 16、測試區二初步套合成果	52
表 17、測試區二互訊息匹配成果	53
表 18、測試區二面特徵匹配成果	56
表 19、測試區二線特徵匹配成果(RMSE).....	59
表 20、測試區二線特徵匹配成果(Average)	59
表 21、測試區二成果比較	61
表 22、測試區三初步套合成果	62
表 23、測試區三互訊息匹配成果	64

表 24、測試區三面特徵匹配成果	67
表 25、測試區三線特徵匹配成果(RMSE).....	70
表 26、測試區三線特徵匹配成果(Average)	70
表 27、測試區三成果比較	72
表 28、測試區四初步套合成果	74
表 29、測試區四互訊息匹配成果	75
表 30、測試區四面特徵匹配成果	78
表 31、測試區四線特徵匹配成果(RMSE).....	81
表 32、測試區四線特徵匹配成果(Average)	81
表 33、測試區四成果比較	83



第一章 前言

1.1 研究動機與目的

遙感探測 (Remote Sensing) 簡稱遙測,是以非接觸的方式對物體進行觀測的技術。遙測所使用的感測器,依成像原理的不同,可以分成被動式 (Passive) 和主動式 (Active) 感測器。被動式感測器主要接收由物體所反射出的能量,例如:可見光、紅外光等波長的能量,這些能量的來源大多是太陽光,因此被動式感測器容易受到天候的影響,如雲霧及晝夜影響,常見的被動式資料為光學影像。主動式感測器則是由感測器主動提供能量,接收反射回來的電磁波,通常使用波長較長的波段,例如 X-band、C-band 等,因此可以穿透雲霧不受氣候及日夜影響,常見的主動式感測器有雷達 (Radio Detection and Ranging, Radar)。比較被動式和主動式這兩類的感測器,就影像判圖而言,光學影像的辨識能力較雷達影像佳;從資料獲取的能力而言,雷達影像的限制較光學影像少。

這兩種類型的感測器有不同的資料獲取方式,因此兩種影像的幾何及輻射方面也有相當程度的差異。成像幾何特性方面,光學影像以透視投影或半透視投方式成像,遠離像底點的區域受地形效應的影響,會有向外傾倒的現象。雷達影像則是以距離投影的方式成像,以同一條掃描線而言,與感測器距離相同的點在影像上會成像在同一點。輻射特性方面,光學影像所接收的是來自物體的反射光,由於物體本身的顏色和材質而有不同的反射光,例如紅色的物體會反射出較大量的紅光、植物行光合作用時會吸收部分紅光而反射出較多的紅外光。雷達影像所接收的則是物體反射的電磁波,而電磁波的反射強度取決於物體的材質和反射的角度等,例如:平坦的人造建物的反射強度較大、植被的反射強度較小。由於兩種資料有不同的特性,如果要融合這兩種資料,必需要進行幾何和輻射校正才能夠結合兩種影像進行後續應用。

幾何校正可以分成二維對二維的影像套合 (Image Registration) 及二維對三維的影像正射化 (Orthorectification)。影像套合是利用兩張影像上的套合點計算出兩張影像的轉換關係,並將待校正影像轉換到參考影像相同的坐標系統,而套合點的獲取可以藉由

人工手動量測或影像匹配而得。影像正射化則是嚴密的幾何改正模式，它將二維的影像套合至三維的地形上，其作法為輸入一張影像及該影像所對應的數值地形模型 (Digital Terrain Model, DTM)，利用影像上像點所對應的物空間坐標將該像點的灰度值填入 DTM 上對應的物空間坐標，以消除幾何變形。經過幾何校正後影像，可以和其他具有坐標的空間資料套合，並可以應用於災害監控、地物分類、影像融合和變遷偵測。

1.2 文獻回顧

關於影像匹配的文獻非常豐富 (劉邦偉, 2003)，異質資料的匹配受限於資料來源不同，採用的匹配策略通常以線特徵和面特徵為主。合成孔徑雷達 (Synthetic Aperture Radar SAR) 影像和光學影像的套合主要可分為兩個步驟：初始套合和精密套合 (Dare and Dowman, 2001)。初始套合多以人工量取少量的共軛點達成，精密套合則是以初始套合為基礎，在精密套合的步驟中則以面特徵 (Zhang et al., 2004) 和線特徵 (Hong and Schowengerdt, 2005) 匹配為主，此外，異質影像的區域匹配也可使用 Mutual Information (Suri, 2008) 進行匹配。本章節之文獻回顧將以特徵匹配 (Feature-based) 和區域匹配 (Area-based) 進行探討。

1.2.1 特徵匹配

Dowman et al. (1996) 利用多邊形特徵進行影像和地圖的自動化套合。以手動量測少量的共軛點或以面特徵匹配進行初始套合，其中面特徵的匹配是利用 Abbasi-Dezfouli and Freeman(1994)所提出的面特徵萃取及面特徵的描述方法進行特徵萃取及後續的匹配作業。面特徵萃取的方法是利用 3×3 移動罩窗進行差異性分析，並設定罩窗內灰度值差異的門檻，若罩窗內為均調區則將區塊合併。萃取出面特徵後，利用編碼的方式描述面特徵的形狀，如圖 1 所示。藉由編碼的特性計算出面特徵的面積、周長、最大包圍矩形的長寬、面特徵的線性 (Linearity of the Patch) 和凹度 (Concavity of the Patch) 後，進行面特徵的匹配。最後將面特徵的邊緣線投影至地圖上，計算邊緣線和地圖上的邊界線兩者之間的梯度值，則能夠得到匹配的共軛點。都市區的實驗資料採用衛星 SAR 影

像和一萬分之一的網格式地圖，在面特徵的匹配中產生了 923 個共軛點，RMSE (root mean square error) 值為 2 個像元，像元大小為 2.5 公尺。

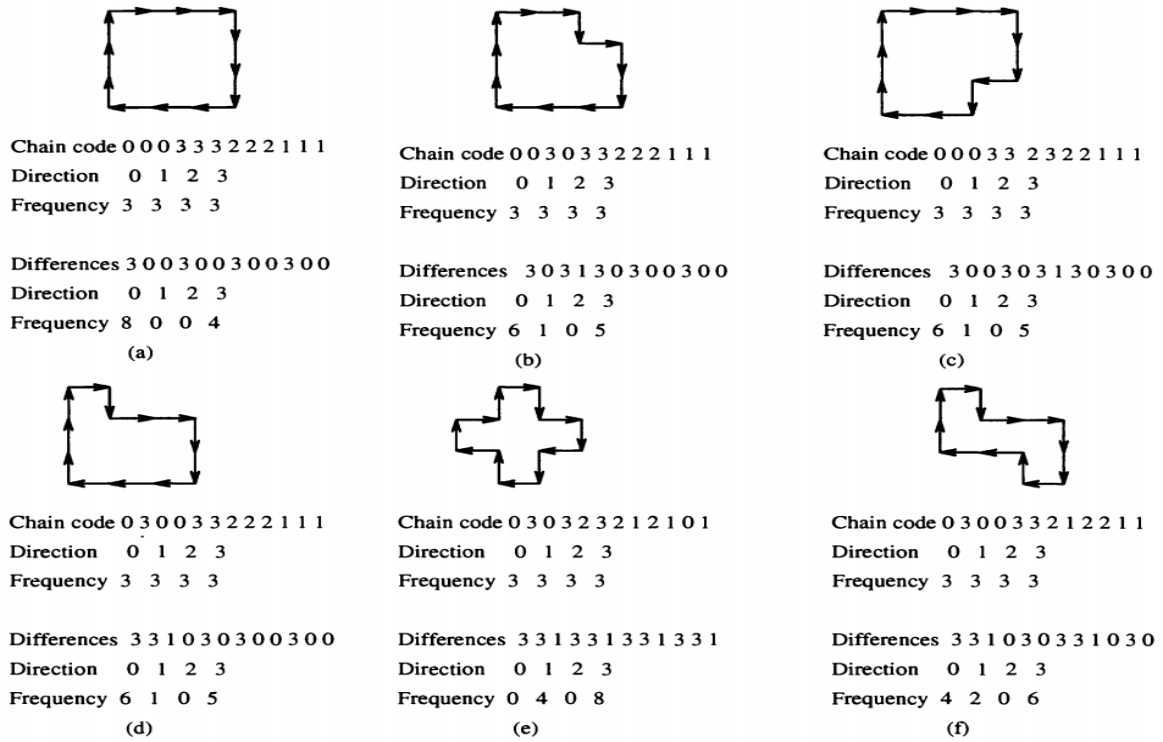


圖 1、面特徵編碼範例(Abbasi-Dezfouli and Freeman, 1994)

Dare and Dowman (2001) 提出了一套自動化 SPOT 影像和 SAR 影像套合的模型，利用人工量測 3 個套合點進行初始套合，再利用面特徵的匹配進一步改善初始套合的成果，最後以線特徵更進一步改善套合成果。面特徵萃取採用了多種的演算法，以「brute force」的方式自動找出最佳的參數設定以減少人工的介入，並能夠得到最佳的特徵萃取成果。面特徵匹配則以面特徵的周長、面積和最小包圍矩形的長寬等屬性組成的 cost function 進行匹配，得到套合特徵面。最後以 Sobel operator 萃取出套合特徵面周圍的線特徵，利用線特徵上的像元進行匹配。該研究所使用的資料為 ERS-1 的 SAR 影像解析度為 25 公尺和 SPOT PAN Level-1A 的光學影像解析度為 10 公尺，並以 SPOT 影像為副影像，擷取小塊區域 (512 pixels × 512 pixels) 作為測試。成果分析分成面特徵匹配、線特徵匹配和完整影像匹配分別進行探討。面特徵匹配的成果中，採用多演算法及自動化參數設定相較於單一演算法及手動參數設定能夠萃取出更多面特徵。線特徵的成果中，

兩個測試區得到的匹配點數和邊緣線點數的比例都能達到大約 24%，以匹配點的一半作為檢核，RMSE 值均約為 1.5 pixels。在文章的最後，作者探討了有關 along-track 和 cross-track 上 RMSE 值的差異，SAR 影像的地形效應會造成 cross-track 上的誤差較大。

Hong and Schowengerdt (2005) 以線特徵為基礎進行光學及 SAR 衛星影像的影像套合，主要的套合流程為人工初始套合、邊緣線萃取、邊緣線篩選、套合點偵測、套合點過濾和影像重新取樣。人工的初始套合是手動量測四對控制點以多項式轉換，套合精度約為 15 pixels。再利用 Canny operator 萃取出邊緣線，並濾除長度太短或只佔據小塊區域的線段，這個步驟有助於濾除由雜訊所萃取出來的邊緣線。利用邊緣線上的像點，以像點間的距離和角度構成的 cost function 判斷是否為共軛點，其中角度和距離的係數是由初始套合的殘差所決定。如圖 2 為點到邊緣線距離的示意圖。

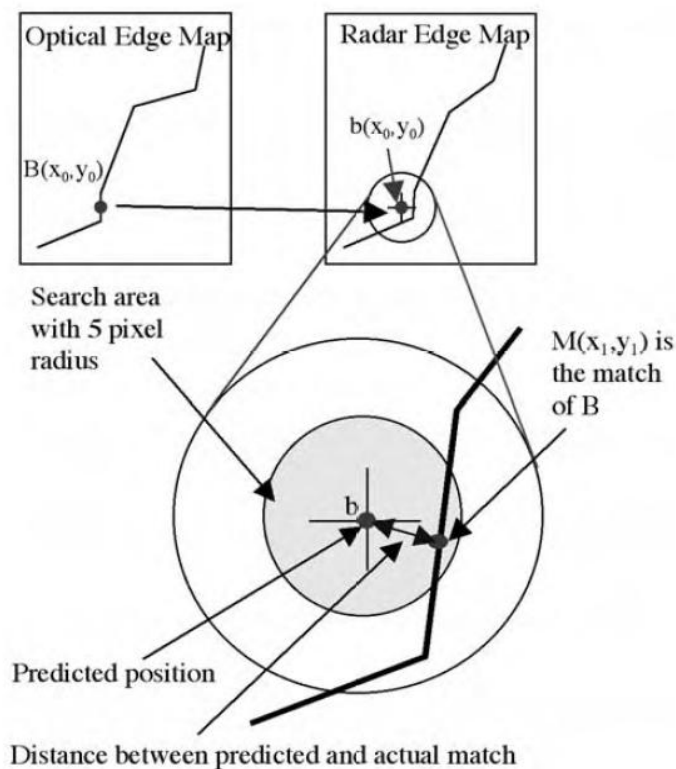


圖 2、像點匹配示意圖(Hong and Schowengerdt, 2005)

匹配得到的控制點均加入轉換參數的計算，再刪除轉換後差異較大的控制點對，並重新計算轉換參數，迭代計算至所有點對在轉換之後均小於一定的門檻值。使用的光學影像為 Landsat-5 TM 影像解析度，為 28.5 公尺；SAR 影像為 ERS-2 SAR 影像，解析度為 12.5

公尺，以 SAR 影像為參考影像。該研究的研究成果以切割後的影像作測試，共分成六個測試資料，其中套合後的平均誤差最小為 0.58 個像元，最大為 3.02 個像元。

Zhang et al. (2004) 使用多來源 (multi-source) 衛星影像進行自動化的概略套合，主要目的是以自動化的套合流程達到優於手動量測的精度等級。整個套合流程共分成兩大步驟，第一步驟是以面特徵的形狀及方位進行匹配，第二步驟則是利用第一步驟所得到的轉換成果將無法匹配成功的面特徵再次匹配。首先，萃取出線特徵並將線特徵分成封閉和非封閉兩大類，將封閉的線特徵作為面特徵使用。計算出面特徵的重心 O_G ，並找到面特徵邊緣上距離重心最遠的點 M_G ，將 $\overline{O_G M_G}$ 以 O_G 為圓心旋轉至(0,-1)向量，如圖3所示，這個步驟也就是把所有面特徵距離其重心最長的邊緣點旋轉至同一方向，可以減少兩張影像之間相對旋轉造成的影響。

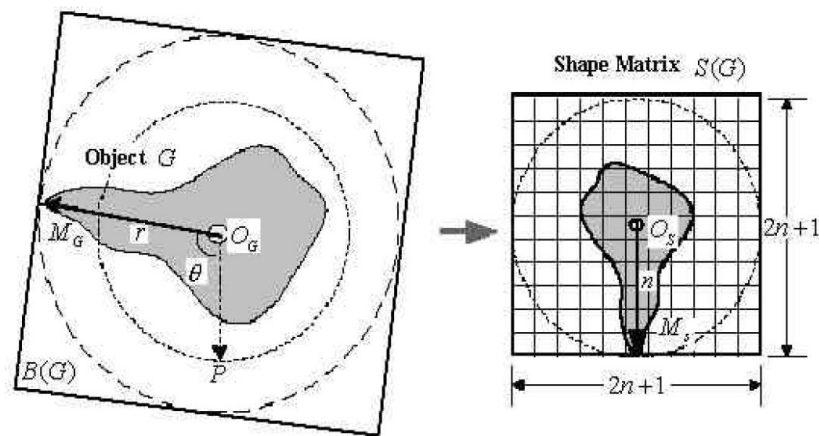


圖 3、面特徵屬性示意圖(Zhang et al., 2004)

計算面特徵形狀的差異和面特徵在方位上的差異，判斷兩個面特徵是否為共軛面特徵，最後以面特徵的重心計算轉換參數。第二步驟是利用第一步驟計算得到的轉換參數，將其中一張影像轉換重疊至另一張影像上，再透過最短距離的判斷將無法匹配成功的面特徵再次匹配，最後得到的匹配成果將能夠改善轉換模型。該研究所使用的資料有 ERS-1 的 SAR 影像和 SPOT-1 全色態的光學影像，解析度分別為 12.5 公尺和 10 公尺，並以 SAR 影像為參考影像。經過特徵萃取的演算，兩張影像獲取了十個面特徵，進行第一步驟的匹配後得到六對匹配成功的面特徵，第二步驟的匹配後有的面特徵都匹配成功。以人工

點選 24 對共軛點對評估套合精度，在 X 方向上的 RMSE 值為 5.91 像元，Y 方向為 3.58 像元，總 RMSE 值為 6.91 像元。

Yang et al. (2005) 提出利用多種特徵進行光學影像和 SAR 影像套合的方法，主要以面和線為匹配的特徵。首先，利用 Watershed Segmentation 萃取出面特徵，其作法是先從面特徵上設定起始邊緣線，再使用灰度值梯度結合紋理梯度進行影像分割。灰度值梯度採用 ratio of averages (ROA) 邊緣偵測，紋理梯度採用 differential box-counting (DBC) 的方法計算。DBC 是將影像分割成 $N \times N$ 矩陣，再將灰度值分成 L 層，判斷每個網格內灰度值最大值和最小值所在的灰度值層級並計算其灰度值層級的差值，最後可以計算出整張影像的碎形維度即為紋理梯度。結合兩種梯度將起始邊緣線向外擴張即可得到面特徵的邊緣線。以不變矩的概念對所有萃取出來的面特徵進行匹配，接著利用 Hough transform 和最小二乘擬合法偵測面特徵邊緣上較長的線段，並計算邊緣線的交點作為共軛點。以一部份的共軛點作為控制點計算六參數轉換參數，另一部份的共軛點則作為檢核點。使用的 SAR 影像為空載 SAR 影像，光學影像為 Quickbird 衛星影像，並以 SAR 影像為參考影像。面特徵的套合成果共獲得 8 個共軛點其中 6 個作為控制點，2 個為檢核點，控制點 RMSE 值為 1.24 個像元，檢核點 RMSE 值為 2.77 個像元。線特徵的套合成果共獲得 54 個共軛點其中 36 個作為控制點，18 個為檢核點，控制點 RMSE 值為 0.99 個像元，檢核點 RMSE 值為 1.32 個像元。

Jia et al. (2009) 利用多種特徵進行 SAR 影像和光學影像的套合，首先以面特徵作初始套合，再以線特徵作精密套合。在面特徵萃取之前，作者提到關於 SAR 影像中斑駁雜訊的影響，使得面特徵萃取效果較差。因此，文章中提供比較均值濾波、中值濾波、local filter 和 lee-sigma filter，這四種濾波器對於平滑 SAR 影像雜訊的效果，實驗成果顯示 lee-sigma filter 的效果最好。面特徵萃取採用 mean shift segmentation 演算法，將影像重新取樣為解析度較差的影像後再進行面特徵萃取。由於太大或太小的面特徵極有可能不是地面上真實存在的特徵，所以必須刪除。面特徵的匹配採用的方法是常用的 cost function，其原理為判斷面特徵之間的面積、周長、最小包圍矩形的長和寬是否相近。

精密匹配利用線特徵和線特徵的角點進行，採用的線特徵萃取方法為 Canny 邊緣線偵測，再利用兩張影像縱方向和橫方向的梯度計算角點特徵。以一張影像上的點特徵在線特徵上設定一目標視窗，並透過面特徵匹配所建立的初始轉換關係在另一張影像上搜尋。利用目標視窗上的線特徵分布比對搜尋視窗中線特徵分布，若兩者非常相似甚至相同則判斷兩點為共軛點。以面特徵作初步套合的成果約為 10 個像元，經過精密套合後約有 2177 對共軛點，取其中 150 對匹配成度最高的共軛點作為控制點。

Huang and Li (2010) 利用 shape context 的方法進行影像套合，shape context 是由手寫和物體辨識所發展的方法，文章中加入了影像的改正使 shape context 能夠適用於遙測影像的匹配。Shape context 是利用特徵點鄰近點的分布，從角度及距離兩種參數判斷兩張影像上的特徵點是否為共軛點，圖 4 為 shape context 演算法範例。

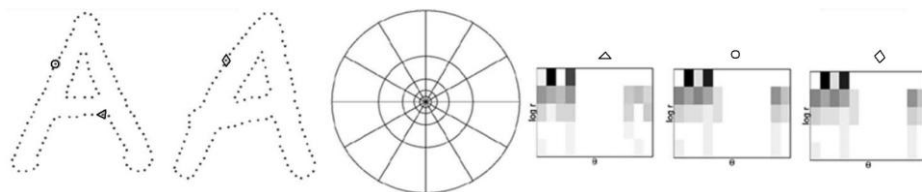


圖 4、shape context 演算法範例 (Huang and Li, 2010)

因此，影像的旋轉很可能造成角度判斷上的錯誤，作者以飛行載具上搭載的定位系統針對兩張影像的相對旋轉作初步改正，以利於後續的匹配。首先以 Harris operator 及 Canny operator 分別萃取出兩張影像的點特徵及線特徵，再由點特徵設定一個 $N \times N$ 的目標視窗，透過 shape context 匹配得到共軛點。利用匹配最好的三個共軛點對計算六參數轉換參數，並藉由這個轉換關係濾除差異較大的點對。最後以 Thin-Plate Splines (TPS) 進行影像校正。文章中總共作了兩個測試，包括空載光學影像與 SAR 影像的套合和空載多波段 SAR 影像的套合，兩種影像的解析度均為 0.5 公尺。在光學影像與 SAR 影像的套合成果中，X 方向的 RMSE 值為 1.88 個像元，Y 方向的 RMSE 值為 1.75 個像元；C 波段與 L 波段 SAR 影像的套合成果中，X 方向的 RMSE 值為 1.14 個像元，Y 方向的 RSME 值為 0.96 個像元。

Su et al. (2009) 利用邊緣線特徵或其延長線構成的角點和虛擬角點進行光學影像和

SAR 影像的影像套合。主要以線特徵匹配為基礎，以特徵線的角點作為計算轉換參數所需要的控制點使用，文章中所提到的研究方法同樣分成初步套合和精密套合兩部分。初步套合採用四參數轉換模型，包括一個旋轉、一個尺度和兩個平移參數。旋轉參數的估計是利用由兩張影像上邊緣線特徵的斜率分布直方圖，計算兩直方圖的互相關係數，其峰值所對應的角度即為估計的旋轉角。尺度參數的估計是參考兩張影像的地面解析度，若兩張影像的地面解析度相同則尺度參數為 1。平移參數的估計是將兩張影像經過旋轉及尺度的調整後，萃取出兩張影像的邊緣線特徵再計算兩張邊緣線特徵圖的互相關性，其峰值所對應的 x 軸及 y 軸坐標即為兩張影像的平移參數。估計平移參數的方法容易受到 SAR 影像中的斑駁雜訊影響，導致邊緣線特徵萃取的效果不好。以人工量測若干個檢核點進行檢核，初步套合的精度約為 21.5 個像元。精密套合採用的是線特徵匹配，利用前一步驟所萃取的線特徵，經過初步套合後兩張影像的線特徵在旋轉及平移方面已經有一定程度的相似性。線特徵的匹配策略是以線特徵的兩端點坐標在另一張影像上搜尋斜率相近的線段進行匹配，將目標線段投影至匹配線段上計算其重疊長度，再計算兩線段的垂直距離，代入匹配函數計算兩條線段的匹配程度。匹配函數中的兩個主要變數為兩線段的重疊長度及兩線段的垂直距離，以兩線段的垂直距離為權。初步套合的精度大約為 30 個像元，因此兩線段的垂直距離若超過 30 個像元則不進行匹配，可以縮小匹配的範圍。得到匹配的共軛線段後，以線段的交點或線段延長線的虛擬交點計算二階多項式轉換模型的參數，圖 5 為虛擬角點示意圖。

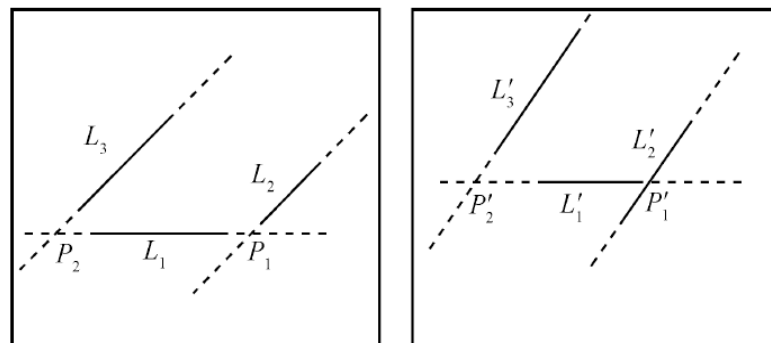


圖 5、虛擬角點示意圖(Su et al., 2007)

由於部分控制點的誤差較大，會影像到整體的轉換模型，因此利用迭代剔除誤差較大的

點，直到有控制點在轉換後均在誤差容許範圍內。影像套合成果的 RMSE 值均在一個像元內。

Zhang and Chen (2009) 利用圖形的不變矩對 SAR 影像及光學影像進行套合，研究流程分成特徵萃取、特徵匹配和影像套合三大部分。特徵萃取是利用 Canny operator 在兩張影像上萃取出線特徵，再將較短的線段濾除只保留長線段，並計算線段之間的餘弦一致性判斷是否為連續線段，最後利用延長線段的虛擬交點組成三角形結構進行匹配。特徵匹配是利用上一步驟所得到的三角形結構進行匹配，並以七個不變矩和形狀屬性描述每一個三角形結構。不變矩的概念是由 Hu 於 1962 年發表，他提出連續函數矩的定義並推導出其具有平移不變性、旋轉不變性及比例不變性共七個特性。三角形的形狀屬性是利用三角形的內角在平移、旋轉及尺度變化上具有不變性與三角形的三邊在平移及旋轉變化上具有不變性。透過比較兩個三角形七個不變矩的差異、三角形三個內角的差異及三角形三邊長的差異，找到匹配度最高的兩個三角形，並計算出形心作為控制點使用。影像套合採用四參數轉換模型，利用迭代剔除誤差太大的點，直到所有控制點均在誤差範圍內。研究所使用的光學影像解析度為 6.5 公尺，SAR 影像解析度為 5 公尺，並以 SAR 影像為參考影像。匹配成果總共得到 31 個共軛點對，將其中的 21 個做為控制點使用，10 個作為檢核點，控制點的 RMSE 值約為 1.47 個像元，檢核點的 RMSE 值約為 2.03 個像元。

Bentoutou et al. (2007) 以特徵匹配進行 SAR 影像的影像套合，研究流程為特徵點萃取、特徵匹配及影像套合。特徵點萃取是利用影像灰度值的梯度並以平均梯度為門檻在梯度影像上找出面特徵，再利用 Harris operator 找出特徵點。Harris operator 改良了 Moravec operator 的缺點，可以偵測出更多方向的特徵點，且比較不容易受到雜訊的影響，對於邊界線的敏感度較低。Harris operator 主要原理是計算影像的橫向梯度及縱向梯度，在經過特殊的運算後可得到每個像元的 R 值，濾除小於門檻值的 R 值即可得到特徵點。特徵點匹配採用了不變矩的概念，以每個特徵點為圓心並設定一半徑組成圓形模板，再利用不變矩的特性進行匹，最後採用 TPS 進行影像的內插套合，TPS 是一種靈

活的轉換模型可以克服旋轉、平移、尺度及歪斜等影像變形。該研究測試了 SAR 影像的影像套合，在四組測試資料中，分別與人工選取控制點的套合方法比較。人工套合的 RMSE 值約為 1.5 個像元，文章所提供的方法得到的 RMSE 值約為 0.14 個像元。

以特徵為基礎的異質影像套合，常以面特徵及線特徵進行匹配。面特徵的萃取方法包括 watershed segmentation、mean shift segmentation 或是先萃取出線特徵再由封閉的線特徵作為面特徵，而線特徵的萃取方法常見的有 Canny operator 及 Sobel operator。面特徵的匹配通常利用面特徵的各種幾何特性進行，例如：形心、周長、面積、最小包圍矩形等，線特徵的匹配則是以線特徵的斜率及線特徵的距離作匹配。計算轉換參數所需要的控制點，可以由面特徵的形心作為控制點使用，線特徵則可以採用虛擬角點或是線特徵上的點作為控制點，轉換模型則有四參數、六參數、多項式、TPS...等。影像套合的方法非常多，使用的特徵不同、匹配的策略不同、能夠使用的轉換模型也非常多，每一種方法都有其優缺點，處理不同的資料也會有所差異。表 1 比較以特徵為基礎的異質影像套合方法。



表 1、特徵匹配之文獻回顧總表

	Dowman, 1996	Dare, 2001	Zhang, 2004	Hong, 2005	Yang, 2005	Bentoutou, 2007	Jia, 2009	Su, 2009	Zhang, 2009	Huang, 2010
initial registration	manual	manual	-	manual	patch matching	-	region matching	edge analysis	-	-
feature detection	feature-based (patch)	feature-based (patch, edge)	feature-based (patch)	feature-based (edge)	feature-based (edge)	feature-based (point)	feature-based (edge corner)	feature-based (edge corner)	feature-based	feature-based
feature matching	cost function (with chain code)	cost function, pixel by pixel	cost function (PCA)	pixels by pixels	moment invariants	moment invariants	8 neighbor constraint method	distance	invariant moment	shape context(CF)
transform model	affine	affine	global affine	-	affine	affine	polynomial model	polynomial	rigid mapping model	affine
image resample	-	-	-	Cubic re-sampling	-	thin-plate spline	-	-	-	thin-plate spline
data	1:10000MAP, airborne SAR	ERS-1 SAR, SPOT PAN	SPOY-P, ERS SAR	Landsat-5, ERS2 SAR	Quickbird, airborne x-band SAR	SAR	AeS-1 airborne SAR image, EuroSDR	SAR, Optical	SAR, Optical	airborne optical and SAR
result	RMSE : 2 pixels	RMSE : 1.5pixels (subimage) 10.8 pixels (full scene)	RMSE : 6.91 pixels	Average error : 2.02 pixels	RMSE : 1.32 pixels	RMSE : 0.14 pixels	primitive : 10 pixels	RMSE : 0.81 pixels	RMSE : 2.03 pixels	RMSE : 2.57 pixels

1.2.2 區域匹配

區域匹配法的影像套合最常用的方法為正規化互相關係數法 (Normalized Cross Correlation, NCC)，在 SAR 影像和光學影像的套合中，由於兩者輻射差異造成 NCC 法的匹配成果不佳。互訊息資訊量匹配 (Mutual Information, MI) 是利用建立兩張影像的聯合直方圖，並經過熵 (entropy) 計算得到兩張影像的互訊息資訊量，當互訊息資訊量愈接近 1 則兩張影像愈相似，愈接近 0 則兩張影像愈不相似。

Chen et al. (2003) 利用 MI 匹配進行 SAR 影像與光學影像的影像套合，並探討不同的內插方法對影像重新取樣的差異。該研究比較最鄰近法、線性、立方迴旋和混合型等四種內插方法。實驗成果顯示最鄰近內插法能夠得到較佳的成果，相較於混合型內插法雖然成果均略優於最鄰近法，考量計算效率最鄰近法則較符合實際應用。研究所使用的資料有 Landsat Thematic Mapper (TM) 影像、India Remote Sensing Satellite (IRS) 的全色態影像及 ERS SAR 影像。實驗中分別進行同質及異質影像匹配，異質影像匹配利用 IRS 影像及 SAR 影像，Landsat TM 及 IRS 影像則進行同質影像的套合研究。

Li et al. (2007) 利用 MI 法對多尺度的光學影像及 SAR 影像進行影像套合。採用 Simoncelli filter 製作兩種影像的影像金字塔，Simoncelli filter 對於平移、旋轉及雜訊的影響較為強鈍。使用的影像資料為 ASTER VNIR 光學影像，其影像等級為 L1B，空間解析度為 15 公尺，並以此影像作為參考影像；JERS-1 SAR 影像，影像等級為 L2.1，空間解析度為 18 公尺。以人工量測五對檢核點作為精度評估的依據，人工套合的 RMSE 值約為 5 個像元，該研究的套合成果 RMSE 值為 3 個像元。

Suri (2008) 利用 MI 匹配對高解析度光學及 SAR 衛星影像的影像套合。文章主要探討都市區的影像套合，以面特徵搭配 NCC 進行初步套合再以 MI 匹配進行精密套合。面特徵萃取方法是利用 region growing 的方式，首先設定數個種子點作為起始點，由種子點向外擴張後得到面特徵，再以面特徵影像的二值化影像進行 NCC 匹配。使用的影像資料有 TerraSAR-X 的 SAR 影像，地面解析度為 1 公尺，影像為 Geocoded Ellipsoid Corrected (GEC) 產品等級；災害前後 Ikonos 的全色態影像，地面解析度為 1 公尺，影

像等級為 Standard Image。實驗成果分別從 NCC 匹配和多尺度的 MI 匹配進行探討，精度評估的方式是利用災害前後影像中特殊的不變點，比較兩種方法所匹配的位置與該點在橫方向及縱方向的 registration differences (RD)。成果顯示 NCC 匹配的 RD 為(2, 4)，多尺度 MI 法的 RD 為(1,2)。

Li et al. (2010) 利用多尺度的濾波器和 MI 匹配套合光學影像及 SAR 影像，與同作者在 2007 年所發表的文章所採用的套合方法相同。同樣是以多尺度的 Simoncelli 濾波器將多尺度的影像組成影像金字塔，再由影像金字塔中解析度較差的影像開始匹配。使用的影像資料為 ASTER L1B Band 1 解析度為 15 公尺和 PALSAR fine mode，並以 PALSAR 影像為參考影像。利用人工量測 5 到 10 對共軛點作為檢核點使用，採用文章所提出的方法套合成果的 RMSE 值可以達到 1 至 3 個像元，人工套合成果的 RMSE 值則為 5 至 7 個像元。

Suri and Reinartz (2010) 同樣是以 MI 匹配套合高解析 SAR 影像及光學影像。研究方法是利用 MI 匹配並設定不同門檻值濾除 SAR 影像中灰度值太高或太低的像元，以減低運算量及去除雜訊影響。將影像平均分割為 $N \times N$ 個區塊分別以 MI 套合，由每個區塊的套合中心點計算影像局部套合參數。使用的影像資料有 Terra SAR-X 的 SAR 影像，影像解析度為 1 公尺，影像處理等級為 GEC 產品；Ikonos-2 的全色態影像，影像解析度為 1 公尺，影像處理等級為 Ikonos Geo。實驗成果顯示將灰度值門檻設為 30% 時，影像的像元數約剩下 51%，但卻包含約 93% 的熵，且能減少約一半的處理時間。局部套合參數的計算採用 RANSAC 濾除差異太大的點，兩組實驗資料的套合成果在 X 方向上的標準差分別為 1.02 和 2.57 個像元，在 Y 方向上為 1.05 和 0.96 個像元。

區域匹配的文獻中多半以 MI 法為主，由於 MI 匹配僅能夠計算出兩張影像的相對位移量，對於兩張影像的相對旋轉量則須利用其他方式克服，所以在以上的文獻回顧中所採用的影像資料大多為經過幾何校正的光學影像及 SAR 影像。表 2 比較區域匹配之異質影像套合方法。

表 2、區域匹配之文獻回顧總表

	Chen, 2003	Li, 2007	Suri, 2008	Suri, 2010
initial registration	-	-	region matching	-
feature detection	area-based	area-based	area-based	area-based
feature matching	Mutual information	Mutual information	Mutual information	Mutual information
image resample	partial volume interpolation	-	-	-
data	Landsat-TM, SAR	ASTER, JERS-1 SAR	Ikonos stanford product, TerraSAR-X GEC product	Ikonos-2 Geo product, TerraSAR-X GEC product
result	Registration consistency : 0.36m	RMSE : 3 pixels	-	Standard Deviation : 1.97 pixels

1.3 研究目的與方法

本研究之目的為進行雷達及光學異質影像之影像套合，測試資料為 ALOS(Advanced Land Observing Satellite)衛星的雷達及光學感測器。為探討各類匹配方法之優劣，研究中分別比較三種不同的匹配方法，包含線特徵匹配、面特徵匹配及 MI 匹配。此外，選取不同地物類別區試進行實驗分析，包含都市區、港口、及山區。最後，比較使用不同產品等級影像進行套合的精度，包含原始影像與原始影像、正射影像與系統改正。

本研究的貢獻主要在於探討三種不同的匹配方法對於不同影像等級的測試影像進行半自動套合。探討有互訊息匹配、面特徵匹配及線特徵匹配，三種匹配方法對於不同影像等級的套合成果，並針對不同測試區的地形探討匹配方法的成果。線特徵匹配流程對於兩種影像等級的測試區均能有穩定且較佳的套合精度，若套合所使用的影像等級較好，則採用互訊息匹配即可得到不錯的套合精度。

1.4 論文架構



第一章：回顧前人研究與說明本研究的動機、目的、研究方法及研究流程。

第二章：介紹 ALOS 衛星及其所搭載的 PALSAR 和 AVNIR-2 感測器。

第三章：異質影像的影像套合，分別介紹本研究所使用的三種匹配方法：面特徵匹配、線特徵匹配及區域匹配的 MI 法。

第四章：研究所使用的影像資料介紹及測試區影像。

第五章：實驗成果之結論及建議。

第二章 衛星與感測器介紹

2.1 ALOS 衛星簡介

ALOS 衛星是由日本宇宙航空研究開發機構 (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) 所發射的對地觀測衛星。日本地球觀測衛星的計畫中包含了以大氣和海洋觀為主的測衛星以及以土地觀測為主的衛星兩系列，其中 ALOS 為後者，主要應用為製圖、區域觀測、災害監測和資源調查。ALOS 於 2006 年 1 月 24 日發射成功，為一太陽同步衛星，其平均軌道高度為 691.56 公里，軌道與赤道傾角為 98.16 度，軌道周期為 46 天，於衛星上共酬載了 PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) 、AVNIR-2 (Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2) 及 PRISM (Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping) 三個遙測儀器。表 3 為 ALOS 衛星相關之參數。

表 3、ALOS 衛星規格

Launch Date	Jan. 24, 2006
Launch Vehicle	H-IIA
Launch Site	Tanegashima Space Center
Spacecraft Mass	Approx. 4 tons
Generated Power	Approx. 7 kW (at End of Life)
Design Life	3 -5 years
Orbit	Sun-Synchronous Sub-Recurrent
	Repeat Cycle: 46 days
	Sub Cycle: 2 days
	Altitude: 691.65 km (at Equator)
	Inclination: 98.16 deg.
Attitude Determination Accuracy	2.0×10^{-4} degree (with GCP)
Position Determination Accuracy	1m (off-line)
Data Rate	240Mbps (via Data Relay Technology Satellite)
	120Mbps (Direct Transmission)
Onboard Data Recorder	Solid-state data recorder (90Gbytes)

2.1.1 PALSAR 感測器介紹

PALSAR 是一種主動式的感測器，利用 L 波段的微波進行觀測，可以全天候觀測不受雲霧及晝夜影響。相較於 JERS-1，PALSAR 擁有更先進的系統提供多觀測角、多偏極和全偏極等，拍攝模式可分為 Fine mode、ScanSAR mode 及 Polarimetric mode。Fine mode 又可分為高解析單偏極和雙偏極方式，其空間解析度分別為 7 至 44 公尺與 14 至 88 公尺，跨幅為 40 至 70 公里。ScanSAR mode 提供大範圍觀測需求，其空間解析度為 100 公尺，跨幅為 250 至 350 公里。Polarimetric mode 屬於實驗性質，可提供全偏極資料，5 種觀測角度方式，其空間解析度為 24 至 89 公尺，跨幅為 20 至 65 公里。表 4 整理 PALSAR 感測器的相關參數。

表 4、PALSAR 感測器規格

Mode	Fine		ScanSAR	Polarimetric (Experimental mode)
Center Frequency	1270 MHz(L-band)			
Chirp Bandwidth	28MHz	14MHz	14MHz,28MHz	14MHz
Polarization	HH or VV	HH+HV or VV+VH	HH or VV	HH+HV+VH+VV
Incident angle	8 to 60deg.	8 to 60deg.	18 to 43deg.	8 to 30deg.
Range Resolution	7 to 44m	14 to 88m	100m (multi look)	24 to 89m
Observation Swath	40 to 70km	40 to 70km	250 to 350km	20 to 65km
Bit Length	5 bits	5 bits	5 bits	3 or 5bits
Data rate	240Mbps	240Mbps	120Mbps,240Mbps	240Mbps
NE sigma zero	< -23dB (Swath Width 70km) < -25dB (Swath Width 60km)		< -25dB	< -29dB
S/A	> 16dB (Swath Width 70km) > 21dB (Swath Width 60km)		> 21dB	> 19dB
Radiometric accuracy	scene: 1dB / orbit: 1.5 dB			

2.1.2 AVNIR-2 感測器介紹

AVNIR-2 是多光譜感測器，包含了四個波段：近紅外光、紅光、綠光及藍光波段。每一個波段皆有 7000 個感光耦合元件 (Charge Coupled Device, CCD)，在垂直拍攝時所對應的地面像幅寬度為 70 公里，空間解析度為 10 公尺，傾斜觀測角度範圍為±44 度。表 5 表列 AVNIR-2 感測器的相關參數。

表 5、AVNIR-2 感測器規格

Number of Bands	4
Wavelength	Band 1 : 0.42 to 0.50 micrometers Band 2 : 0.52 to 0.60 micrometers Band 3 : 0.61 to 0.69 micrometers Band 4 : 0.76 to 0.89 micrometers
Spatial Resolution	10m (at Nadir)
Swath Width	70km (at Nadir)
S/N	>200
MTF	Band 1 through 3 : >0.25 Band 4 : >0.20
Number of Detectors	7000/band
Pointing Angle	- 44 to + 44 degree
Bit Length	8 bits

2.1.3 PRISM 感測器介紹

PRISM 是全色態立體觀測感測器，具有三個不同方向的感測器分別是向前、向下及向後，因此可以拍攝同軌立體像對。三個感測器之間的夾角為 24 度使基線航高比為一，具有良好的交會幾何。向下觀測的感測器像幅為 70 公里，向前及向後則為 35 公里，向下觀測的空間解析度為 2.5 公尺。PRISM 共有九種不同的觀測模式，例如：三個方向同時拍攝、兩個方向拍攝及單一方向拍攝，供使用者選擇。表 6 為該感測器的詳細參數。

表 6、PRISM 感測器規格

Wavelength	0.52 to 0.77 micrometers
Number of Optics	3 (Nadir; Forward; Backward)
Base-to-Height ratio	1.0 (between Forward and Backward view)
Spatial Resolution	2.5m (at Nadir)
Swath Width	70km (Nadir only) / 35km (Triplet mode)
S/N	>70
MTF	>0.2
Number of Detectors	28000 / band (Swath Width 70km) 14000 / band (Swath Width 35km)
Pointing Angle	-1.5 to +1.5 degrees (Triplet Mode, Cross-track direction)
Bit Length	8 bits

第三章 研究方法

本研究的研究流程圖如圖 6 所示，因為 PRISM 及 PALSAR 的空間解析度差異較大，AVNIR-2 及 PALSAR 有較相似的空间解析度，研究中僅針對 AVNIR-2 及 PALSAR 進行異質影像之套合，並比較線特徵匹配、面特徵匹配及 MI 匹配三種方法之套合精度。各工作項目詳細說明如下。

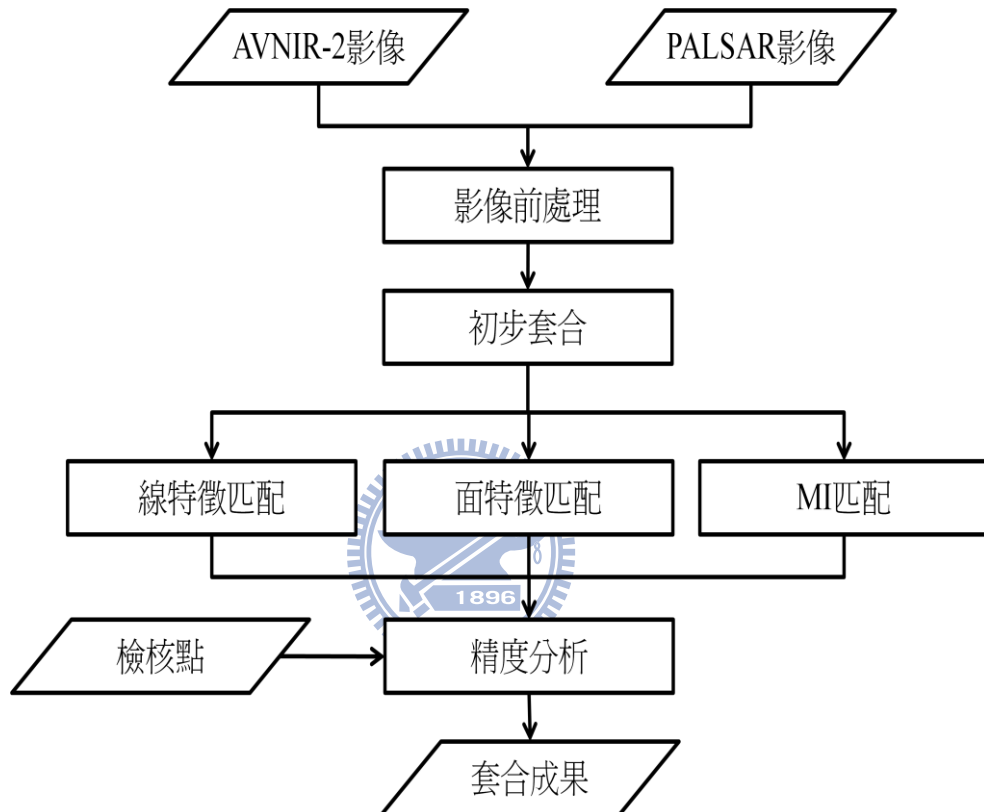


圖 6、研究流程圖

3.1 影像前處理

雷達及光學影像在成像上有很大的差異，兩種影像的感測器不同也可能使兩張影像的解析度及影像上每一個像元的灰度值範圍不同造成匹配失敗，因此透過影像前處理減少兩張影像的差異並能夠提升匹配的可能性。本研究所使用的光學影像為 AVNIR-2 影像，雷達影像為 PALSAR 影像，光學影像的前處理主要是將可見光及紅外光波段組合成全色態影像，雷達影像的前處理包含將斜距影像轉換為地距影像、影像灰度值處理及雜訊濾除。

3.1.1 光學影像前處理

光學影像前處理是將多光譜影像轉換為全色態影像，可以由多光譜的各個波段分別給予權重組合而得。關係式如式(1)：

$$I_{\text{pan}} = \sum w_i B_i \quad (1)$$

式中， w_i 為權重， B_i 為波段，最後輸出全色態影像 I_{pan} 。本研究給定各波段相同的權重，也就是將 R、G、B 及 IR 四個波段取平均，處理後的成果與原始影像以肉眼觀察並沒有太顯著的誤差。

3.1.2 雷達影像前處理

雷達影像前處理包含了三個部分，分別為斜距與地距影像的轉換、影像灰度值處理及雜訊濾除。由於雷達影像為斜距影像，必須改正為地距影像以利後續的匹配作業。雷達影像中的灰度值為電磁波回訊的強度值，其大小與光學影像的灰度值有相當大的差異，透過灰度值處理將雷達影像中的強度值約化為 0~255。雷達影像中斑駁雜訊影響非常嚴重，透過雜訊濾除的步驟可以減少雜訊的影響。

3.1.2.1 斜距影像轉地距影像

雷達影像屬於斜距影像，是將地形投影至斜距上，如圖 7 所示。斜距影像與地距影像在尺度上有很大的差異不利於匹配，因此必須將斜距影像改算成地距影像。

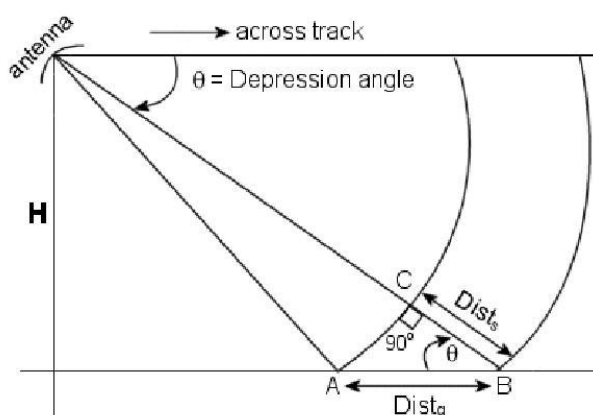


圖 7、斜距投影

斜距影像因受到電磁波訊號在空間中傳遞的關係，在精密的改正方法中會加入時間改正，

處理上較為複雜，因此通常以平均航高及視角改正而省略時間所造成的影響。利用衛星的軌道高度和掃瞄時的偏角即可透過幾何關係將斜距影像轉換為地距影像，如圖 8 所示。地矩與斜距的轉換公式如下， $Dist_s$ 為地距， $Dist_g$ 為斜距， θ 為傾斜角如圖 7。

$$Dist_s \approx Dist_g \cdot \cos \theta \quad (2)$$

3.1.2.2 灰度值處理

雷達影像的灰度值為電磁波回訊的強度值，與光學影像中的灰度值有很大的差異。影像透過影像增顯剔除較大的灰度值及灰度值的正規化將雷達影像的灰度值調整為 0~255，將雷達影像轉變成 8 bits 的灰階影像，影像的容量變小也能夠提升運算效率。圖 8 為雷達影像經灰度值處理前後的示意圖。

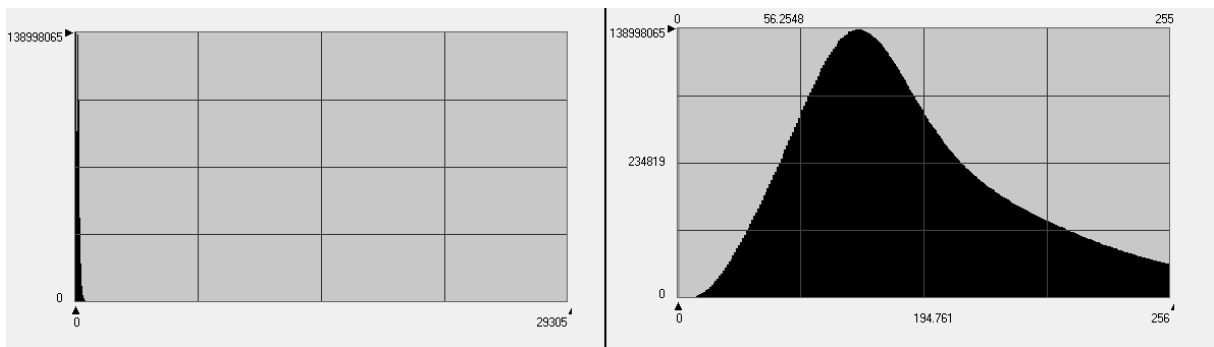


圖 8、原始雷達影像之灰度值(左)，經灰度值處理後(右)

3.1.2.3 雜訊濾除

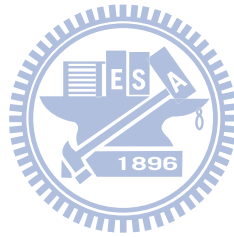
雷達影像接收來自粗糙地表的反射波，各個反射波的相位不同而有建設性干涉及破壞性干涉的現象，導致影像中會有許多斑駁雜訊，而這些雜訊會影響特徵的萃取或匹配錯誤，因此在影像匹配前必須將雷達影像的雜訊濾除，在雷達影像的雜訊濾除方法非常多，根據前人的研究成果得知 Lee filter 對於濾除 SAR 影像雜訊相較於其他方法有較好的效果 (Jia et al., 2009)，故本研究採用的雜訊濾除方法為 Lee filter，如式(3)~(6)。利用移動罩窗計算罩窗內灰度值的平均值 \bar{x} 及標準差 σ_x ，由估計的雜訊方差 σ_n 和 σ_x 計算中心像元的灰度值 x_1 和 \bar{x} 之間的權重 β ，將得到的值填回中心像元。

$$f(x_1, x_2 \dots x_N) = \beta x_1 + (1 - \beta)\bar{x} \quad (3)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (4)$$

$$\beta = \max\left(\frac{\sigma_x^2 - \sigma_n^2}{\sigma_x^2}, 0\right) \quad (5)$$

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (6)$$



3.2 影像的初步套合

光學及雷達影像在旋轉、平移及尺度方面均有很大的差異，透過初步套合可以減少這些差異，其作業方式可以利用人工量測少量的控制點進行套合。本研究採用人工量測三個控制點的方式進行影像的初步套合，如圖 9 所示。

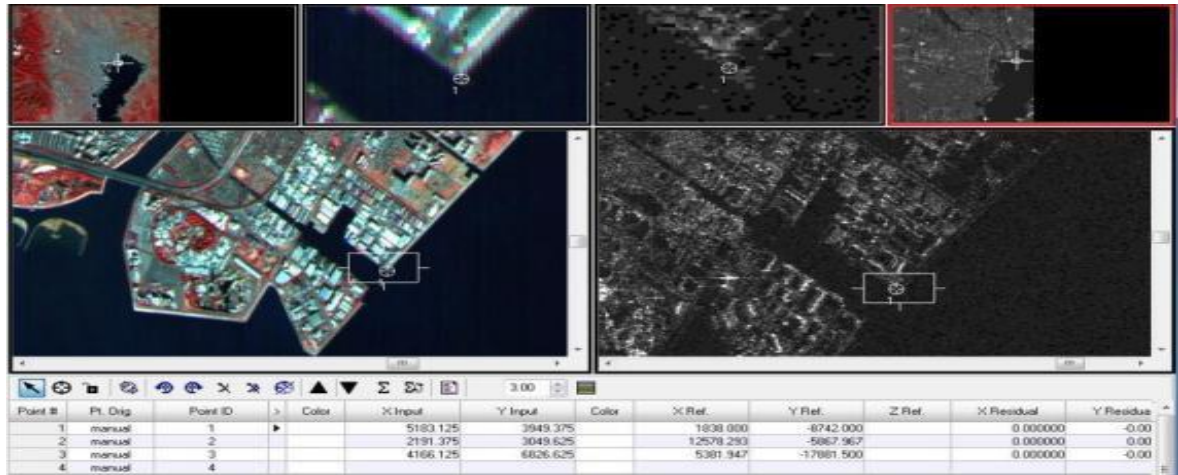


圖 9、控制點量測

以人工量測的三個控制點求解仿射轉換的六個轉換參數，將雷達影像套合至光學影像上，式(7)、(8)為仿射轉換的方程式，其中 $a_1 \sim a_3$ 及 $b_1 \sim b_3$ 為仿射轉換的六個未知參數， (s', l') 為光學影像的影像坐標， (s, l) 為雷達影像的影像坐標。

$$s' = a_1 s + a_2 l + a_3 \quad (7)$$

$$l' = b_1 s + b_2 l + b_3 \quad (8)$$

圖 10 為套合成果經過透明度的調整後以便觀察套合情形，在影像中間顏色比較亮的區域是雷達影像，而周圍比較暗的區域則是光學影像，影像中的三個點則是人工量測之控制點。

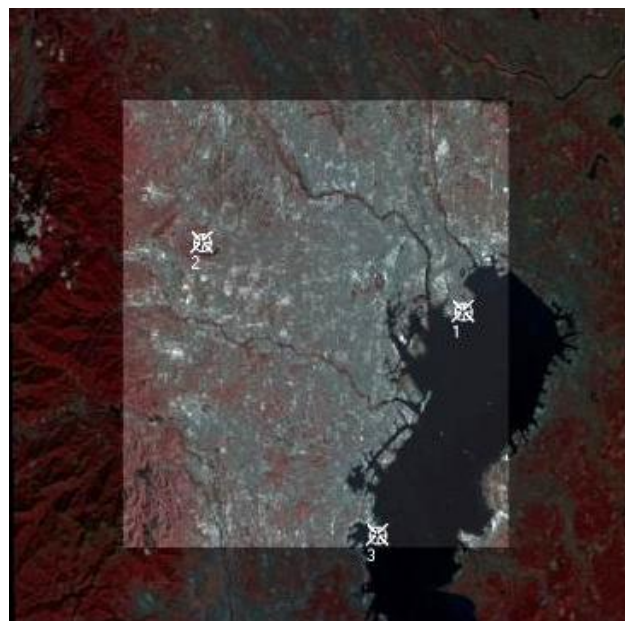


圖 10、初步套合成果

3.3 面特徵套合

面特徵套合利用影像中較大的區塊作為面特徵，在 PALSAR 影像中由於解析度的限制比較明顯的區塊通常為湖泊或其他水體，利用面特徵萃取自動找出這些區塊作為面特徵使用，選出面積較大的面特徵作匹配。面特徵匹配則是利用面特徵的幾何條件判定兩面特徵是否匹配成功，並加入距離門檻判斷兩面特徵是否有匹配的可能。在前人的研究中，面特徵匹配後採用的共軛點通常為面特徵的形心、面特徵的角點或是以線特徵進行更進一步的匹配，本研究採用面特徵的形心作為共軛點。

3.3.1 面特徵萃取

面特徵萃取通常由影像分割得到面特徵區塊或是利用線特徵萃取再以封閉的線特徵作為面特徵使用。根據前人的研究成果 (Shuang Wang, 2011)，分水嶺分割法 (Watershed segmentation) 能夠在雷達影像中萃取出面特徵，因此本研究採取的面特徵萃取方法即為分水嶺分割法。分水嶺分割法的演算概念是將影像灰度值假設為高度，整張影像則為具有地形起伏的地形圖，再由區域最低點開始進行區域成長即可得到分割影像，實際的作法大致上可以分成兩個步驟：梯度計算和泛流處理 (flooding process)。首先計算影像灰度值的梯度，梯度可以由式 (9) 計算而得，

$$\nabla f = \text{mag}(\nabla f) = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

若像點位於邊界上則 ∇f 值愈大，反之位於均調區 ∇f 值愈小。泛流處理的概念是水由高處往低處流並匯集在蓄水盆中，蓄水盆為中間低四周高的地形，水位慢慢上升至分水嶺高度後，即可得到分割的影像。實際上處理的方法是由梯度計算得到的梯度值找出局部最小值作為起點搜尋周圍梯度值最小的點作區域擴張，直到面特徵擴張至由梯度值較高的點組成的分水嶺位置，即完成影像分割。如圖 11 所示，左上圖為一灰階影像，將影像的灰度值視為高度則可以得到地形圖如圖右上，計算梯度後由局部最低點開始向四周擴展如圖左下，最後得到的影像分割如圖右下。

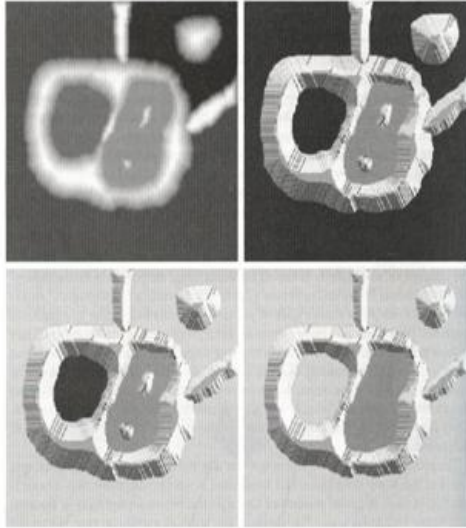


圖 11、分水嶺分割法

(Image Segmentation and Mathematical Morphology.

URL:<http://cmm.enscm.fr/~beucher/wtshed.html>)

3.3.2 面特徵匹配

經由分水嶺分割後得到的面特徵以顏色作為區隔，並計算出每一個面特徵的面積、周長、形心的像坐標、最小包圍矩形的長和寬，選擇面積較大的面特徵進行匹配。面特徵匹配是利用面特徵的幾何性質作為判斷依據，本研究所採用的是 Dare 和 Dowman 在 2001 發表的文章中提出的 cost function 對兩面特徵進行匹配。該 cost function 如式(10)所示：

$$\Gamma = \frac{|a_1 - a_2|}{|a_1 + a_2|} + \frac{|p_1 - p_2|}{|p_1 + p_2|} + \frac{|r_1 - r_2|}{|r_1 + r_2|} + \frac{|c_1 - c_2|}{|c_1 + c_2|} \quad (10)$$

式(10)中 a 為面特徵的面積，p 為面特徵的周長，r 和 c 分別代表面特徵最小包圍矩形的長和寬，式中分子為計算兩個面特徵幾何屬性的差值，差值愈小則兩面特徵愈相似，分母為兩面特徵幾何屬性的和，其目的為減少兩張影像因尺度上的差異影響 cost function 的計算，最後得到愈小的 Γ 表示兩面特徵愈相似。面特徵匹配時利用初始套合後面特徵的距離作篩選，轉換後距離超過門檻值的面特徵則不考慮。匹配流程是將兩張影像中挑選出的面特徵計算所有面特徵匹配組合的 Γ 值，由 Γ 值最小的組合優先考量。

3.4 線特徵套合

以特徵為基礎的雷達影像套合中常用的特徵為線特徵和面特徵，在影像中線特徵的位置為影像灰度值梯度較大的地方，線特徵的匹配方法非常多元，例如：利用線特徵的幾何性質、將線特徵組成模板或以 SSD (Sum of Squared Differences) 的概念進行匹配…等。本研究所採用的線特徵套合方法是利用 Canny 邊緣線萃取演算法得到線特徵後，利用線特徵上得像點以 SSD 法匹配，加入影像金字塔的匹配流程使線特徵的萃取更加可靠，並能夠逐層改善套合成果。

3.4.1 線特徵萃取

線特徵萃取的演算法非常多，其中最常用的演算法為 Canny 邊緣線偵測。Canny 邊緣線偵測具有低誤判率、點位偵測誤差小、沒有重複回應等特性，且在影像中含有雜訊時仍能夠成功偵測出邊緣線 (Canny, 1986)。Canny 邊緣線偵測主要可以分為高斯濾波、計算灰度值梯度、非最大值壓縮、雙臨界值演算法。高斯濾波的目的是在於減低雜訊影響，高斯濾波是由高斯函數所構成罩窗對影像進行照窗移動的處理，以高斯罩窗能夠使影像均勻的平滑化，也是常用的罩窗之一。由像元與鄰近像元計算灰度值梯度總合即可得到該像點的梯度方向及大小，梯度是計算兩像元灰度值之差異，當兩像元的梯度愈大則該處極有可能為影像中的邊緣線位置。對計算得到的像元梯度值作非最大值壓縮以選出最精確的邊緣像元，非最大值壓縮是沿像元的梯度方向上在一定的範圍內搜尋鄰近像元並標記梯度最大的像元為邊緣像元而梯度較小的像元則被壓抑，如圖 12 所示，以 P 點為中心沿梯度方向在一定範圍內搜尋到 a、b 兩點並標記梯度最大的像元。

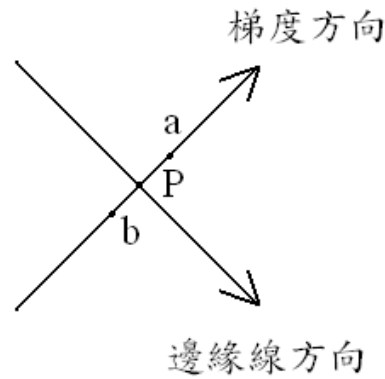


圖 12、非最大壓縮示意圖

最後設定雙門檻進行邊緣點的連結，雙門檻分別為高低兩個臨界值，當像元梯度大於高臨界值則該像元必為邊緣像元，反之像元梯度值小於低臨界值則必不為邊緣像元，若梯度值位於高低臨界值之間則必須由鄰近像元的梯度值判定該像元是否為邊緣像元。

3.4.2 線特徵匹配

線特徵匹配採用的方法為 SSD 法，其目的在使邊緣線像元在匹配後的差異總和為最小。利用線特徵萃取得到兩張影像的邊緣線，將其中一張影像邊緣線上的像元透過初始套合在另一張影像上搜尋並以距離為門檻，如圖 13 所示。

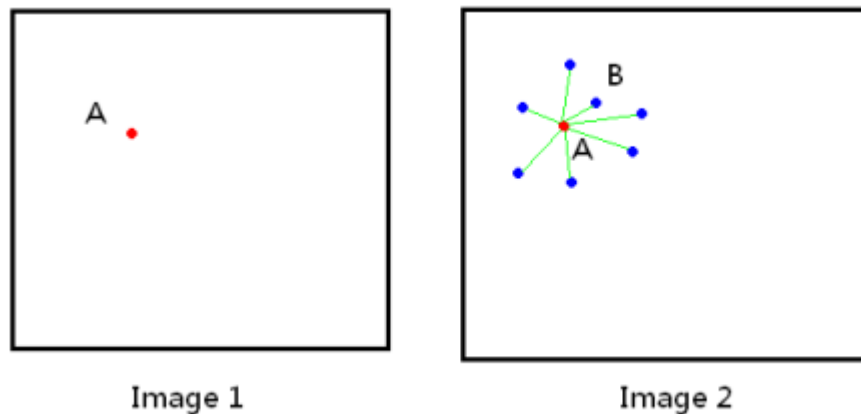


圖 13、線特徵匹配以單一像元為例

在 Image 1 中的像點 A 透過初始套合的轉換關係轉換至 Image 2，並在搜尋範圍內找到符合門檻的像點 B，A、B 為匹配完成的共軛點。在 Image 1 影像中線特徵像元逐點匹配後，使兩線特徵的距離差異為最小，如圖 14 所示。

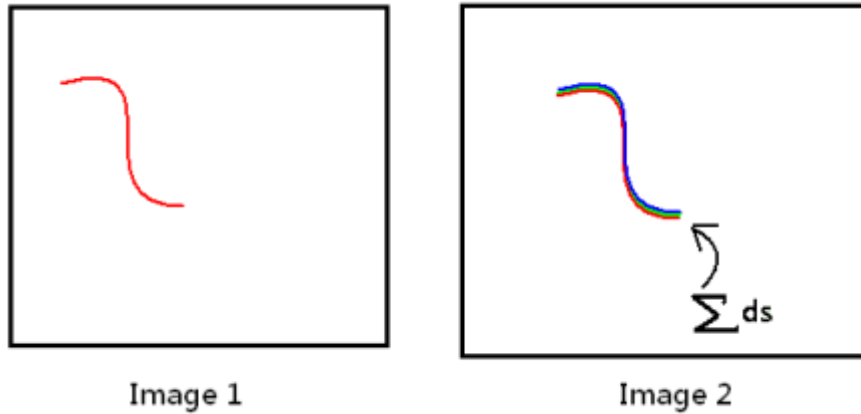


圖 14、線特徵匹配

3.4.3 影像金字塔

影像金字塔的技術已經廣泛使用在各種影像處理中，影像金字塔的最底層為輸入的原始影像，每往上一個層級的影像均經過平滑濾波器處理並且將像元大小更改為原影像的兩倍，也就是說假設原始影像大小為 $N \times N$ 個像元，往上一層的影像大小轉變為 $\frac{N}{2} \times \frac{N}{2}$ ，影像金字塔常以 Gaussian filter 作為平滑濾波器，其方程式如式(11)所示。圖 15 為影像金字塔的示意圖。

$$f(x) = ae^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}} \quad (11)$$

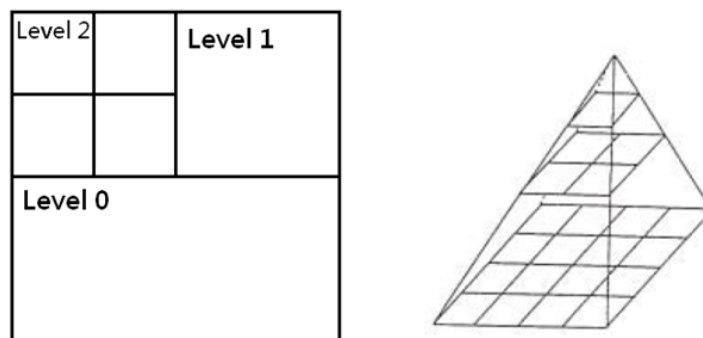


圖 15、影像金字塔

線特徵匹配加入影像金字塔之匹配流程，由影像金字塔最上層(解析度較粗的圖層)進行影像萃取及匹配，再將得到的套合成果沿用至下一個圖層，逐步改善套合成果。在解析度較粗的圖層進行的線特徵萃取，由於經過了多次的平滑化使得最上層影像中的雜

訊絕大多數都已經被消除了，留下的是最明顯的邊緣線特徵，使線特徵萃取能夠得到更加可靠的邊緣線特徵。

3.5 區域套合

區域套合在光學對光學影像的套合中，最常用的匹配方法為 NCC (Normalize cross correlation)，NCC 是計算兩張影像灰度值的相似度作為匹配的判斷，同質影像的像元灰度值具有一定的相似度，所以作 NCC 匹配時往往能夠找出相關係數很高的匹配位置，但由於異質影像的灰度值具有很大的差異，若以 NCC 法進行匹配可能匹配到錯誤的位置，Suri (200)採用 NCC 法對異質影像進行匹配，成果顯示以 NCC 法對異質影像匹配的表現不如對同質影像匹配。本研究採用了互訊息匹配 (Mutual Information, MI)，是利用兩張影像的熵作為匹配的依據，匹配後可以得到兩個平移參數。

3.5.1 互訊息匹配

互訊息匹配是利用熵計算影像間的互訊息資訊量作匹配，不會受到兩張影像灰度值差異的影響，互訊息匹配的操作步驟可以分成計算聯合直方圖和計算互訊息資訊量兩部分。聯合直方圖是統計兩張影像在相同像元上不同灰度值組合出現的次數，其計算方式如圖 16 所示。

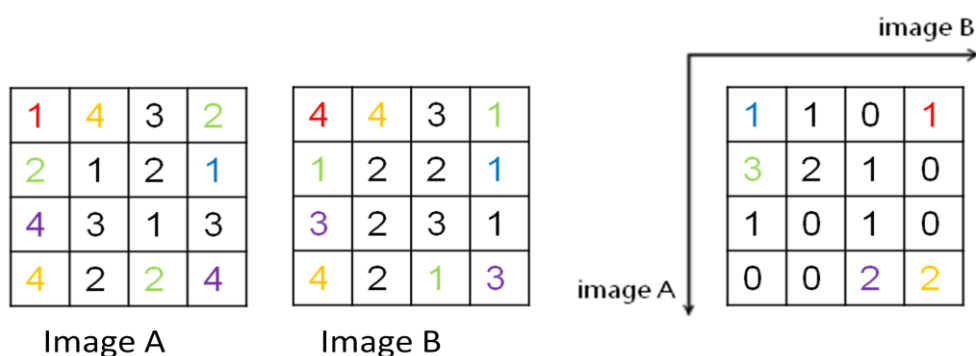


圖 16、成立聯合直方圖

由聯合直方圖可以計算每一種灰度值組合的出現機率，並計算熵再計算互訊息資訊量，互訊息資訊量介於 0~1 之間，當互訊息資訊量愈大表示兩區域愈相似，式(12)~(18)為計算互訊息資訊量的公式。

$$P_{A,B}(a, b) = \frac{h(a, b)}{\sum_{a,b} h(a, b)} \quad (12)$$

$$P_A(a) = \sum_b P_{A,B}(a, b) \quad (13)$$

$$P_B(b) = \sum_a P_{A,B}(a, b) \quad (14)$$

$P_{A,B}$ 為灰度值組合出現的機率， P_A 、 P_B 為 A、B 影像中各灰度值出現的機率，H 為各個灰度值機率的熵。

$$H(A) = \sum_a -P_A(a) \log(P_A(a)) \quad (15)$$

$$H(B) = \sum_b -P_B(b) \log(P_B(b)) \quad (16)$$

$$H(A, B) = \sum_{a,b} -P_{A,B}(a, b) \log(P_{A,B}(a, b)) \quad (17)$$

$$MI(A, B) = H(A) + H(B) - H(A, B) \quad (18)$$

分別計算熵，最後由熵計算出 A 和 B 之間的互訊息資訊量。

兩張影像的匹配先透過初始套合得到兩張相對應的影像，在將其中一張影像向內縮減一定的像元數後在另一張影像上作單窗移動，如圖 17 所示，

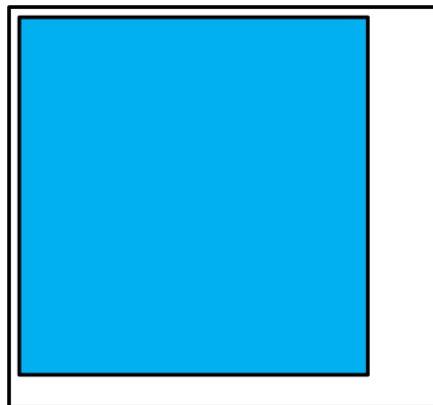


圖 17、互訊息匹配之單窗移動示意圖

每移動一次即可求得該位置的互訊息資訊量，最後可以得到互訊息資訊量所構成的矩陣，其峰值的位置即為匹配成功的位置，圖 18 中紅色的位置為峰值所在則兩個平移參數為 (2, 2)。

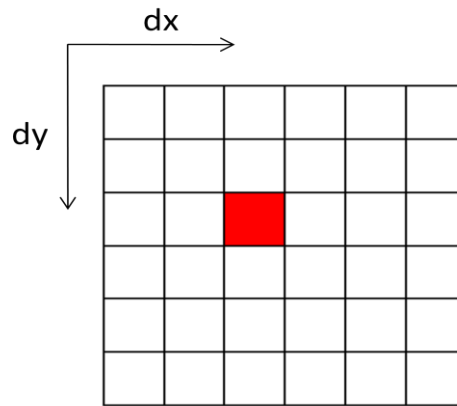


圖 18、互訊息資訊量矩陣圖

3.6 建立轉換模型

由萃取和匹配所得到的控制點必須代入一個合適的轉換模型計算轉換參數才能完成兩張影像的套合。仿射轉換 (affine transform) 是一種平面對平面的轉換模型，共包含兩個平移參數、兩個尺度參數、一個旋轉參數及一個與座標軸正交性相關的參數又稱六參數轉換，其數學式如下：

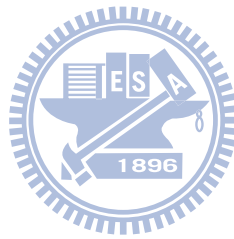
$$x' = a_1x + a_2y + a_3 \quad (19)$$

$$y' = b_1x + b_2y + b_3 \quad (20)$$

為了克服仿射轉換局部非線性變化的問題而有 TPS (Thin Plate Splines) 和局部仿射轉換 (local affine transform) 的發展，本研究採用的是仿射變換和局部仿射變換兩種轉換模型，在面特徵匹配使用的是仿射變換模型而線特徵匹配則是以仿射變換模型為主，並在影像金字塔匹配流程的最底層 (解析度最細) 搭配局部仿射變換模型。TPS 是以仿射變換校正全區後再以雙調和 (Biharmonic) 方程式擬合小範圍的幾何變形(Goshtasby, 1988)，其方程式如下：

$$h(z) = Mz + t + \sum_{i=1}^n P_i K(\|z - z_i\|) \quad (21)$$

z 為轉換前的像坐標， M 和 t 為仿射轉換的轉換係數 $a_1 \sim a_3$ 及 $b_1 \sim b_3$ ， K 為雙調和方程式。
局部仿射邊換則是將控制點組成三角網，並計算每一個三角形的仿射轉換參數，藉此消除仿射轉換局部非線性的問題。



第四章 研究資料

本研究使用的資料包含同步及非同步獲取之 AVNIR-2 的光學影像和 PALSAR 的雷達影像，兩組測試區分別為日本東京及台灣北部，實驗區包含平坦區海港、山區水庫、平坦區湖泊、平坦區河流。實驗影像產品等級分別為原始影像及系統校正影像，因此可分析選用不同產品的套合精度。各實驗區的詳細資料說明如下。

4.1 原始影像

由於 ALOS 衛星上同時搭載了 AVNIR-2 及 PALSAR 兩種感測器，在兩種感測器掃描範圍的重疊區內，即可同時獲取兩種感測器的衛星影像，第一組實驗資料為同步獲取之 AVNIR-2 的光學影像和 PALSAR 的雷達影像，兩組影像的側視角均為 34.3 度，AVNIR-2 影像為包含 B,G,R,IR 四個波段，地面解析度約為 15 公尺，PALSAR 影像為 Fine mode HH 單偏極影像，地面解析度為 7 公尺，拍攝地點為東京灣，光學影像的影像等級為原始影像 Level 1A，雷達影像的影像等級為 Level 1.1，均為未經輻射及幾何校正的衛星影像。影像資料如表 7 所示。

表 7、研究資料一

影像類別	光學影像	雷達影像
感測器	AVNIR-2	PALSAR
拍攝日期	2009 年 12 月 21 日	
影像位置	日本，東京灣	
拍攝傾角	34.4 度	
像幅大小(pixels)	7000 × 8100	9344× 18432
空間解析度	15 公尺	7 公尺
影像等級	Level 1A	Level 1.1

第二組資料的光學及雷達影像為非同步拍攝影像，實驗區域為台灣北部。光學影像之產品等級為正射影像，正射影像使用地面控制點及台灣 40 公尺 DTM 進行正射處理，AVINR-2 正射影像的空間解析度為 12 公尺，正射校正精度約為 1 個像元。雷達影像的影像等級為系統改正影像 Level 1.5，系統改正影像僅使用星曆資料及經過 40 公尺 DTM 進行系統校正，人工量測檢核點評估其精度約為 1 公里，其空間解析度為 5 公尺。影像資料如表 8 所示。

表 8、研究資料二

影像類別	光學影像	雷達影像
感測器	AVNIR-2	PALSAR
拍攝日期	2010 年 2 月 24 日	2010 年 3 月 7 日
影像位置	台灣北部，桃園及台北地區	台灣北部，台北基隆地區
拍攝傾角	-	34.3 度
像幅大小(pixels)	7000 × 8100	8693× 15976
空間解析度	12 公尺	5 公尺
影像等級	正射影像	Level 1.5

4.2 測試區影像

為分析不同地物的套合成果，本研究分別擷取四組不同的地物進行分析，測試區一和二由同步影像中選取，測試區三和四則是由非同步影像中選取。測試區的擷取是利用初步套合，將雷達影像套合至光學影像上再進行裁切。表 9 為四組測試區總表，說明四組測試區的高度、地表覆蓋物及人工量測檢核點數。

表 9、測試區總表

測試區	高度	地表覆蓋物	人工量測檢核點數
一	10 公尺	人造建物及水體	30 個
二	130 公尺	植被、裸露地、人造建物及水體	30 個
三	70~80 公尺	植被、裸露地、人造建物及水體	30 個
四	7~10 公尺	裸露地、人造建物及水體	10 個

圖 19 為第一及第二組測試區的分部位置。第一組測試區位於東京灣，約在羽田機場北方的一處港口，地表覆蓋物多為人造建物，如：柏油路、房屋、貨櫃，地勢較為平坦，海拔高度約在 10 公尺以下。第二組測試區是位於東京灣西方的狹山湖，地表覆蓋物在湖泊的鄰近區域以植被為主，遠離湖泊的區域則有少量的人造建築，平均高度約在海拔 130 公尺，相較於第一組測試區地勢較高。

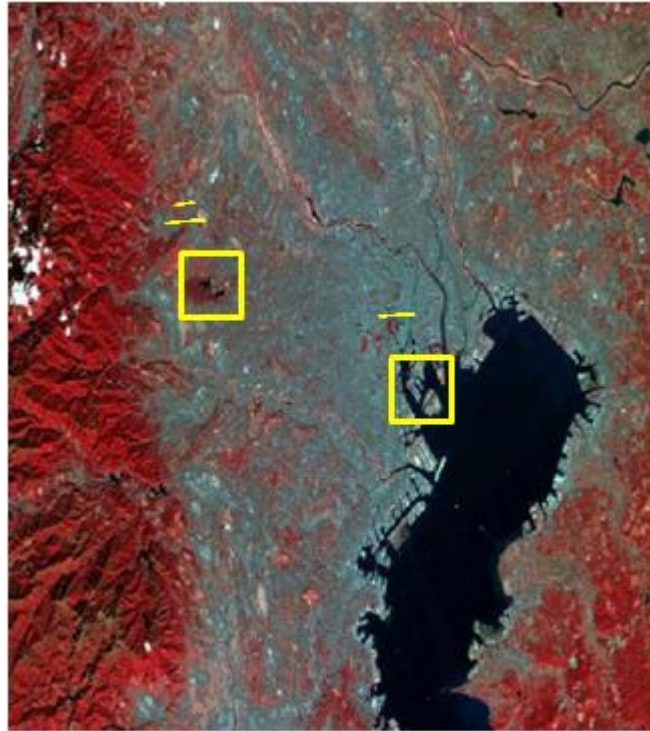


圖 19、測試區一及測試區二分布位置

圖 20 是第一組測試區的光學及雷達影像，在光學影像中，色調較亮的為陸地，較暗的為海，海上的亮點則是行駛中的船隻。由雷達影像可以明顯的看出其中包含了許多斑駁雜訊，因為是單偏極影像，即使經過影像前處理仍然不能完全消除，由於影像中的陸地大多為人造建物，測器所接收到的反射強度值均較大，在影像右下角的陸地為裸露地，可以明顯的發現該地區的反射強度明顯低於其他陸地區域。

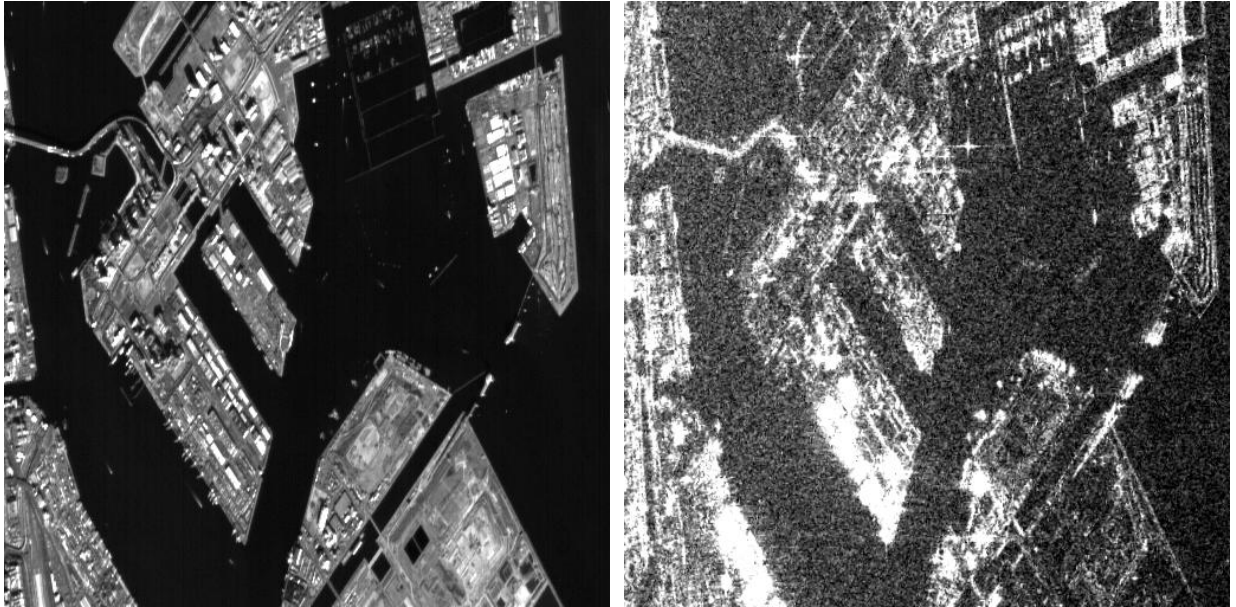


圖 20、測試區一光學影像(左)及雷達影像(右)

圖 21 分別為第二組測試區的光學及雷達影像，圖中明顯的面特徵為水庫，在水庫的周圍為植被區，此處的反射強度在雷達影像上屬於較均勻的區域，影像偏外側周圍的區域為道路及人造建築，雷達影像上的反射強度較大。海拔高度約為 130 公尺。

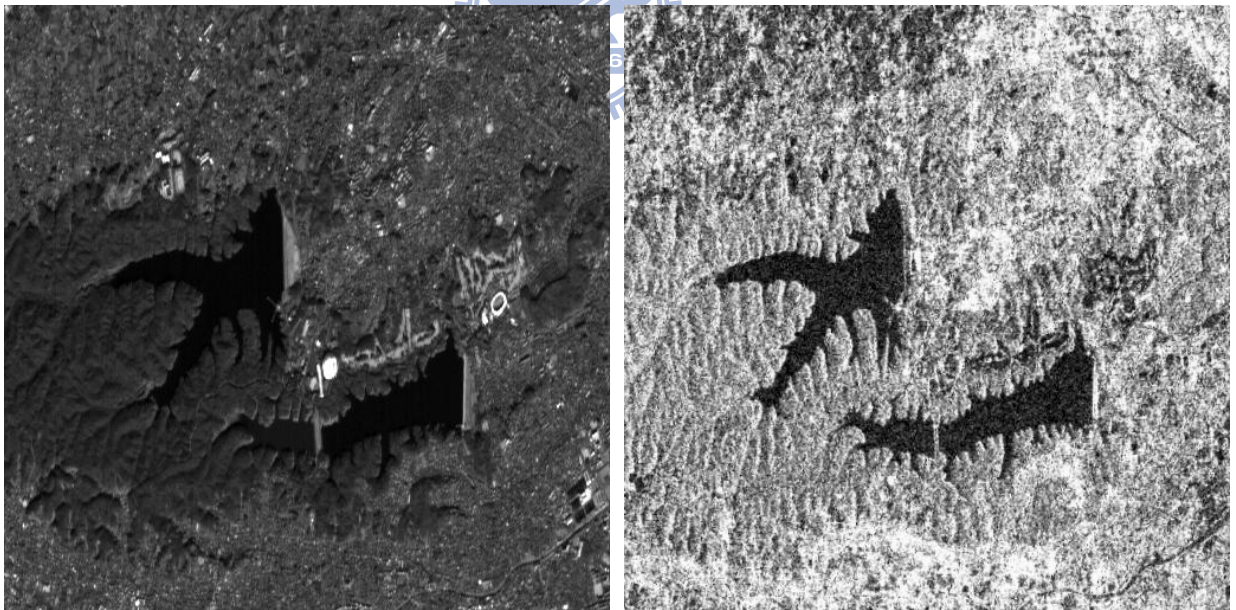


圖 21、測試區二光學影像(左)及雷達影像(右)

圖 22 為第三及第四組測試區的分布位置。第三組測試區位於台灣北部桃園一帶，地表覆蓋物為植被、人造建物及水體，由於當地農業及養殖漁業盛行，植被多半為農田，人造建物為住宅、農舍或道路，水體則是養殖漁業所使用的漁塭。地形起伏約為 70 至 80 公尺的平坦區域。第四組測試區位於台北盆地，淡水河與基隆河匯流處。地表覆蓋物以人造建物、河道的水體及裸露地為主，由於雷達影像的雜訊影響，影像中沒有特別明顯的特徵，在雷達影像的右下角為密集的人造建物，使該區域的反射強度較強，以肉眼觀察，僅能分辨出少數幾條道路，以人工很難在此測區量測控制點。海拔高度約為 7~10 公尺。

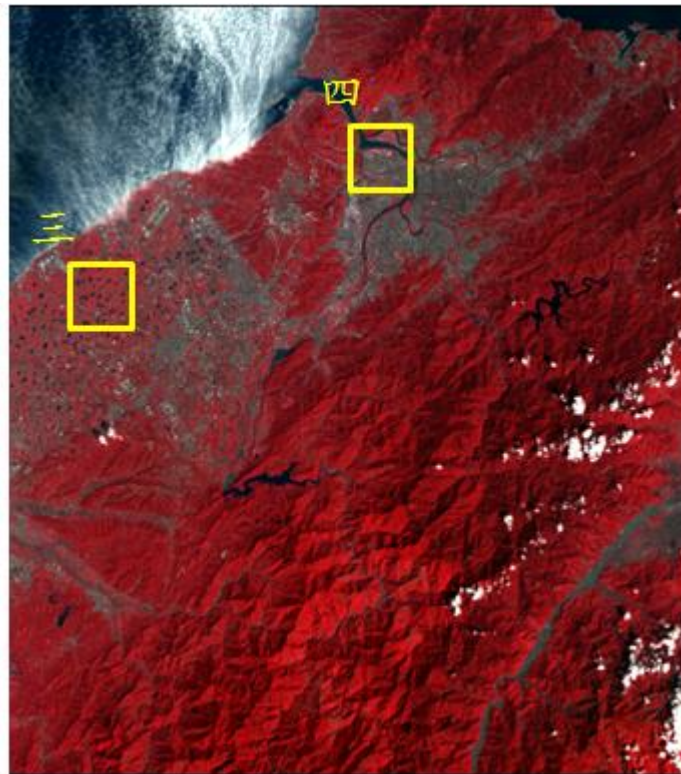


圖 22、測試區三及測試區四分布位置

圖 23 為第三測試區的光學及雷達影像，兩張影像中的水體將有助於後續面特徵套合的分析，相較於第二測試區的湖泊，此測區特殊的漁塭地貌能夠增加面特徵套合的可能性。雷達影像仍然受到斑駁雜訊的影響，使得漁塭所構成的面特徵不如光學影像中清晰，增加影像套合的難度。

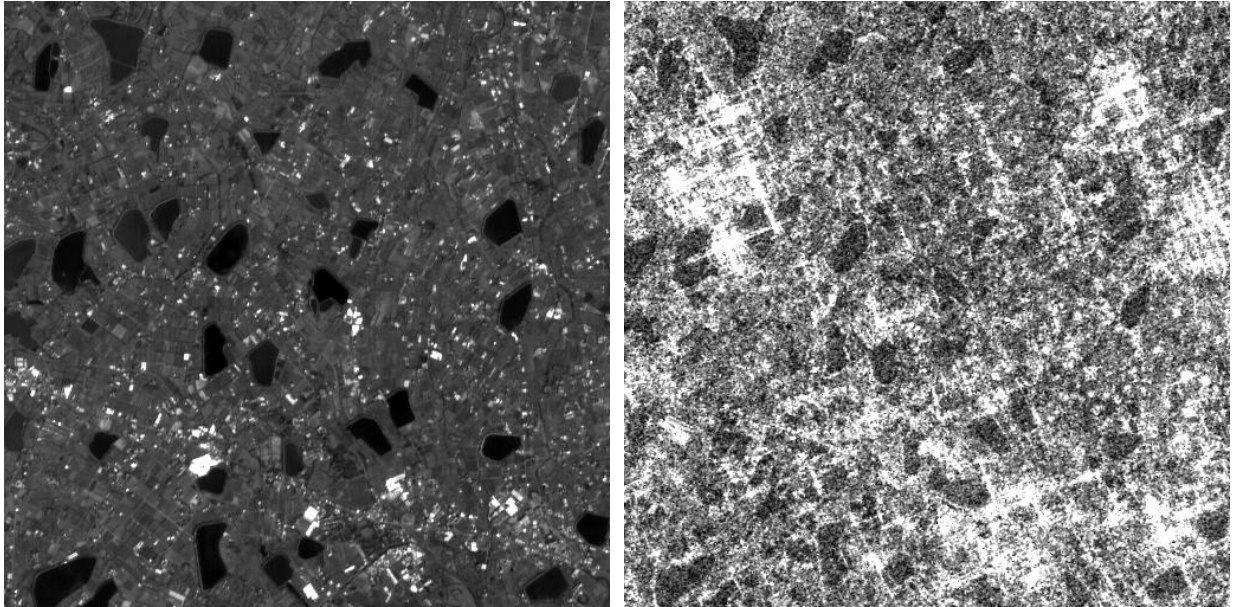


圖 23、測試區三光學影像(左)及雷達影像(右)

圖 24 為第四組測試區的光學及雷達影像，由光學影像中可以發現影像右下角的區域均為人造建物，左下角的河道及河道兩側均能夠找到合適的點作為控制點，在雷達影像中則無法明確的指出特徵點的所在位置，這也造成了人工量測控制點的難度。

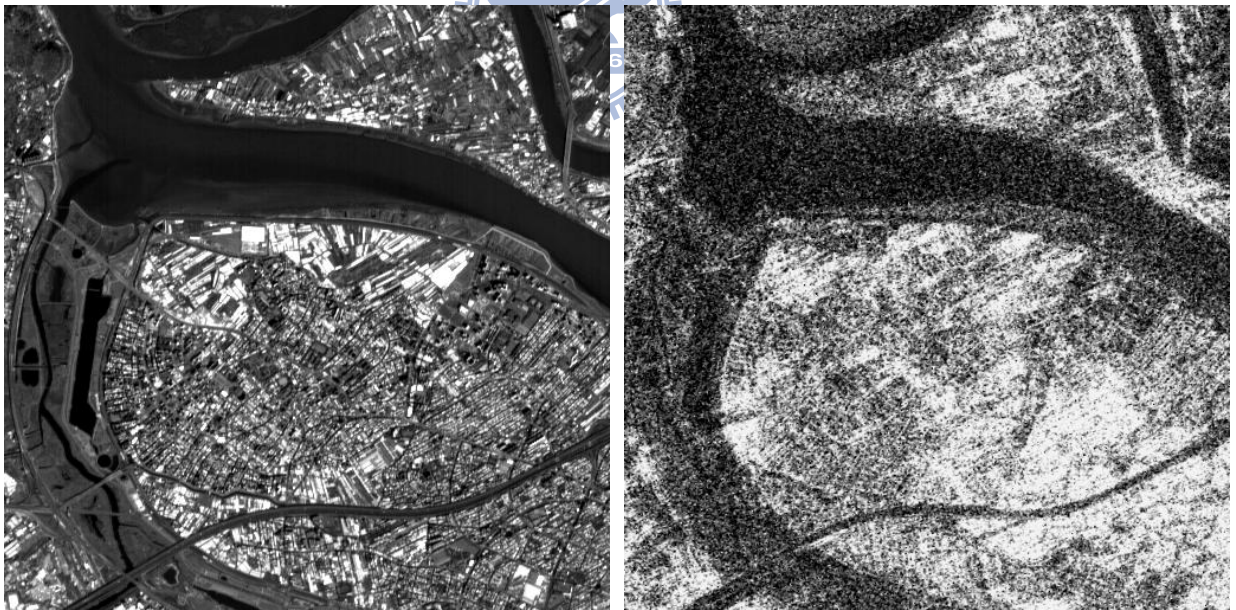


圖 24、測試區四光學影像(左)及雷達影像(右)

第五章 成果分析

利用四組測試區的影像分別以三種方法進行匹配，並以人工量測三十個共軛點作為檢核，探討三種方法及初步套合於四組不同測區的套合精度。成果展示以光學影像及轉換後的雷達影像組成的棋盤影像 (Chess Image) 作視覺上的評估，以檢核點計算 RMSE 值作為評估套合成果的量化指標。

5.1 測試區一成果分析

以人工量測 30 個共軛點作為檢核點，如圖 25 所示，左像為光學影像，右像為雷達影像，檢核點大多分布在水體與陸地的交界處。在雷達影像中量測檢核點時，因影像的雜訊影響及雷達影像的成像性質，影像中水體與陸地的交界較難辨別，影響檢核點的量測。

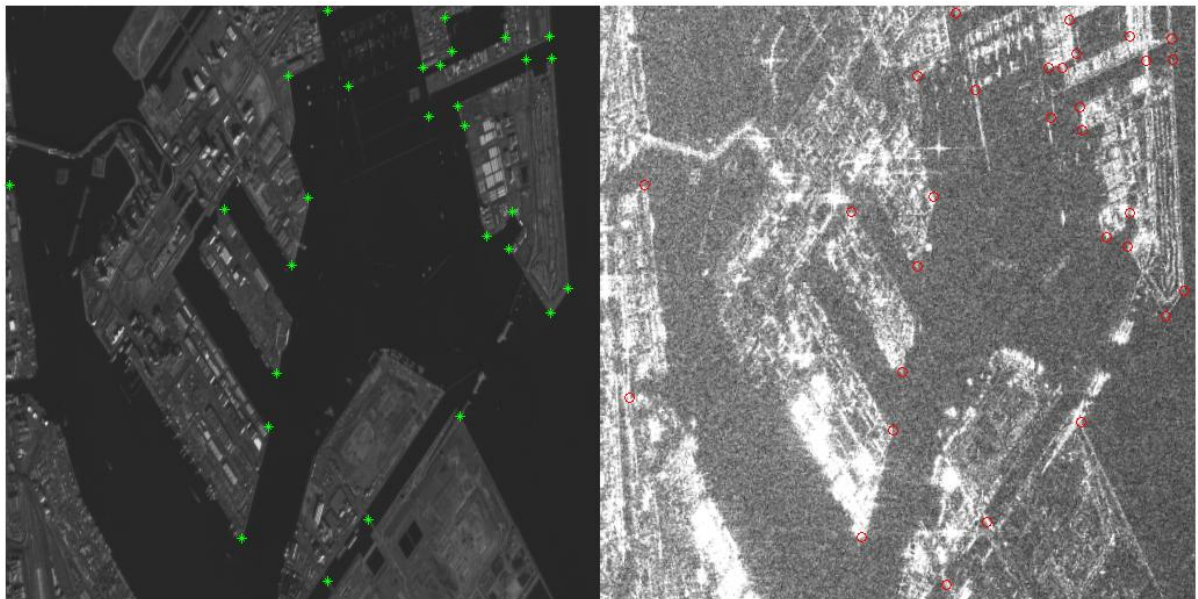


圖 25、測試區一檢核點分布圖

5.1.1 測試區一初步套合

表 10 為初步套合成果，初步套合成果的 RMSE 值約在 25 個像元，從平均誤差可以發現，經過初步套合後的光學及雷達影像在 Sample 方向仍有大約 21.92 個像元的平移量。圖 26 為初步套合之棋盤影像，紅色圓圈處可以看出套合成果很差。

表 10、測試區一初步套合成果

	RMSE (pixel)	Average (pixel)
Distance	25	24.67
Sample	24.92	-24.64
Line	2.01	-1.22

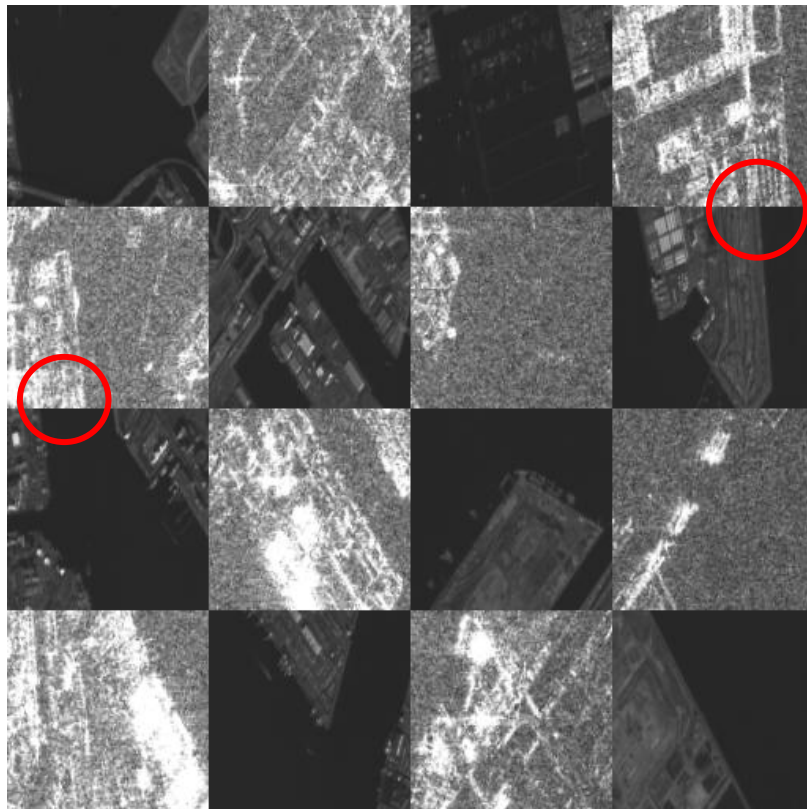


圖 26、測試區一初步套合之棋盤影像

5.1.2 測試區一互訊息匹配

圖 27 為雷達影像在光學影像上移動計算得到互訊息資訊量矩陣的三維圖形。互訊息資訊量矩陣的峰值約為 0.1，位於(-25, 0)。峰值的位置明顯偏向 x 軸的負方向，與初步套合成果的偏移方向相符。

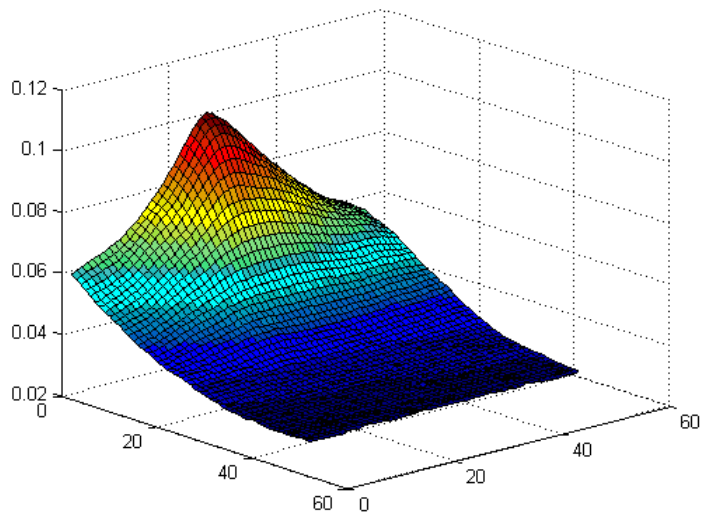


圖 27、測試區一互訊息資訊量矩陣圖

表 11 為互訊息匹配成果，互訊息匹配成果約為 4.27 個像元，平均誤差約為 1.27 個像元。由此量化成果可以得知，互訊息匹配得到的平移量修正了初步套合的誤差，套合精度由 25 個像元減少為 4.27 個像元，平均像元減少至大約 1 個像元。對於初步套合成果的改善非常顯著。

表 11、測試區一互訊息匹配成果

	RMSE (pixel)	Average (pixel)
Distance	4.27	1.27
Sample	3.77	0.36
Line	2.01	-1.22

圖 28 為互訊息匹配之棋盤影像，在測試區一的成功互訊息匹配雖然大幅改善初步套合，但從棋盤影像上，仍然有些微匹配失敗，如圖中紅色圓圈處所示。圖 29 為檢核點套合後的分布圖，綠色的點是光學影像上的檢核點，紅色的點是雷達影像上的檢核點套合至光學影像上，從互訊息匹配後的檢核點分布圖可以發現影像兩側紅色的點向影像中心偏移，這也顯示出互訊息匹配法對於 Sample 方向上的尺度變化無法有效的改正，而造成此現象。

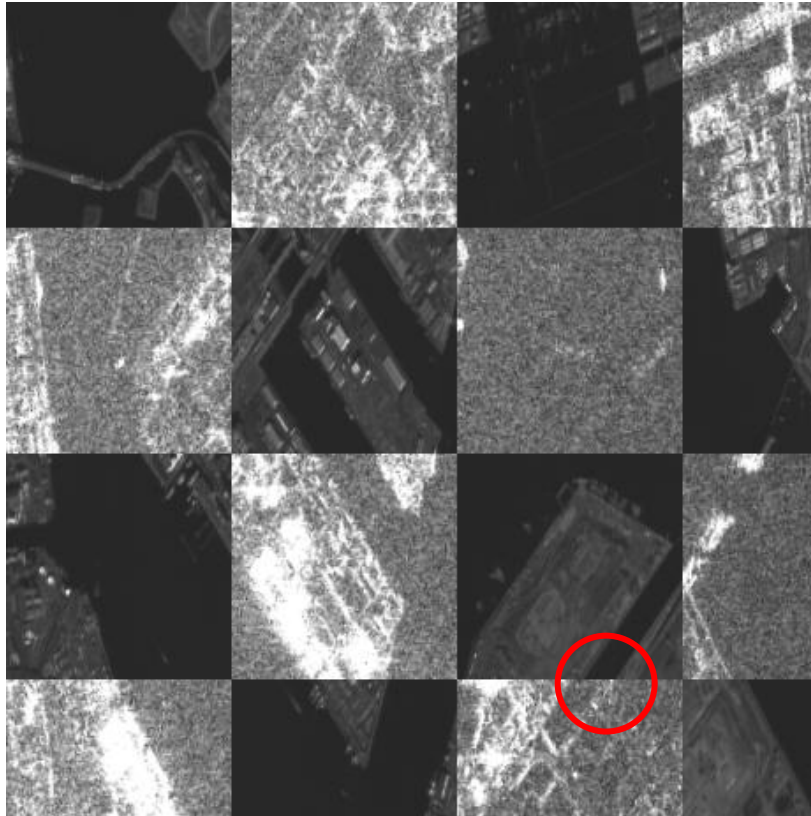


圖 28、測試區一互訊息匹配之棋盤影像

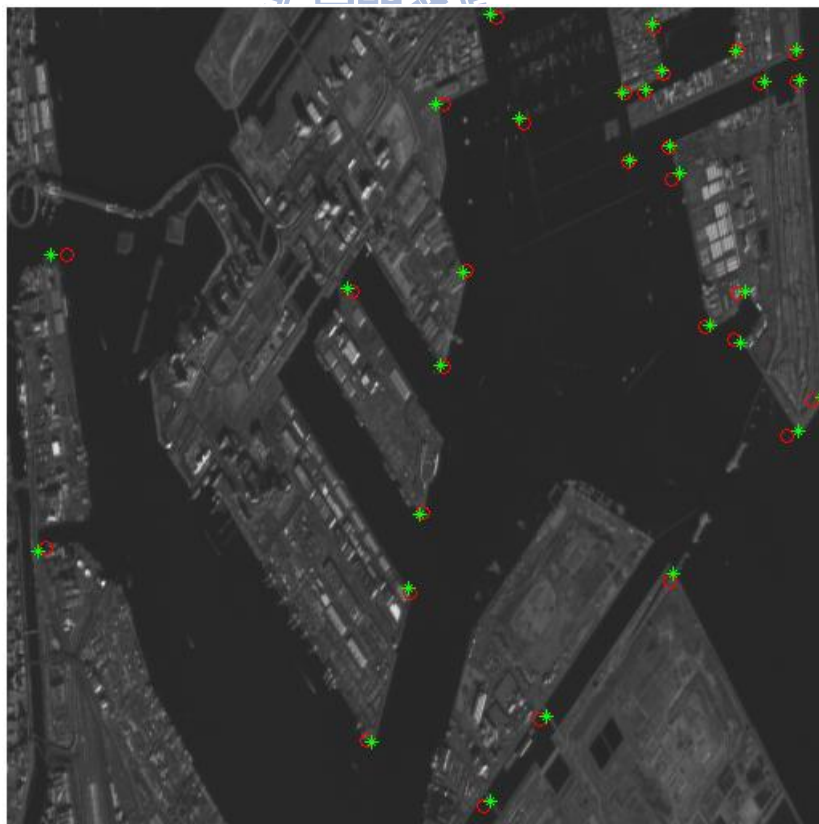


圖 29、測試區一互訊息匹配之檢核點分布圖

5.1.3 測試區一面特徵匹配

利用 watershed segmentation 得到兩張影像的面特徵後，以面積最大的 300 個面特徵進行匹配，距離門檻依據初步套合成果設定為 25 個像元，由 cost function 計算得到的差異值門檻設定為 0.5。圖 30 為面特徵匹配後得到的共軛點分布圖。光學影像的分割成果，陸地區域明顯有過度分割的情形，雷達影像得分割成果則受到雜訊的影響導致分割成果不佳。

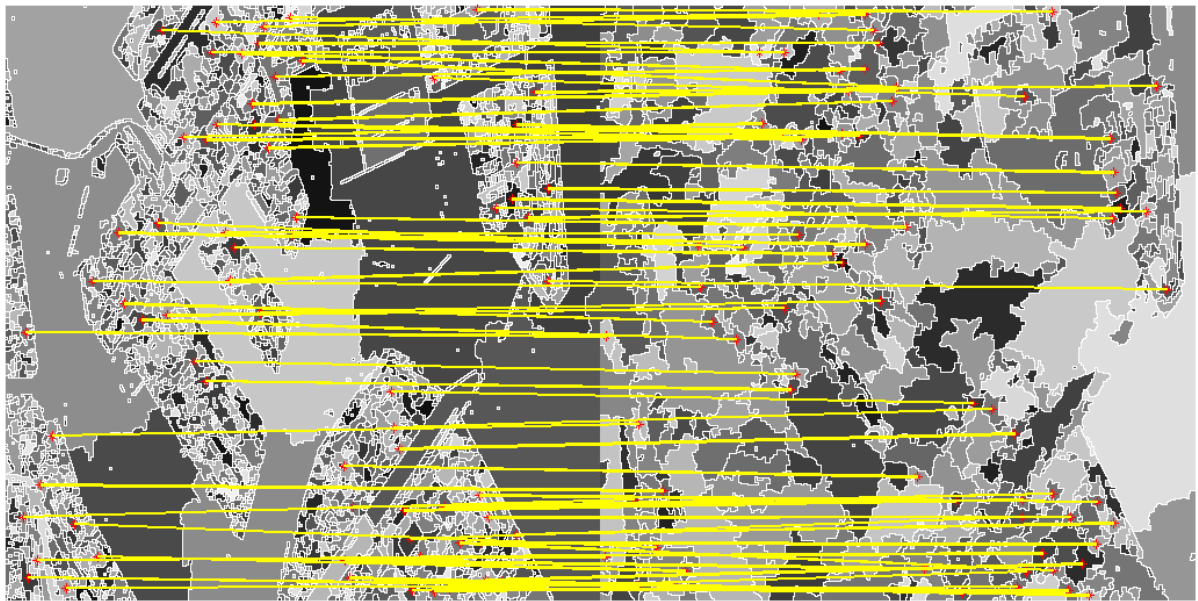


圖 30、測試區一面特徵匹配共軛點分布圖

總共得到 27 組套合點，匹配成功的面特徵平均差異值為 0.3369，匹配成果如表 12 所示。因為在雷達影像中面特徵萃取的過度分割產生許多小面積的面特徵，這些面特徵雖然能夠找到匹配的面特徵並由形心得到套合點，但套合點的品質不好，導致面特徵匹配成果在 Sample 及 Line 方向上的 RMSE 分別為 23.18 及 3.06 個像元，整體匹配精度的 RMSE 值為 23.38 個像元，略優於初步套合，對於初步套合成果並無明顯的改善。圖 31 為面特徵匹配的棋盤影像，紅色圓圈處可以明顯看出套合失敗。圖 32 為檢核點套合後的分布圖，紅色為雷達影像上的檢核點，綠色為光學影像上的檢核點，兩者在 Sample 方向上顯著的差異。

表 12、測試區一面特徵匹配成果

	RMSE (pixel)	Average (pixel)
Distance	23.38	23.04
Sample	23.18	23.02
Line	3.06	-0.89

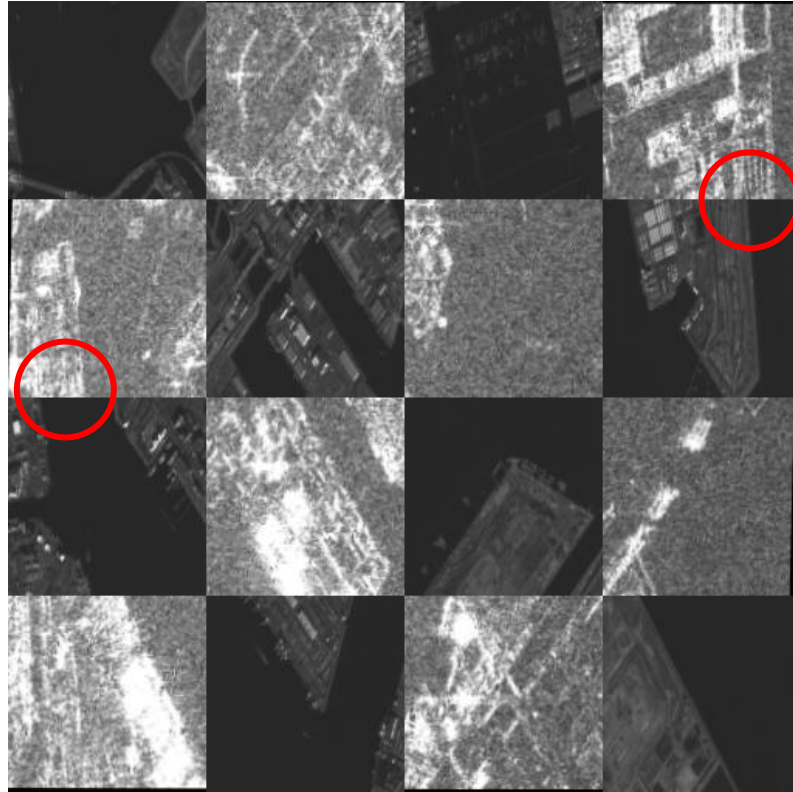


圖 31、測試區一面特徵匹配之棋盤影像

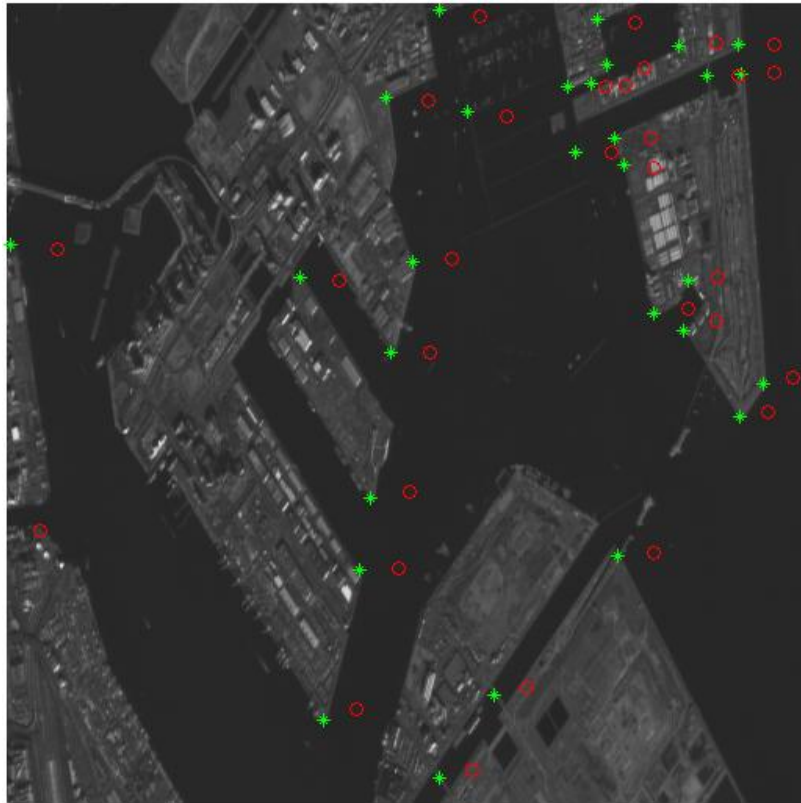


圖 32、測試區一線特徵匹配之檢核點分布圖

5.1.4 測試區一線特徵匹配

利用影像金字塔將影像分成四個階層 Level 3,2,1,0，解析度由粗到細，逐層改善匹配成果，根據初步套合的成果設定搜尋範圍為 25 個像元，距離門檻在 Level 3 為 3 個像元，Level 2 ~ 0 則是以前一層的匹配成果作為門檻。圖 33 為影像金字塔每一層所匹配成功的套合點，由左上至右下分別為 Level 3 ~ 0 的套合點分布圖，黃色為光學影像的套合點，紅色為雷達影像的套合點。解析度粗到細套合點的數量也增多，且分布在影像上的分布均勻，匹配後共得到 12088 個套合點。

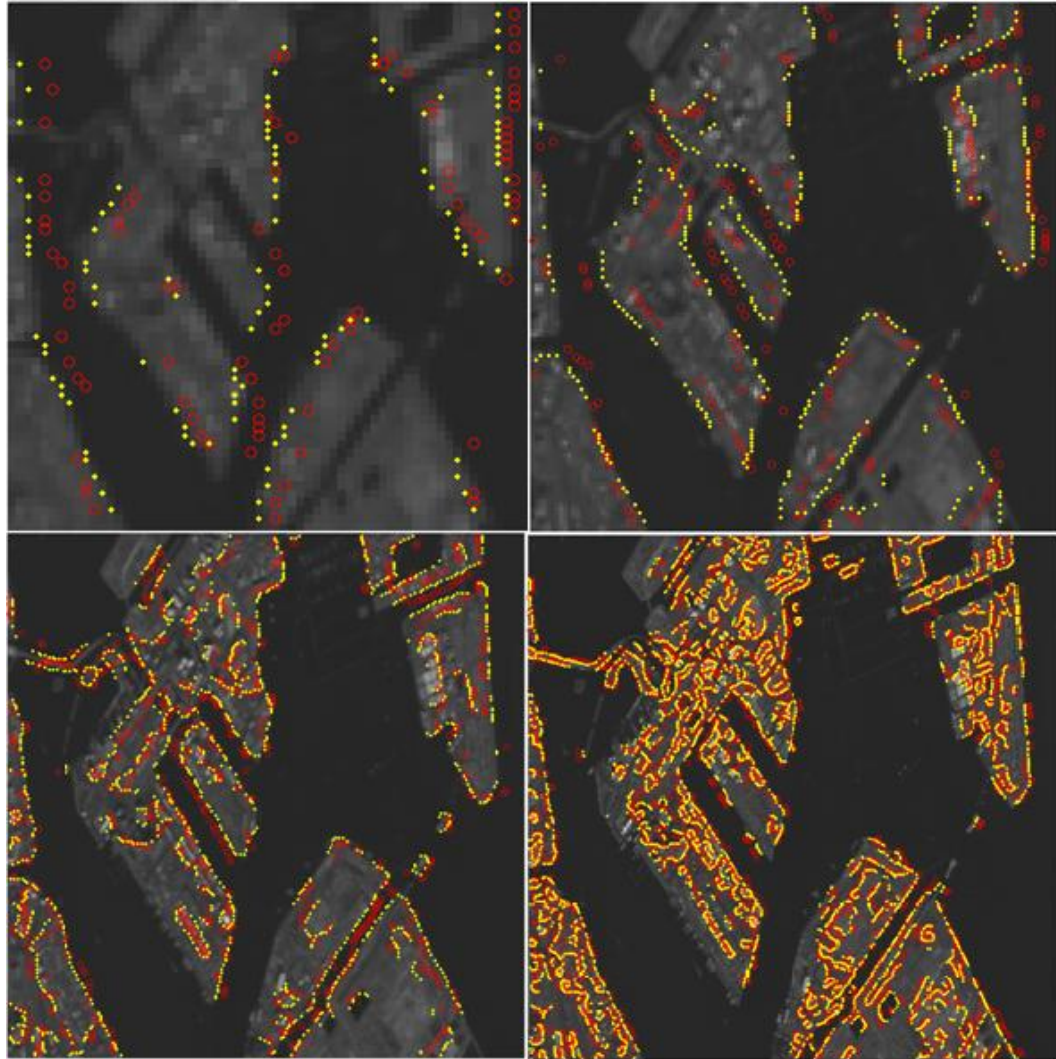


圖 33、測試區一線特徵匹配共軛點分布圖

表 13 及表 14 分別為線特徵匹配成果，雖然初步套合成果很差，尤其是在 Sample 方向上大約有 25 個像元的誤差量，由影像金字塔的逐層匹配改善套合成果，最後在 Level 0 階層 Sample 及 Line 方向的 RMSE 值分別為 2.65 及 2.15 個像元，整體精度為 3.41 個像元。

表 13、測試區一線特徵匹配成果(RMSE)

RMSE (pixel)	Level 3	Level 2	Level 1	Level 0
point	226	801	3217	12088
Distance	4.77	4.21	3.64	3.41
Sample	3.77	3.44	2.95	2.65
Line	2.92	2.43	2.13	2.15

表 14、測試區一線特徵匹配成果(Average)

Average (pixel)	Level 3	Level 2	Level 1	Level 0
Distance	2.66	1.74	1.48	1.42
Sample	1.36	-0.25	-0.57	-0.69
Line	2.29	1.72	1.36	1.24

圖 34 為線特徵匹配成果的棋盤影像，圖 35 為檢核點套合後的分布圖，綠色的點是光學影像上的檢核點，紅色的點是雷達影像上的檢核點。由棋盤影像可以看出線特徵匹配有不錯的套合成果，而紅色圓圈處為套合失敗的地方，推測該處套合失敗的原因可能為雷達影像於該處得線特徵為陸地與海的交界，而光學影像有陸地上地物所形成的線特徵及陸地與海的交界，因為 Line 方向上的變形導致搜尋最鄰近點發生誤判，所以造成套合失敗。檢核點套合後的誤差呈現隨機分布，而沒有偏向特定方向或規律的系統性。

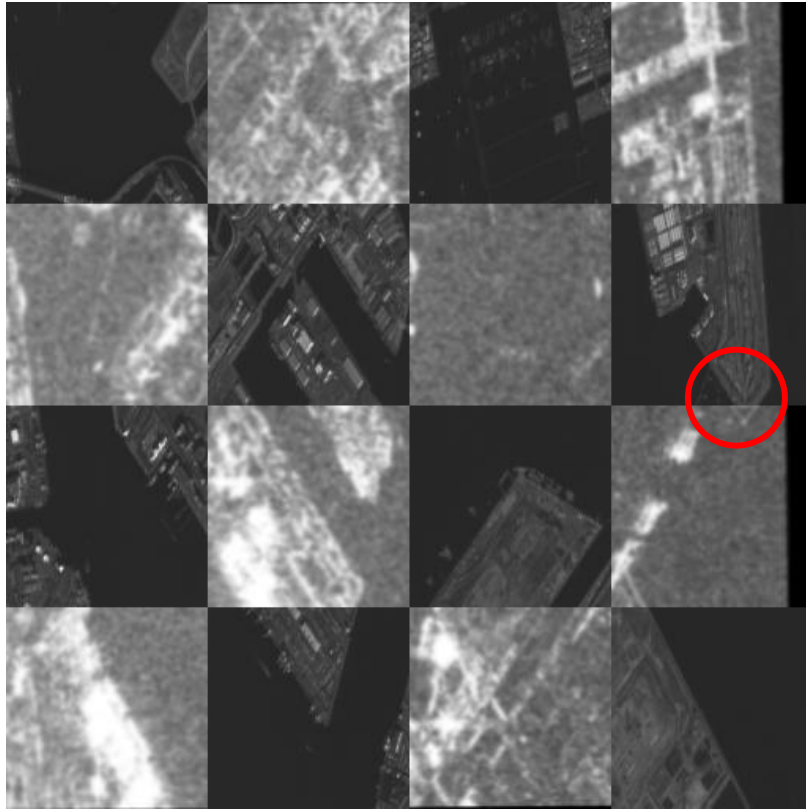


圖 34、測試區一線特徵匹配之棋盤影像

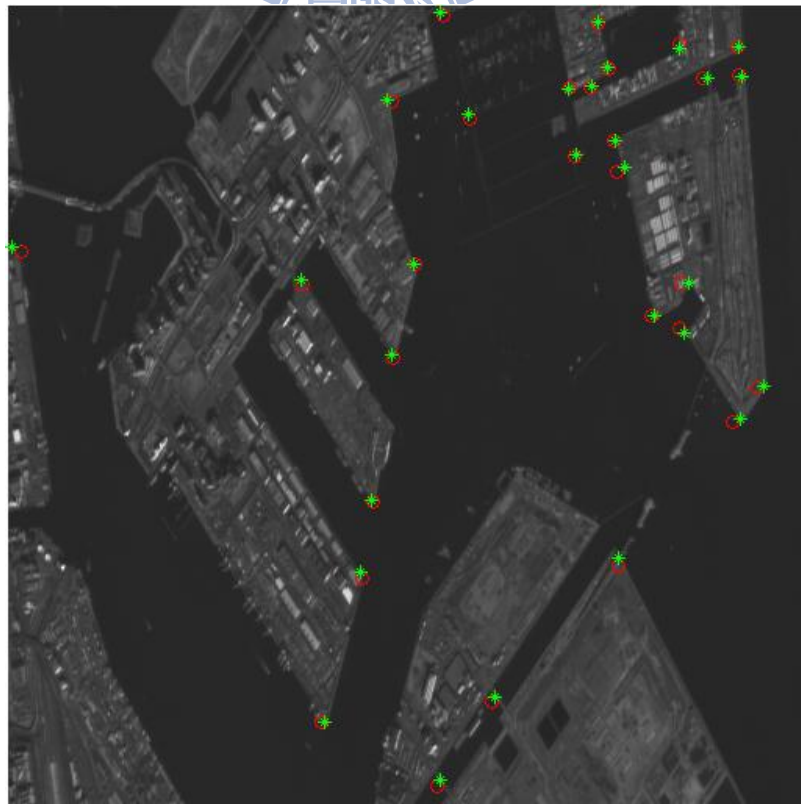


圖 35、測試區一線特徵匹配之檢核點分布

5.1.5 測試區一成果比較

第一組測試區位於地勢較平坦的港口地區，初步套合成果較差，精度大約在 25 個像元，主要的誤差分布在 Sample 方向上。比較三種匹配方法的精度，如表 15 所示，互訊息匹配明顯改善了初步套合的誤差，面特徵匹配對於初步套合誤差的改善則非常有限，線特徵匹配對於初步套合成果則有相當大的改善。由此結果可知，互訊息匹配在初步套合存在平移誤差的改善則非常顯著，尺度方面的誤差，如兩側檢核點偏向中心則無法改善，面特徵匹配對於初始套合的精度要求較高，當初步套合的精度較差時，此種匹配方法的效果較差。線特徵由於採用影像金字塔的匹配流程，由解析度較粗的圖層進行匹配，並逐層改善匹配成果。

表 15、測試區一成果比較

RMSE (pixel)	Manual	MI	Region	Edge
Distance	25	4.27	23.38	3.41
Sample	24.92	3.77	23.18	2.65
Line	2.01	2.01	3.06	2.15

5.2 測試區二成果分析

以人工量測 30 個共軛點作為檢核點，如圖 36 所示，左為光學影像，右為雷達影像，由於地表覆蓋物多為植被難以量測明確的檢核點，因此檢核點大致上分布在水體的四周，對於整張影像而言檢核點的分布相較於測試區一較為集中。

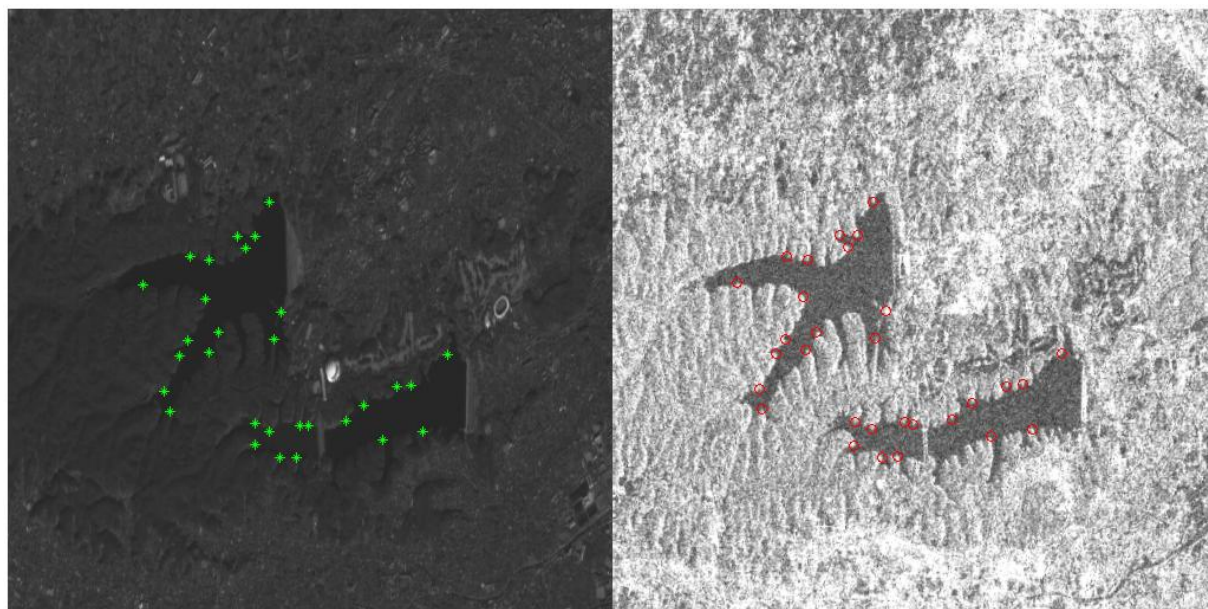


圖 36、測試區二檢核點分布圖

5.2.1 測試區二初步套合

表 16 為初步套合成果，初步套合成果在 Sample 方向上的 RMSE 值約為 5.07 個像元，Line 方向上的 RMSE 值為 1.53 個像元，整體套合精度的 RMSE 值為 5.30 個像元。套合精度在 Sample 方向上比 Line 方向差，如同測測試區一的初步套合成果。Sample 方向為雷達掃描的方向，而 Line 方向為衛星飛行方向，造成 Sample 方向上的精度不如 Line 方向。圖 37 為初步套合的棋盤影像，觀察影像中湖泊邊緣線的連續性，套合成果大致上沒有太大的錯誤，圖中紅色圓圈處為差異較大的地方，造成的原因可能為兩種影像的成像方式不同，在測試區二的山區地形更顯現其差異。

表 16、測試區二初步套合成果

	RMSE (pixel)	Average (pixel)
Distance	5.30	2.57
Sample	5.07	2.28
Line	1.53	1.18

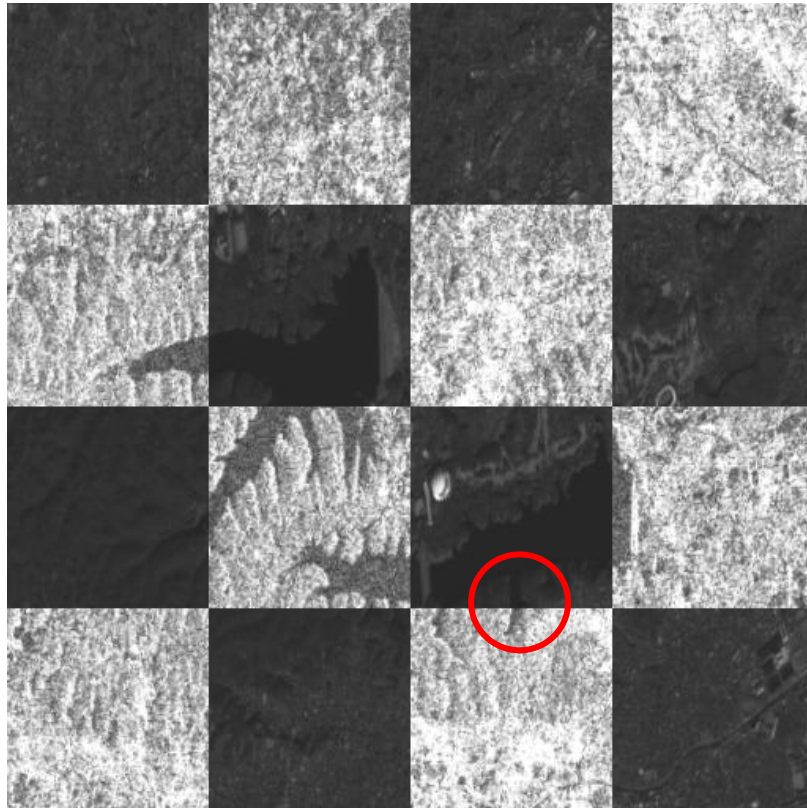


圖 37、測試區二初步套合之棋盤影像

5.2.2 測試區二互訊息匹配

圖 38 為雷達影像在光學影像上移動計算得到互訊息資訊量矩陣的三維圖形。互訊息資訊量的峰值為 0.0654 位於(2, 1)。峰值並沒有非常高，由於光學影像和雷達影像的灰度值差異很大，造成計算得到的互訊息資訊量普遍偏低。峰值的位置非常靠近原點，表示初步套合成果有與互訊息匹配成果非常相近。

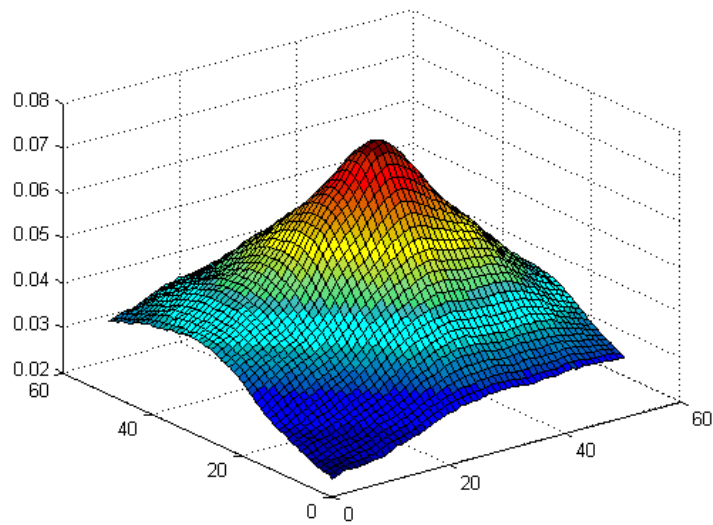


圖 38、測試區二互訊息資訊量矩陣圖

表 17 為互訊息匹配成果，RMSE 值在 Sample 及 Line 方向上分別為 4.54 和 0.99 個像元，整體匹配精度為 4.65 個像元，平均誤差為 0.33 個像元。互訊息匹配法對於初步套合成果的改善有限，RMSE 值與初步套合作比較僅減少大約 0.7 個像元。由平均誤差則可以看出互訊息匹配改善了系統性誤差，使平均誤差趨近於 0。圖 39 為互訊息匹配的棋盤影像，由於平移的改正量為 1 和 2 個像元，從棋盤影像上觀察與初步匹配成果並沒有太大的差異。圖 40 為套合後檢核點的分布圖，綠色為光學影像上的檢核點，紅色為雷達影像上的檢核點，可以明顯發現雷達影像上的檢核點在 Line 方向上由中心向兩邊擴散，這是因為影像受到地形效應的影響，所以在掃描方向上產生變形，而互訊息匹配僅計算兩張影像套合的平移參數，無法將吸收尺度上的差異。

表 17、測試區二互訊息匹配成果

	RMSE (pixel)	Average (pixel)
Distance	4.65	0.33
Sample	4.54	0.28
Line	0.99	0.18

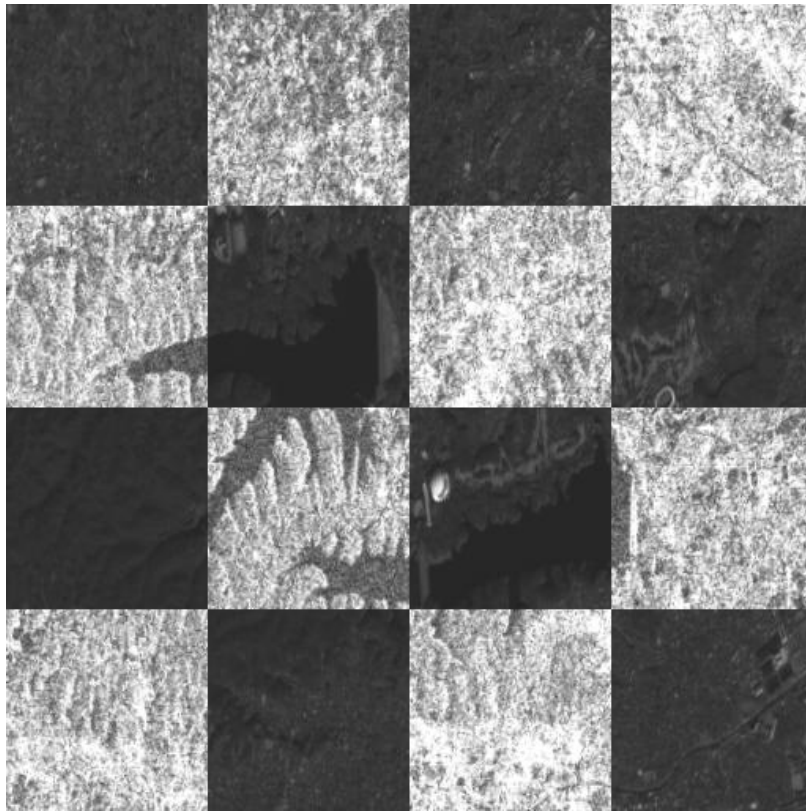


圖 39、測試區二互訊息匹配之棋盤影像

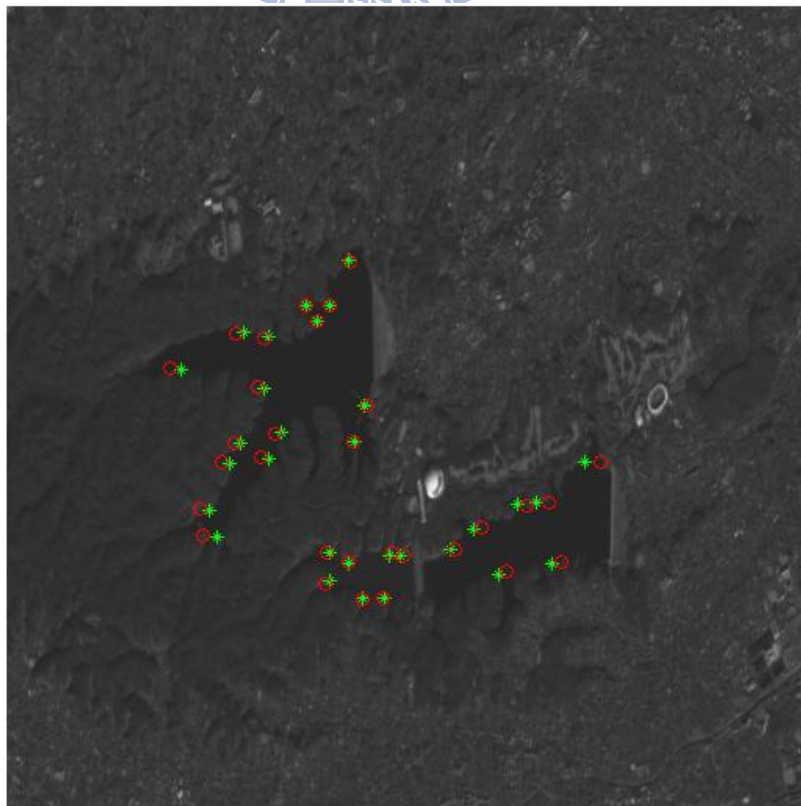


圖 40、測試區二互訊息匹配之檢核點分布圖

5.2.3 測試區二面特徵匹配

以面積最大的300個面特徵進行匹配，距離門檻依據初步套合成果設定為5個像元，由 cost function 計算得到的相似度值門檻設定為0.5。圖41為面特徵匹配後得到的套合點分布圖。測試區二由水體構成的三個面特徵為最明顯的面特徵，其中兩個面特徵能夠正確匹配到相對應的面特徵，圖中黑色圓圈處的面特徵在光學和雷達影像中都能清楚的辨識，卻無法匹配成功，其原因為兩者的形心位置大於距離門檻，所以無法匹配成功。

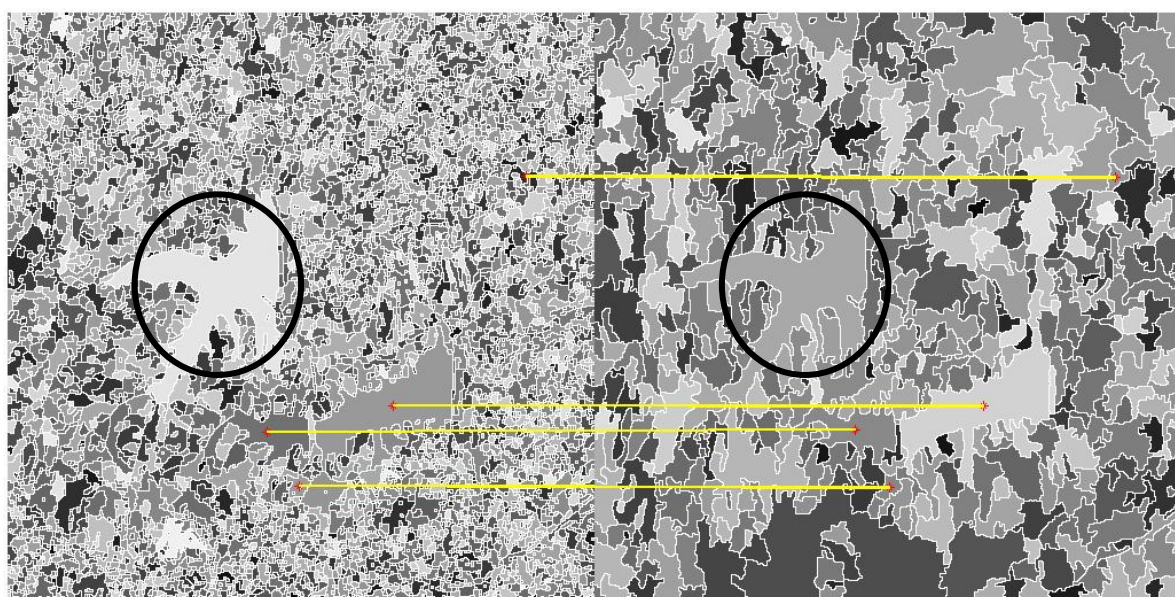


圖 41、測試區二面特徵匹配共軛點分布圖

總共得到4組共軛點，匹配成功的面特徵平均差異值為0.3399。匹配成果如表18所示，Sample及Line方向分別為3.58和2.74個像元，整體精度的RMSE值為4.51個像元，相較於初步套合成果減少約0.8個像元，成果的改善並不明顯。平均誤差值為1.52個像元，略優於初步套合成果。圖42為面特徵匹配的棋盤影像，此測試區匹配成功的套合點只有4對，且套合點的分布不均，圖中紅色圓圈處為影像套合失敗的地方，該處缺少套合點，所以無法得到較好的套合成果。圖43為面特徵匹配後檢核點的分布圖，大多數的檢核點都能看出明顯的偏差。

表 18、測試區二面特徵匹配成果

	RMSE (pixel)	Average (pixel)
Distance	4.51	1.52
Sample	3.58	0.94
Line	2.74	-1.20

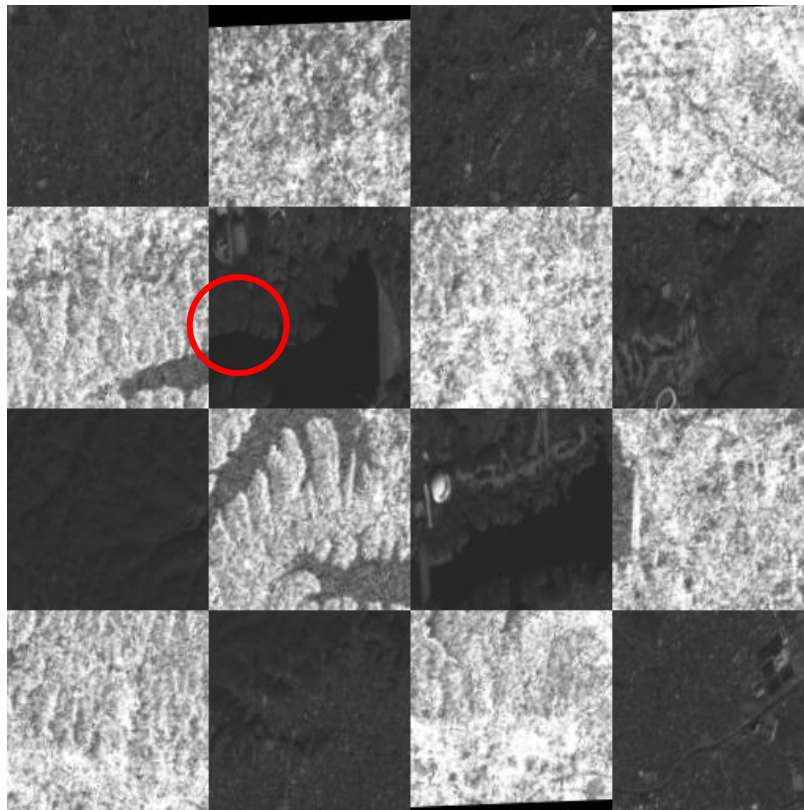


圖 42、測試區二面特徵匹配之棋盤影像

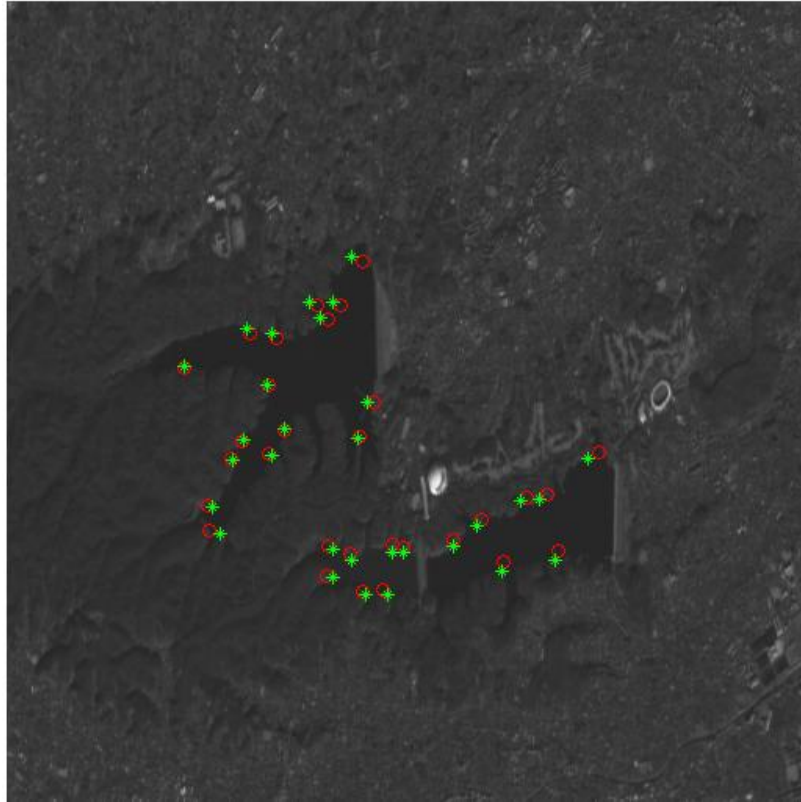


圖 43、測試區二面特徵匹配之檢核點分布圖

5.2.4 測試區二線特徵匹配

依據初步套合的成果搜尋視窗設定為 5 個像元，距離門檻為 3 個像元，圖 44 為影像金字塔每一階層匹配後得到的套合點分布圖，由左上至右下分別為 Level 3 ~ 0 階層，可以發現在 Level 3 階層線特徵與影像的邊緣線似乎沒有完全吻合，這是因為利用 Canny 萃取線特徵時會以高斯濾波進行影像平滑，在 Level 3 階層的影像已經過三次高斯濾波處理，因此線特徵萃取時會有扭曲的情形發生。

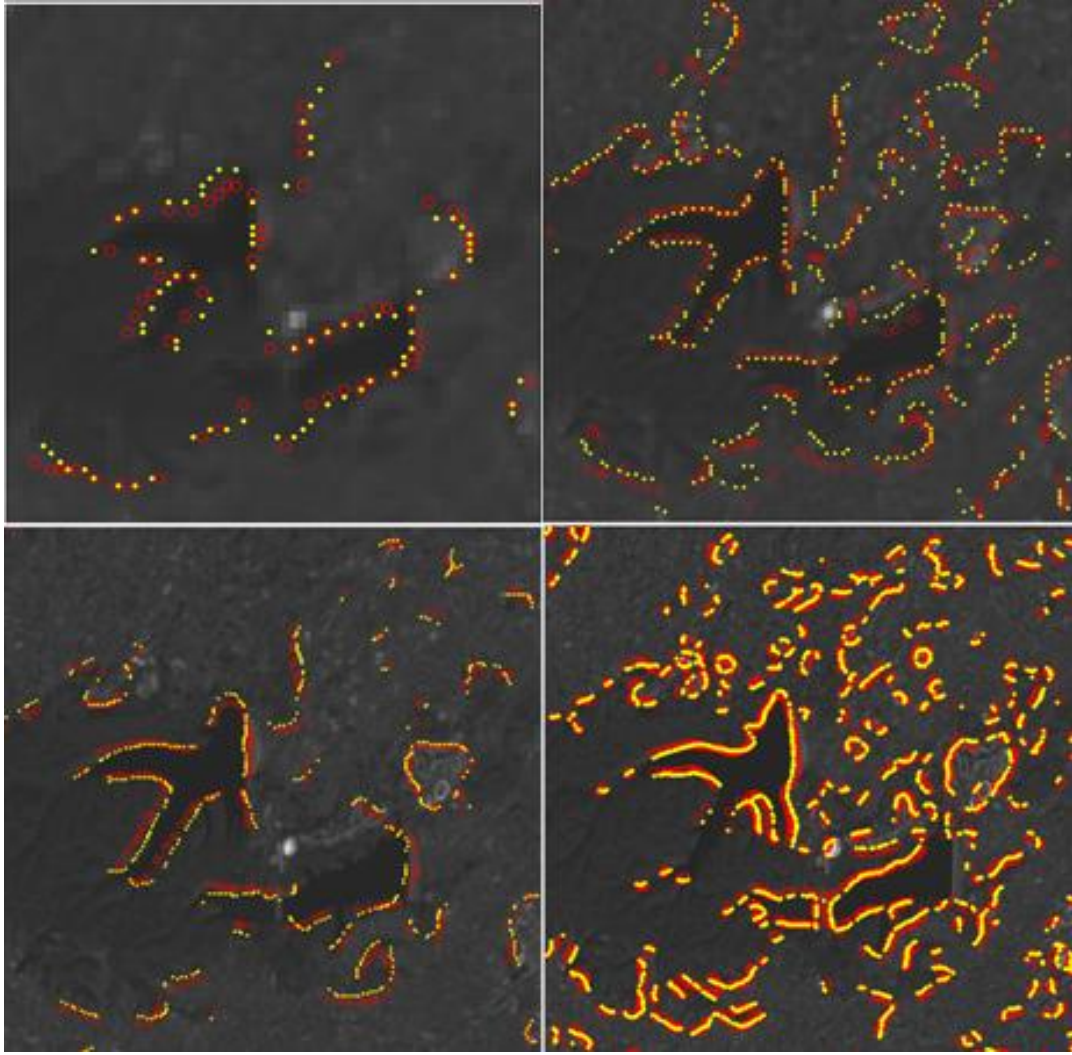


圖 44、測試區二線特徵匹配共軛點分布圖

表 19 及表 20 為線特徵匹配成果，Level 0 線特徵匹配精度在 Sample 及 Line 方向的 RMSE 值為 1.70 及 1.32 個像元，整體精度的 RMSE 值約為 2.15 個像元，平均誤差則為 1.62 個像元。相較於其他兩種匹配方法，線特徵匹配能有效的改善初步套合成果，整體精度的 RMSE 值大約減少 3.25 個像元。相較於測試區一，測試區二為地形起伏較大的山區地形影像受到的地形效應，將會使影像的套合成果較差，在本研究卻有相反的結果，其可能原因為測試區一雷達影像受到斑駁雜訊的影響降低檢核點的品質，且測試區一檢核點的分布較為均勻，而測試區二的檢核點分布則集中在影像的特定區域，導致檢核點無法有效檢核整張影像的套合精度。

表 19、測試區二線特徵匹配成果(RMSE)

RMSE (pixel)	Level 3	Level 2	Level 1	Level 0
Point	794	1856	3580	3580
Distance	4.15	3.95	3.00	2.15
Sample	4.02	3.72	2.55	1.70
Line	1.01	1.32	1.57	1.32

表 20、測試區二線特徵匹配成果(Average)

Average (pixel)	Level 3	Level 2	Level 1	Level 0
Distance	0.65	1.23	1.93	1.62
Sample	0.65	1.01	1.93	1.43
Line	-0.09	0.70	0.09	0.76

圖 45 為線特徵匹配後的棋盤影像，紅色圓圈處為匹配後出現錯誤的地方，由測試區二原始的光學影像及雷達影像可以發現該處在影像中有明顯的差異，在光學影像中可以看到明顯的人造建物位於影像中水體的右側，而雷達影像中該人造建物僅為一不明顯的線狀區塊，此差異也造成該處的套合失敗。圖 46 為匹配後檢核點的分布圖，可以發現大部分的檢核點差異均非常小甚至重疊，由於檢核點僅分布在水體周圍，因此只能斷定線特徵套合在水體周圍的區域能有不錯的成果。

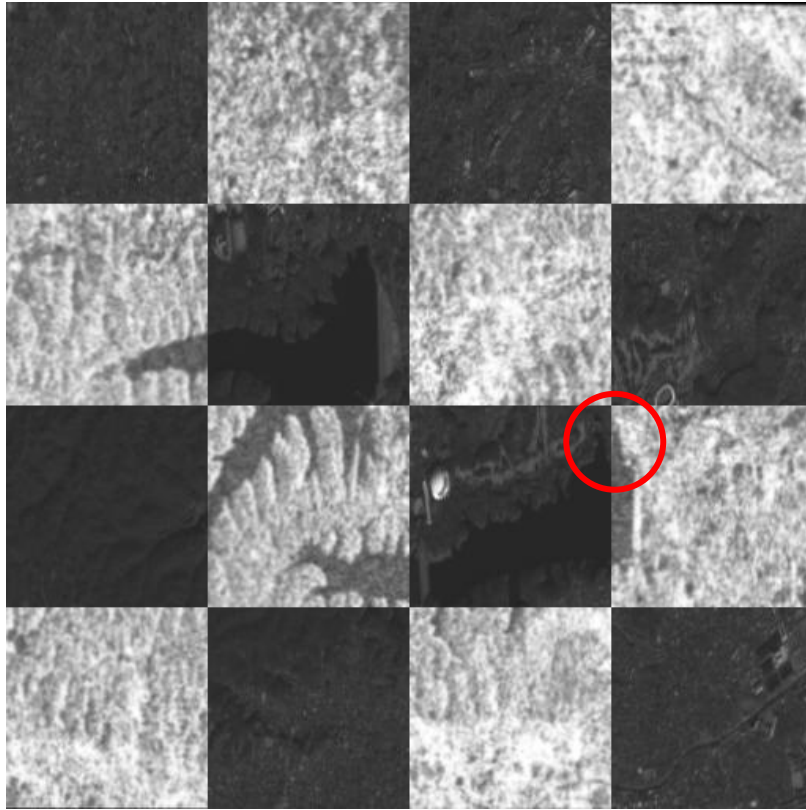


圖 45、測試區二線特徵匹配之棋盤影像

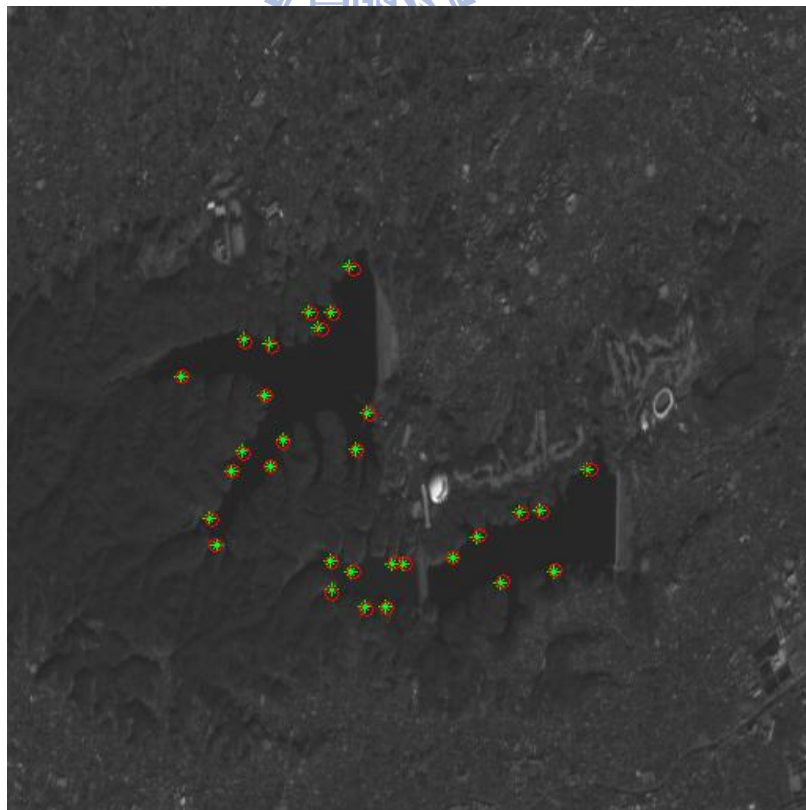


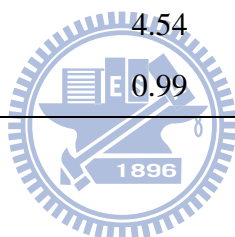
圖 46、測試區二線特徵匹配之檢核點分布圖

5.2.5 測試區二成果比較

第二組測試區位於地勢較高的區域，平均海拔高度約為 130 公尺，地表覆蓋物為水體、植被及人造建物。初步套合及三種精密匹配方法的成果如表 21 所列。以整體的匹配精度而言，互訊息匹配略遜於面特徵匹配，由互訊息匹配後的檢核點分布圖可以發現，第二組測試區因為地形效應的影響，在尺度上的變化較大。檢核點的量測主要分布在水體的周圍，面特徵匹配正是以水體為主要的特徵，且水體的面積在影像中相對較大，但由於套合點的分布不佳，造成有些區域缺少套合點而無法得到好的套合成果。線特徵匹配在此測試區仍有不錯的套合成果。

表 21、測試區二成果比較

RMSE (pixel)	Manual	MI	Region	Edge
Distance	5.30	4.65	4.51	2.15
Sample	5.07	4.54	3.58	1.70
Line	1.53	0.99	2.74	1.32



5.3 測試區三成果分析

第三組測試區位在桃園一帶，以人工量測 30 個共軛點作為檢核點，如圖 47 所示，左為光學影像，右為雷達影像。檢核點的位置主要在影像中水體的邊緣，檢核點大致上能夠均勻分布在影像上。由於雷達影像的雜訊影響，量測檢核點時容易造成誤差。

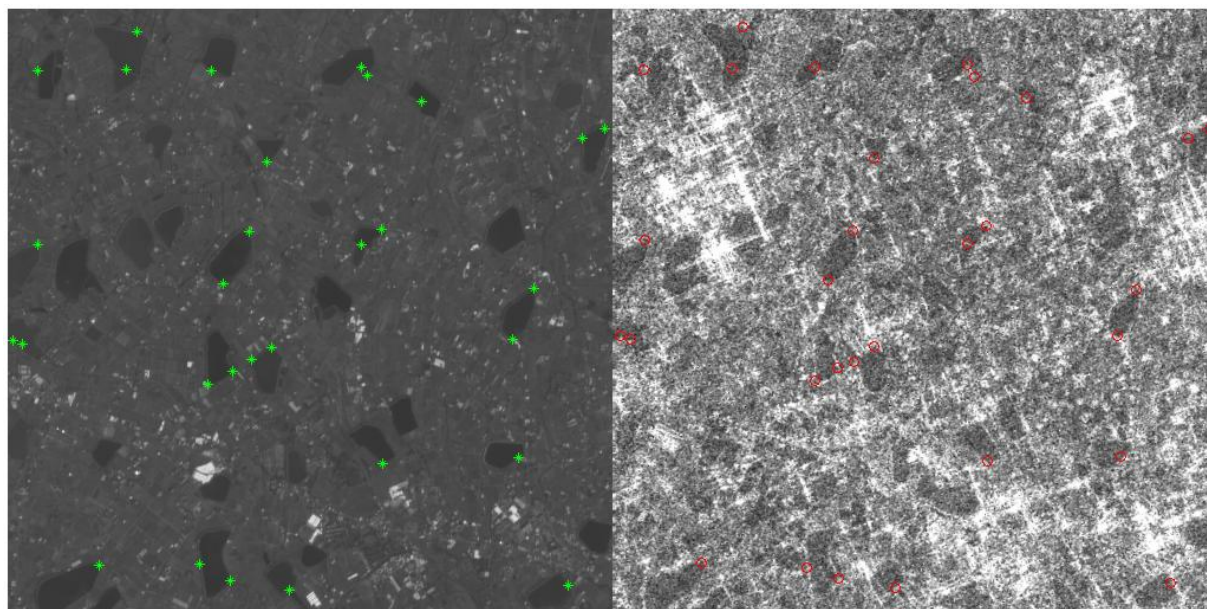


圖 47、測試區三檢核點分布圖

5.3.1 測試區三初步套合

以人工量測三個共軛點進行初步套合，如表 22 所示，Sample 及 Line 方向的 RMSE 值分別是 1.49 及 2.51 個像元，整體套合精度 RMSE 值為 2.92 個像元，此測試區是由正射光學影像及經過地形改正的雷達影像，因此以人工量測少量控制點的初步套合就能夠有不錯的套合精度。圖 48 為初步套合的棋盤影像，由於套合精度約為 3 個像元，在棋盤影像上並無明顯的誤差。

表 22、測試區三初步套合成果

	RMSE (pixel)	Average (pixel)
Distance	2.92	1.80
Sample	1.49	-0.52
Line	2.51	1.72

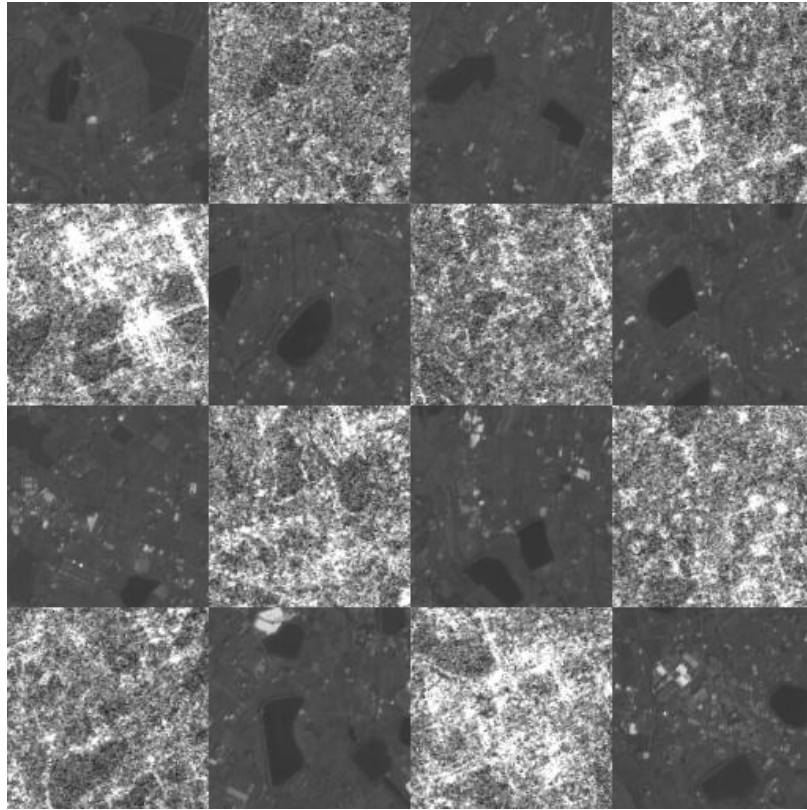


圖 48、測試區三初步套合成果之棋盤影像

5.3.2 測試區三互訊息匹配

圖 49 為雷達影像在光學影像上移動計算得到互訊息資訊量矩陣的三維圖形。互訊息資訊量的峰值約為 0.04，位於坐標(0, 2)，同樣受到兩種影像的成像方式不同而沒有得到較高的峰值，但相較於周圍的互訊息資訊量，峰值的位置明顯高於其他位置。不同於前兩組測試區互訊息匹配的矩陣圖較為平緩，主要因為此測區的地貌結構較為複雜，互訊息匹配得到的套合位置也較為可靠。

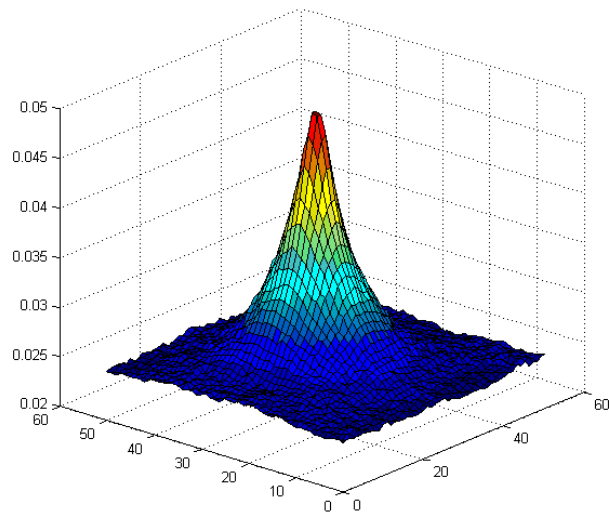


圖 49、測試區三互訊息資訊量矩陣圖

表 23 為互訊息匹配成果，RMSE 值在 Sample 及 Line 方向上分別為 1.49 和 1.85 個像元，整體匹配精度為 2.38 個像元，平均誤差為 0.59 個像元，兩方向上的套合精度差異不大，由於兩張影像均經過地形校正減小地形效應所造成的影響，初步套合成果已經有一定的品質，對於初步套合成果的改善有限。圖 50 為互訊息匹配的棋盤影像，觀察棋盤影像的套合情形，兩張影像的套合並沒有太大的問題存在。圖 51 為套合後檢核點的分布圖，檢核點的誤差分布呈現隨機分布，沒有明顯的系統性誤差，且檢核點的誤差均不大。

表 23、測試區三互訊息匹配成果

	RMSE (pixel)	Average (pixel)
Distance	2.38	0.59
Sample	1.49	-0.52
Line	1.85	-0.28

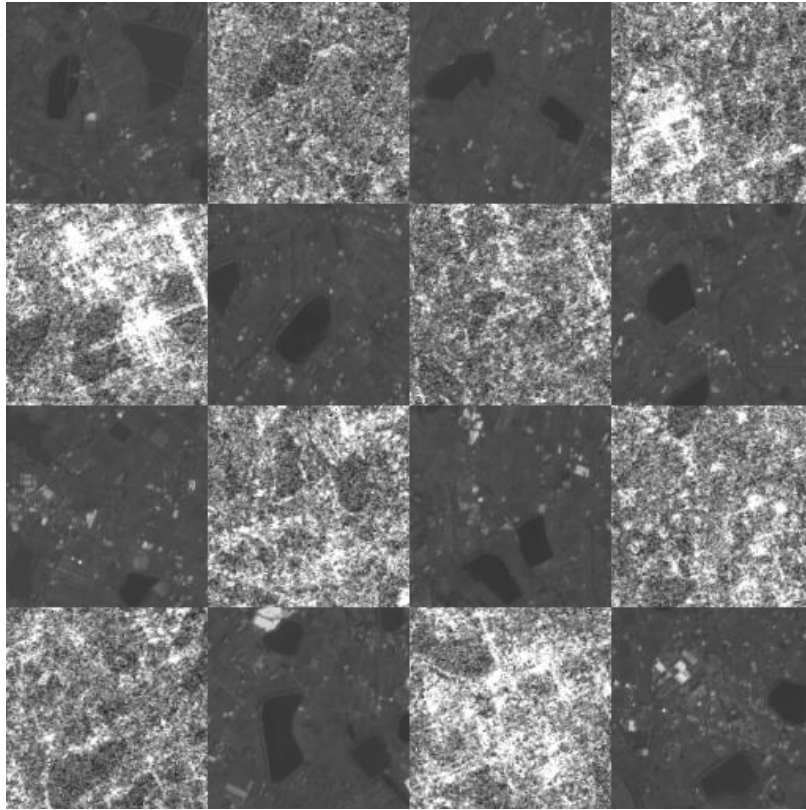


圖 50、測試區三互訊息匹配之棋盤影像

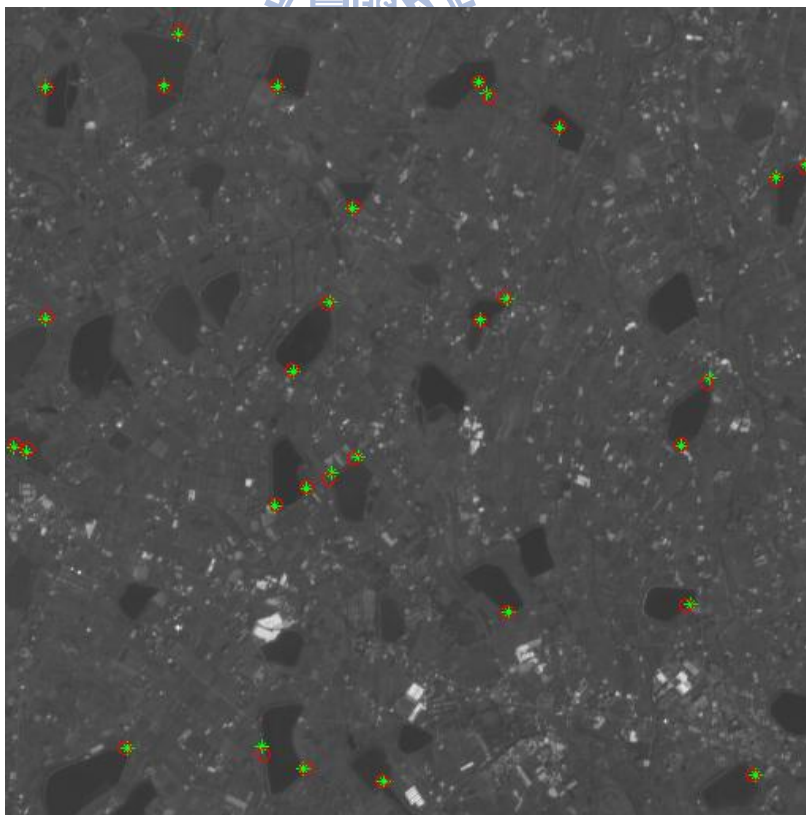


圖 51、測試區三互訊息匹配之檢核點分布圖

5.3.3 測試區三面特徵匹配

測試區三的以面積最大的 500 個面特徵進行匹配，距離門檻依據初步套合成果設定為 3 個像元，由 cost function 計算得到的相似度值門檻設定為 0.5。圖 52 為面特徵匹配後得到的共軛點分布圖。由圖中可以發現，有一部分套合點的位置如預期分布在水體的形心位置並能夠找到相對應的面特徵，有一部分的套合點則位於光學影像中看似均調的位置，並同樣能找到相對應的點。

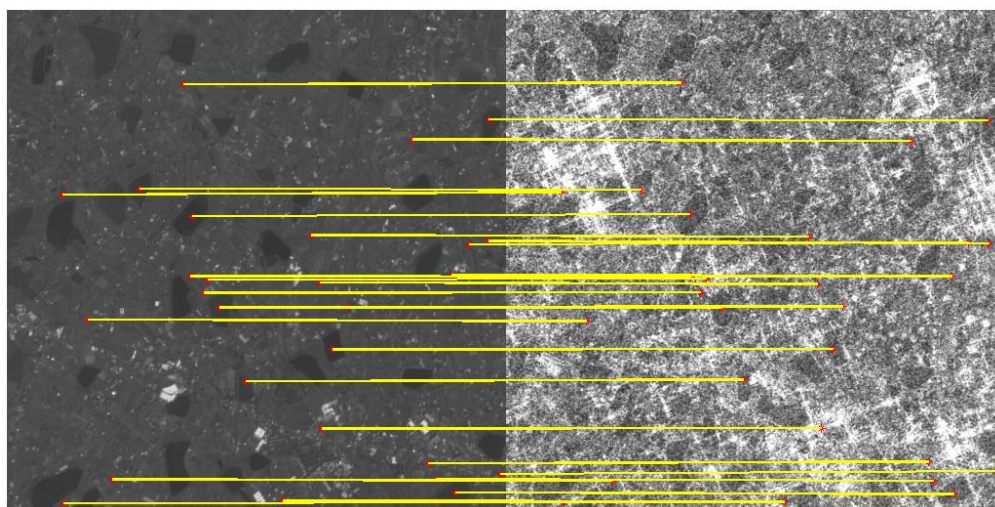


圖 52、測試區三面特徵匹配共軛點分布圖

匹配成功的面特徵有 27 個，cost function 計算得到的差異值平均為 0.3279，匹配成果如表 24 所示。套合成果的 RMSE 值在 Sample 方向上為 1.55 個像元，Line 方向上為 2.20 個像元，平均誤差為 1.44 個像元，受到雷達雜訊的影響及影像過度分割，使得小面積的面特徵匹配錯誤，對於初步套合成果改善不理想。圖 53 為面特徵匹配的棋盤影像，由圖中水體的輪廓線看出套合成果沒有太大的錯誤。圖 54 為匹配成果的檢核點分布圖，以人眼觀察檢核點的差異略大於互訊息匹配成果，由圖可知檢核點的誤差方向沒有一定的系統性。

表 24、測試區三面特徵匹配成果

	RMSE (pixel)	Average (pixel)
Distance	2.69	1.44
Sample	1.55	-0.56
Line	2.20	1.33

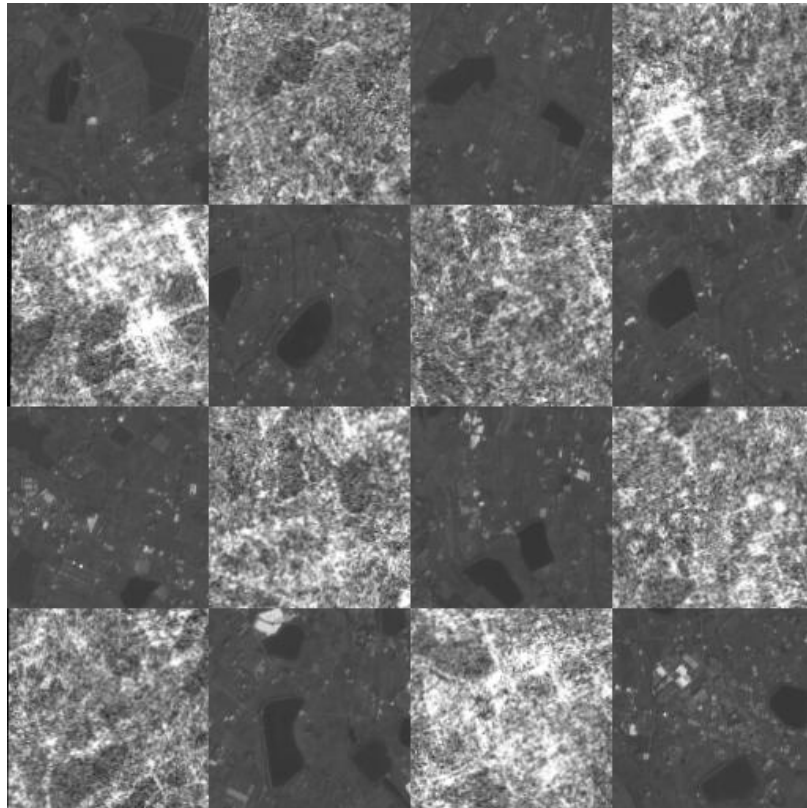


圖 53、測試區三面特徵匹配之棋盤影像

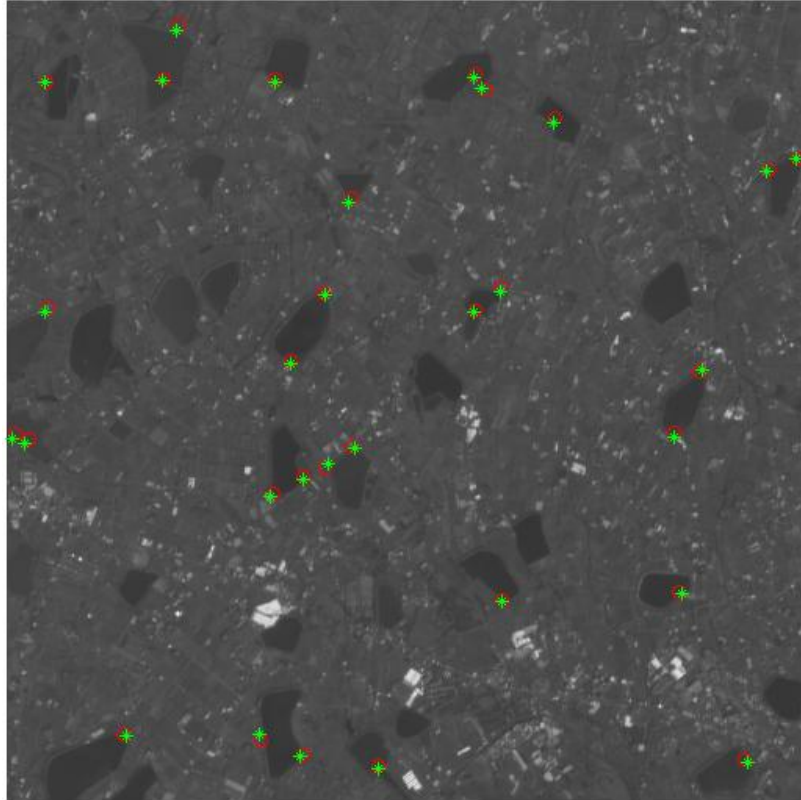


圖 54、測試區三面特徵匹配之檢核點分布圖

5.3.4 測試區三線特徵匹配

依據初步套合的成果搜尋視窗設定為 3 個像元，距離門檻為 3 個像元，圖 55 為影像金字塔每一階層匹配後得到的套合點分布圖，由左上至右下分別為 Level 3 ~ 0 階層。在 Level 3 階層影像中，線特徵受到影像平滑化而較不明顯，透過線特徵匹配僅能得到少量的套合點，在 Level 0 階層中水體的邊緣線非常明顯，但由於地貌結構非常複雜，導致許多雜亂不明顯的線特徵亦被萃取出並匹配成功。

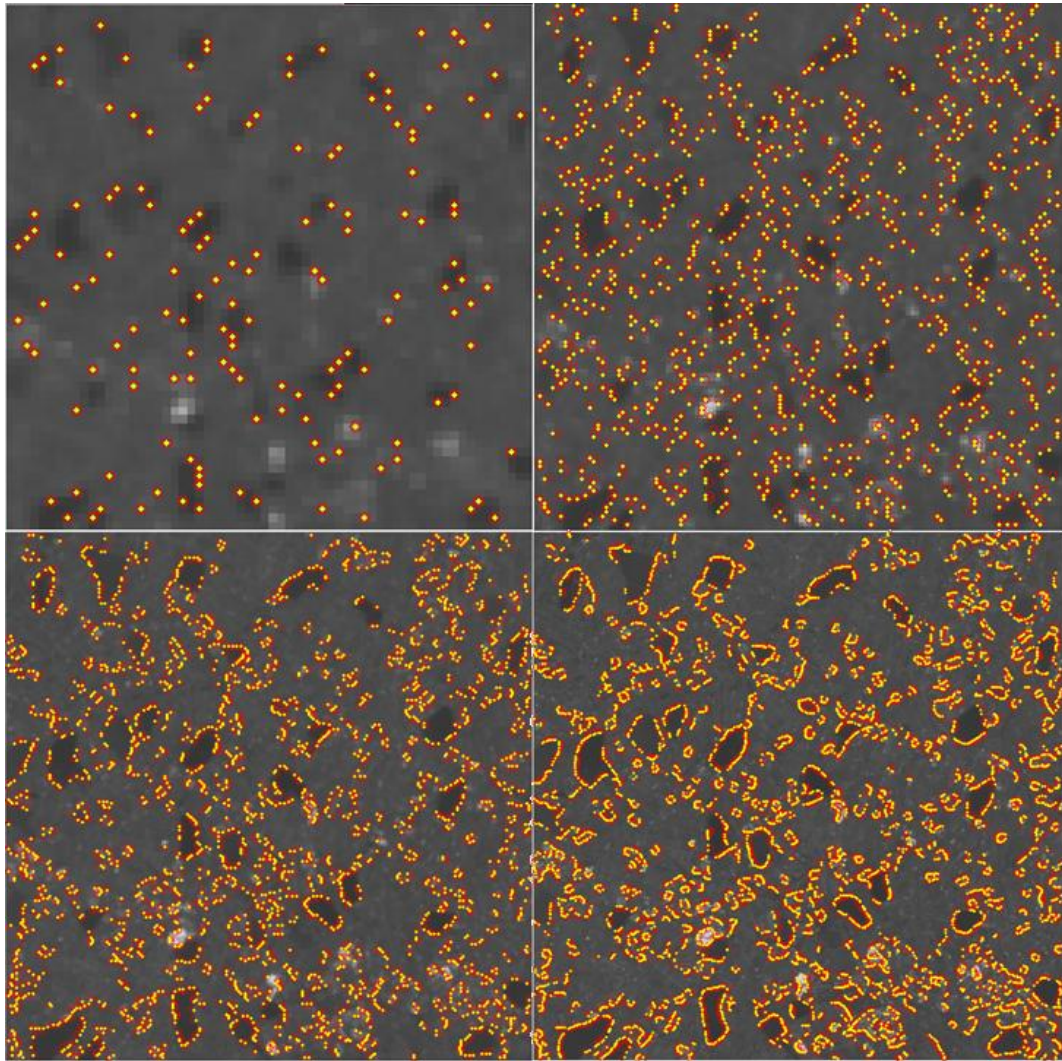


圖 55、測試區三線特徵匹配共軛點分布圖

表 25 及表 26 為線特徵匹配成果，Level 0 線特徵匹配精度在 Sample 及 Line 方向的 RMSE 值為 1.50 及 2.15 個像元，整體精度的 RMSE 值約為 2.62 個像元，與面特徵的套合成果相近，平均誤差則為 1.31 個像元，共可得到 41211 個套合點。對於初步套合成果的改善有限，推測可能的原因為此測區的地貌結構較為複雜，使得光學影像的線特徵萃取受到影響，而由於雷達影像為 fine mode 獲取模式的單觀點 (single look) 影像保有較高解析度，但是同樣具有較高的斑駁雜訊，即使經過 Lee filter 處理後仍無法完全消除，導致套合成果不佳。

表 25、測試區三線特徵匹配成果(RMSE)

RMSE (pixel)	Level 3	Level 2	Level 1	Level 0
Point	297	2221	10057	41211
Distance	2.92	2.72	2.70	2.62
Sample	1.49	1.61	1.55	1.50
Line	2.51	2.19	2.21	2.15

表 26、測試區三線特徵匹配成果(Average)

Average (pixel)	Level 3	Level 2	Level 1	Level 0
Distance	1.80	1.42	1.39	1.31
Sample	0.52	0.85	0.76	0.69
Line	-1.72	-1.13	-1.16	-1.11

圖 56 及圖 57 為線特徵匹配後的棋盤影像及檢核點的分布圖，以人眼觀察棋盤影像同樣無法明確指出套合成果的錯誤，觀察位於兩種影像交界處的水體邊界均沒有錯位的情形。由檢核點分布圖則可以發現絕大部分的誤差都很小，少數幾個誤差稍大，且誤差的方向呈現均勻分布。

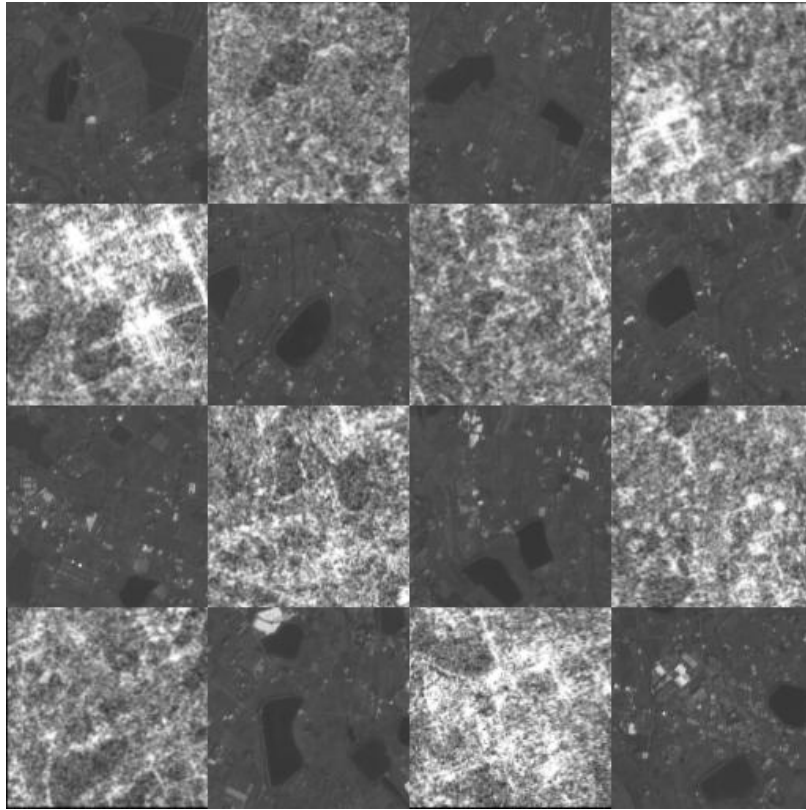


圖 56、測試區三線特徵匹配之棋盤影像

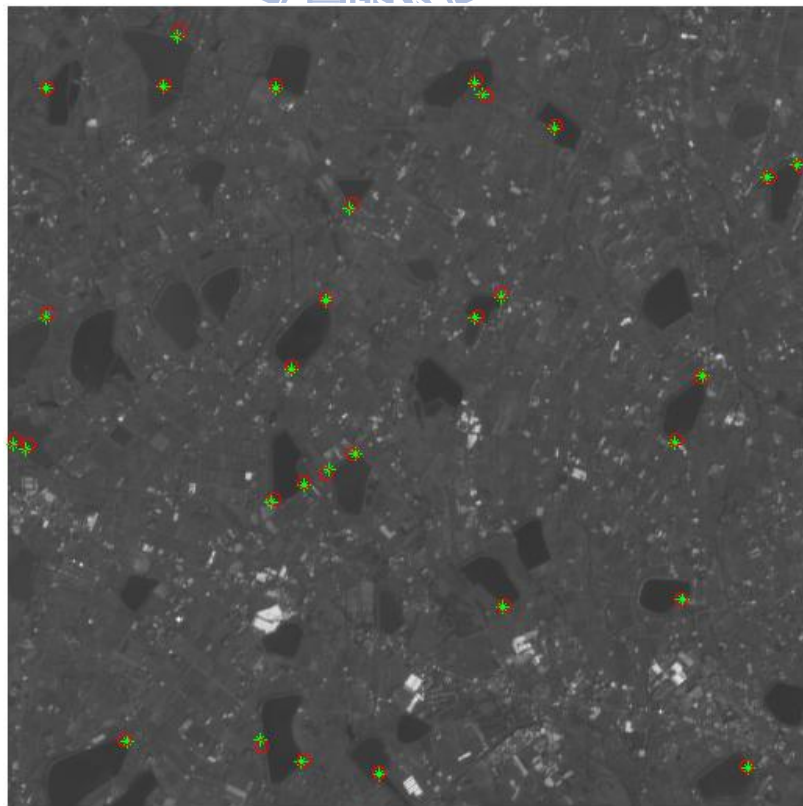


圖 57、測試區三線特徵匹配之檢核點分布圖

5.3.5 測試區三成果比較

第三組測試區原始影像的影像等級，光學影像是正射影像，雷達影像是 Level 1.5，並且以人工量測三個控制點作為初步套合，初步套合成果以人工量測的 30 個檢核點進行檢核，其 RMSE 值為 2.92 個像元，成果優於測試區一及測試區二，因為此測試區所採用的影像等級較好，經過地形改正消除了地形效應所帶來的影像，因此在初步套合即有不錯的成果。表 27 為三種方法於測試區三的精密匹配成果，其中互訊息匹配的 RMSE 值為 2.38 個像元為最佳，線特徵及面特徵的成果相近，RMSE 值分別為 2.62 及 2.69 個像元。互訊息匹配在此測試區的表現最好，由於此測試區的地貌結構較為複雜，而互訊息匹配的原理是利用影像的熵，因此能夠不受影響，且匹配的影像均經過地形校正消除了地形效應。反觀面特徵及線特徵匹配，則受到此測試區複雜地貌的影響，而無法有效改善初步套合成果。

表 27、測試區三成果比較

RMSE (pixel)	Manual	MI	Region	Edge
Distance	2.92	2.38	2.69	2.62
Sample	1.49	1.49	1.55	1.50
Line	2.51	1.85	2.20	2.15

5.4 測試區四成果分析

測試區四位於台北地區淡水河與基隆河匯流處，在河道地區沒有太多明確的點且由於雷達影像的斑駁雜訊增加量測檢核點的難度，因此僅量測 10 個共軛點作為檢核點，進行後續匹配的精度評估。圖 58 為檢核點分布圖。檢核點大多分布在河道的橋樑兩端或橋樑中點，由圖可以看出雷達影像的斑駁雜訊非常嚴重，尤其在影像右下角的住宅區，人造建物造成雷達影像的反射強度較高，光學影像則能夠明顯看出其紋理。

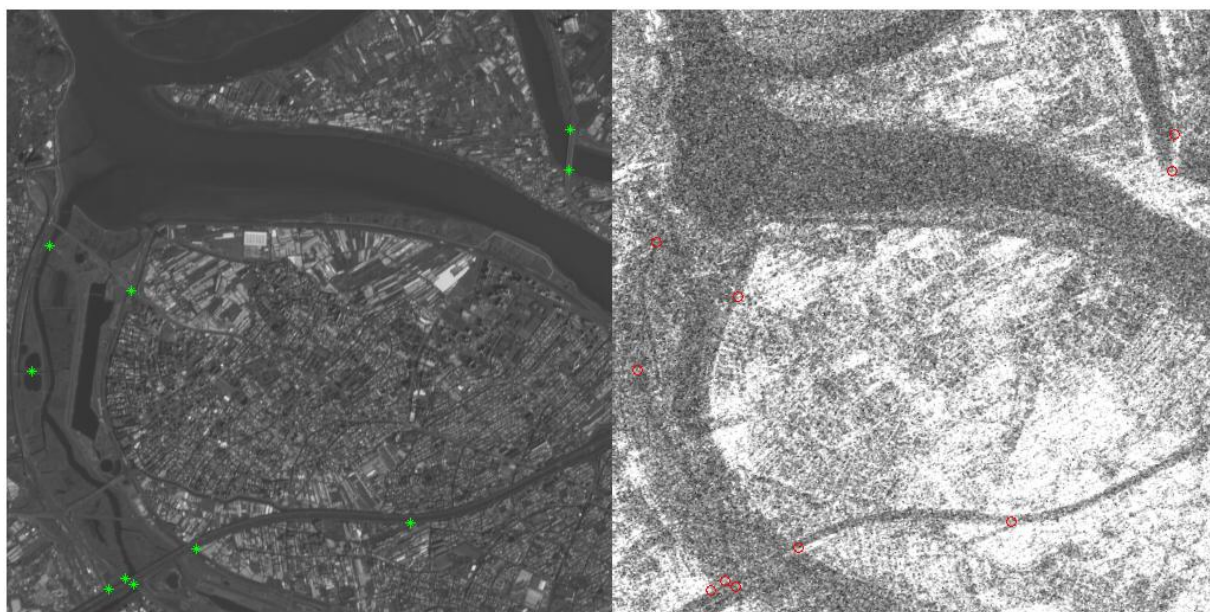


圖 58、測試區四檢核點分布圖

5.4.1 測試區四初步套合

表 28 為初步套合成果，Sample 及 Line 方向的 RMSE 值分別是 2.70 及 2.55 個像元，整體套合精度 RMSE 值為 3.72 個像元，平均誤差為 2.05 個像元，此測試區的初步套合成果比測試區三的成果較差，推測的原因為檢核點的數量較少且檢核點的分布集中在左下角，檢核點的品質也可能受影像的雜訊的影響而下降。圖 59 為初步套合的棋盤影像，由棋盤影像中的河道可以看出影像套合的成果沒有太大的誤差，由於光學影像為正射影像，雷達影像的影像等級為 L1.5。

表 28、測試區四初步套合成果

	RMSE (pixel)	Average (pixel)
Distance	3.72	2.05
Sample	2.70	1.89
Line	2.55	-0.81

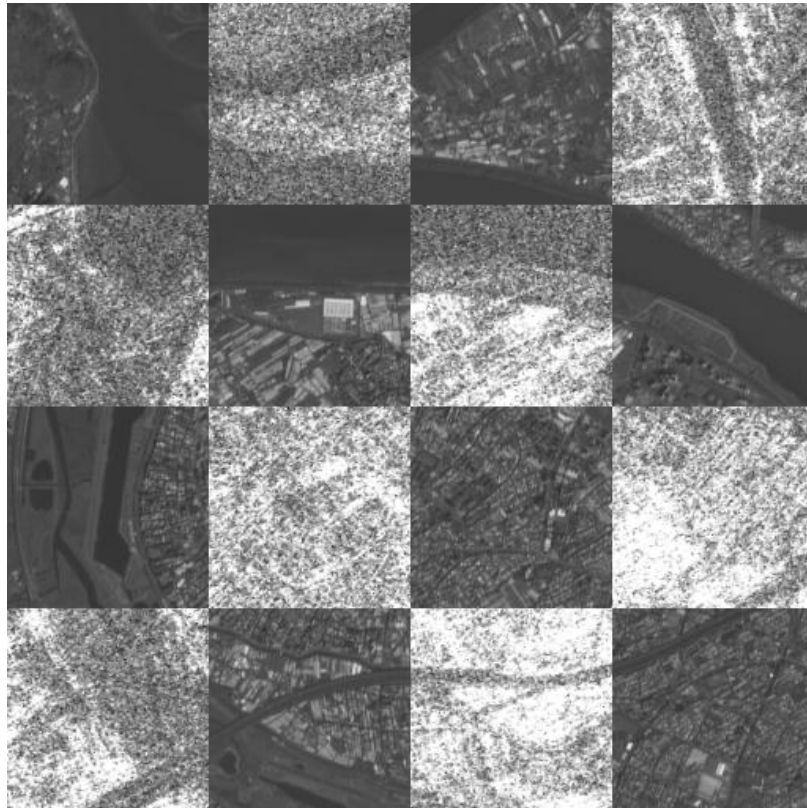


圖 59、測試區四初步套合之棋盤影像

5.4.2 測試區四互訊息匹配

圖 60 為雷達影像在光學影像上移動計算得到互訊息資訊量矩陣的三維圖形。互訊息資訊量的峰值大約為 0.09，位於坐標(3, 1)。由圖中峰值的鄰近位置可以發現有其他幾個突起的值，這些點的互訊息資訊量略小於峰值，可能的原因為此測區因為雜訊的影響導致河道邊緣不明確，計算互訊息資訊量矩陣時移動一個像元的距離其互訊息資訊量非常相近。

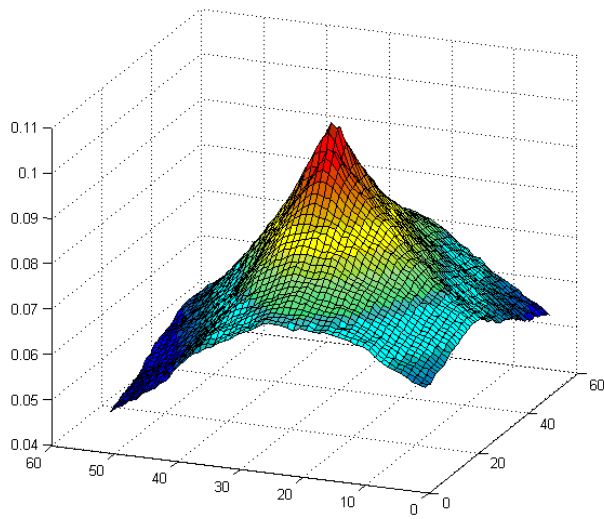


圖 60、測試區四互訊息資訊量矩陣圖

表 29 為互訊息匹配成果，RMSE 值在 Sample 及 Line 方向上分別為 2.23 和 3.02 個像元，整體匹配精度為 3.76 個像元，平均誤差為 2.13 個像元，與初步套合成果相近且精度較初步套合差，可能的因素為互訊息匹配的峰值及其鄰近與峰值相近的點差值很小，峰值的位置受到雜訊的影像而有所變動，使峰值的位置也跟著改變而匹配至錯誤的位置，因此在平均誤差中可以發現互訊息匹配的套合成果，在 Sample 及 Line 方向上反而比初步套合成果差。

表 29、測試區四互訊息匹配成果

	RMSE (pixel)	Average (pixel)
Distance	3.76	2.13
Sample	2.23	-1.11
Line	3.02	-1.81

圖 61 為互訊息匹配的棋盤影像，圖 62 為套合後檢核點的分布圖，由棋盤影像中的河道邊緣線，與初步套合成果相似，兩張影像的套合並無太大的誤差。由檢核點的分布圖可以明顯看出檢核點的誤差均不大，僅少數幾個檢核點的誤差略大，誤差方向的分布沒有一定的系統性。

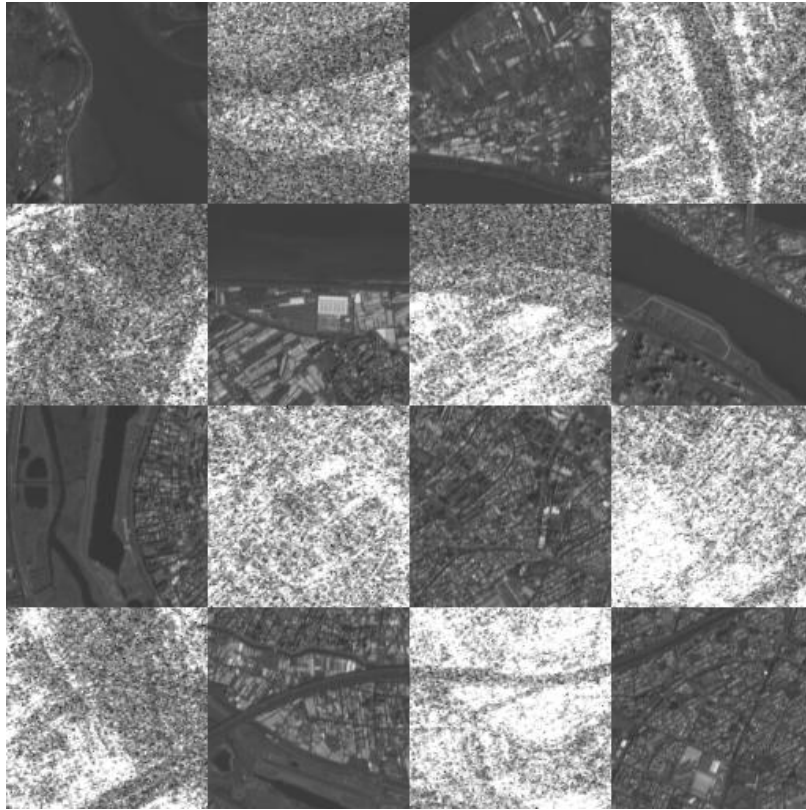


圖 61、測試區四互訊息匹配之棋盤影像

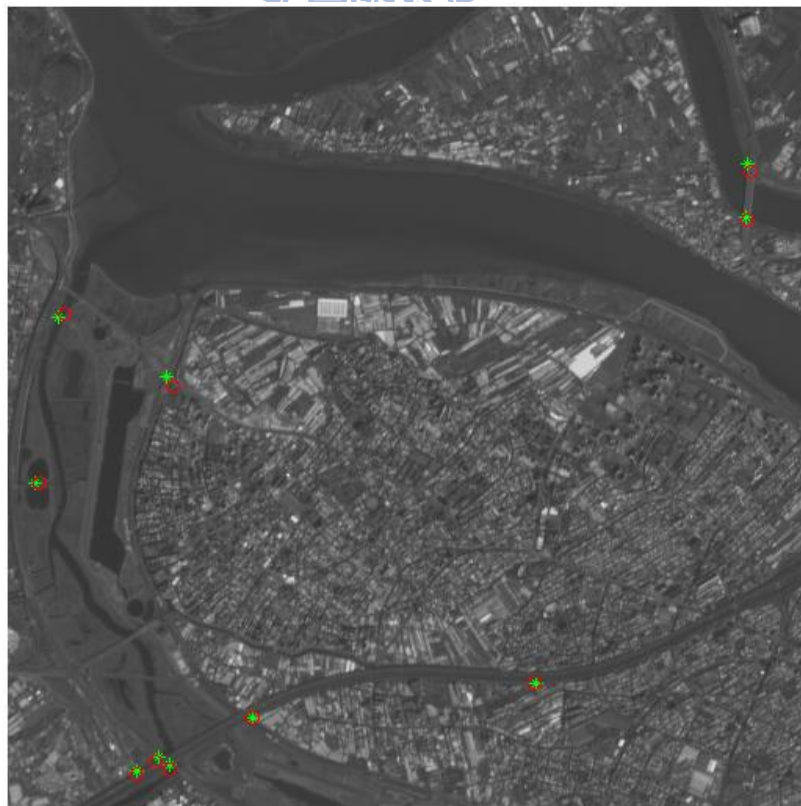


圖 62、測試區四互訊息匹配之檢核點分布圖

5.4.3 測試區四面特徵匹配

以面積最大的 500 個面特徵進行匹配，距離門檻依據初步套合成果設定為 4 個像元，由 cost function 計算得到的相似度值門檻設定為 0.5。圖 63 為面特徵匹配後得到的共軛點分布圖。此測試區選取的面特徵較多，因為測試區中包含的明顯面特徵非常稀少，僅能藉由破碎的面特徵進行匹配，透過距離門檻及 cost function 的相似度判斷大多數的面特徵均無法通過門檻，所以選用較多的面特徵以便於進行匹配。

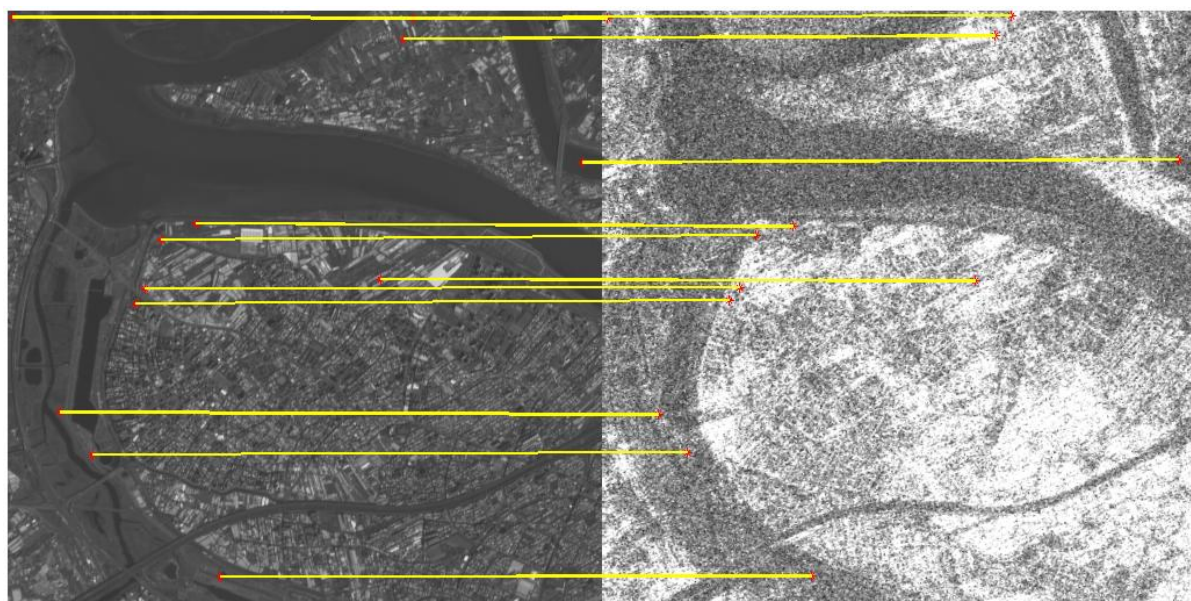


圖 63、測試區四面特徵匹配共軛點分布圖

匹配成功的面特徵有 12 個，cost function 計算得到的差異值平均為 0.3799，匹配成果如表 30 所示。套合成果在 Sample 方向上的 RMSE 值 1.58 個像元，Line 方向上為 2.84 個像元，平均誤差為 1.14 個像元。相較於初步套合成果，面特徵匹配的套合成果在 RMSE 值上大約減少 0.5 個像元，平均誤差則減少大約 0.9 個像元。圖 64 為面特徵匹配的棋盤影像，河道的連續性作為主要的判斷依據，套合成果沒有明顯錯誤。圖 65 為匹配成果的檢核點分布圖，與互訊息套合成果相似，在差異較大的檢核點對有些許的改善，全部的檢核點差異均不大，且誤差方向的分布均勻。

表 30、測試區四面特徵匹配成果

	RMSE (pixel)	Average (pixel)
Distance	3.25	1.14
Sample	1.58	0.50
Line	2.84	-1.03

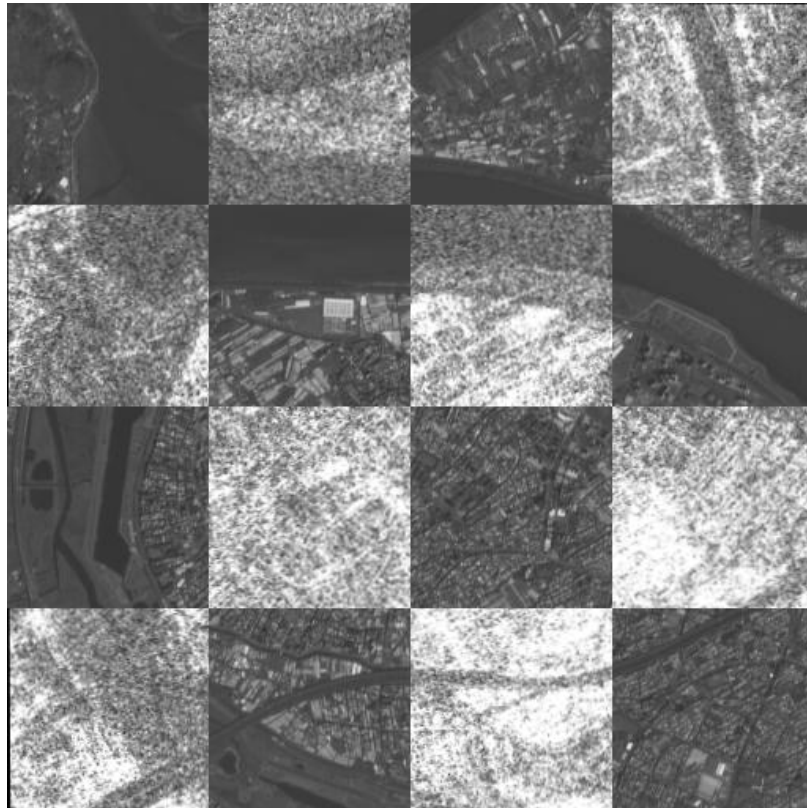


圖 64、測試區四面特徵匹配之棋盤影像

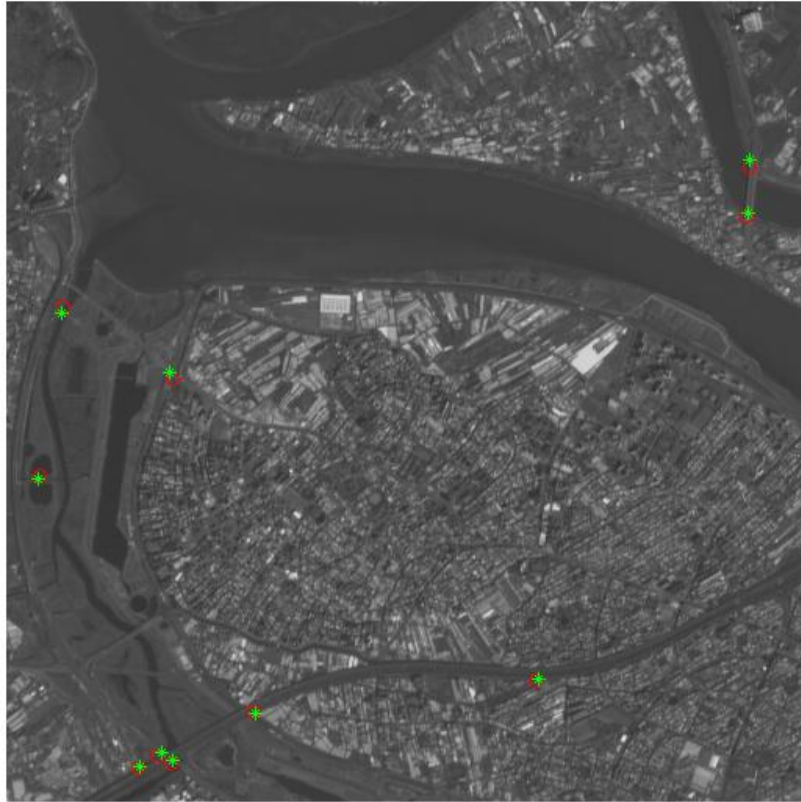


圖 65、測試區四面特徵匹配之檢核點分布圖



5.4.4 測試區四線特徵匹配

搜尋視窗根據初步套合成果設定為 4 個像元，距離門檻為 3 個像元，圖 66 為影像金字塔每一階層匹配後得到的套合點分布圖，由左上至右下分別為 Level 3 ~ 0 階層。在 Level 3 階層的套合點，大多分布在河道的邊緣及右下角的人造建物區，Level 2 ~ 0 階層河道的邊緣逐漸明顯，右下角的人造建物區內也涵蓋了大多數的套合點。

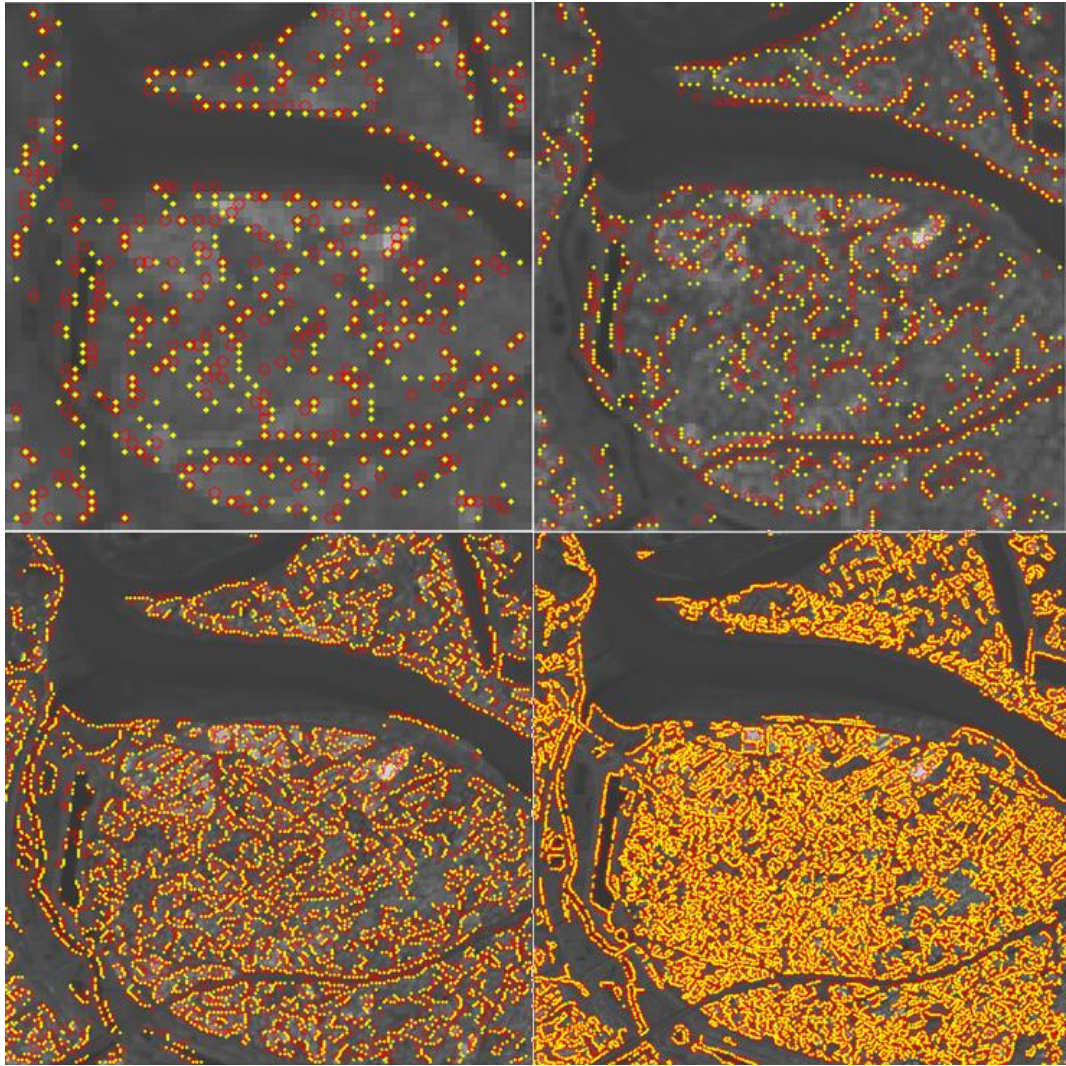


圖 66、測試區四線特徵匹配共軛點分布圖

表 31 及表 32 為線特徵匹配成果，Level 0 線特徵匹配精度在 Sample 及 Line 方向的 RMSE 值為 2.09 及 2.44 個像元，整體精度的 RMSE 值約為 2.62 個像元，平均誤差則為 1.22 個像元，共得到 31326 個套合點。以 RMSE 值而言，線特徵匹配與面特徵匹配的套合成果相近且略優於面特徵匹配，受到人造建物所產生的雜亂線特徵影響，使得線特徵的匹配對於初步套合併沒有太大的改善。

表 31、測試區四線特徵匹配成果(RMSE)

RMSE (pixel)	Level 3	Level 2	Level 1	Level 0
Point	837	2056	8641	31326
Distance	3.46	3.25	3.24	3.21
Sample	2.47	2.18	2.14	2.09
Line	2.43	2.41	2.43	2.44

表 32、測試區四線特徵匹配成果(Average)

Average (pixel)	Level 3	Level 2	Level 1	Level 0
Distance	1.65	1.26	1.27	1.22
Sample	-1.62	-1.23	-1.21	-1.17
Line	-0.34	-0.27	-0.37	-0.36

圖 67 及圖 68 為線特徵匹配後的棋盤影像及檢核點的分布圖。在棋盤影像中同樣能夠看到良好的套合成果，河道的邊緣線在兩張影像的交界處均能夠接合得非常好，並沒有太大的錯誤。在檢核點的分布圖中，可以發現右上角的兩個檢核點對，由於該處周圍的線特徵較少，只有橋梁的線特徵較明顯，因此沒有受到其他雜亂的線特徵影響，因此能就較好的套合成果，其他檢核點的差異則於面特徵的成果相似，均在 2 ~ 3 個像元之間，且其誤差方向的分布均勻。

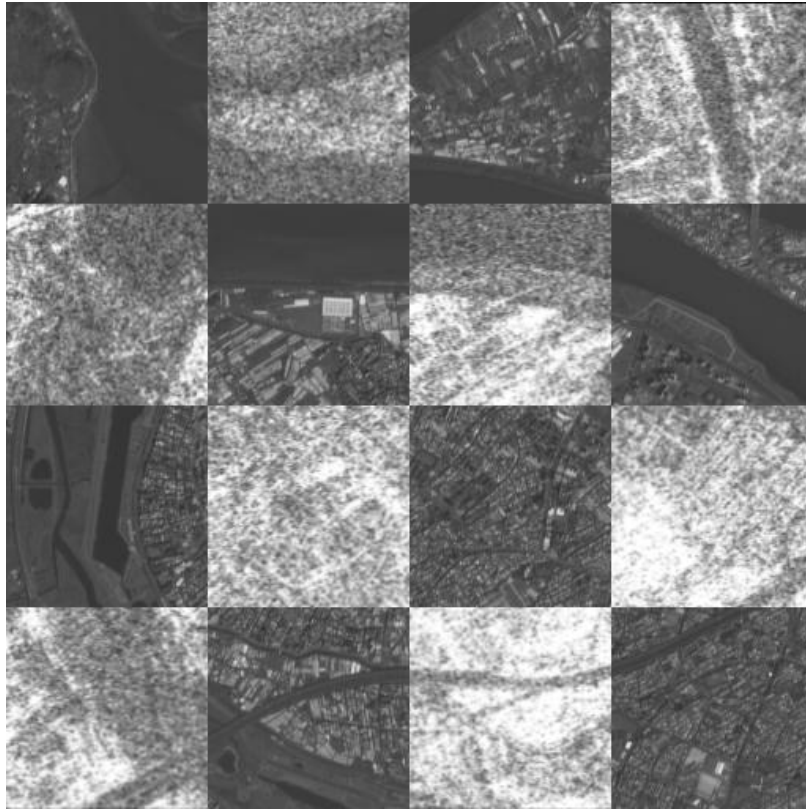


圖 67、測試區四線特徵匹配之棋盤影像

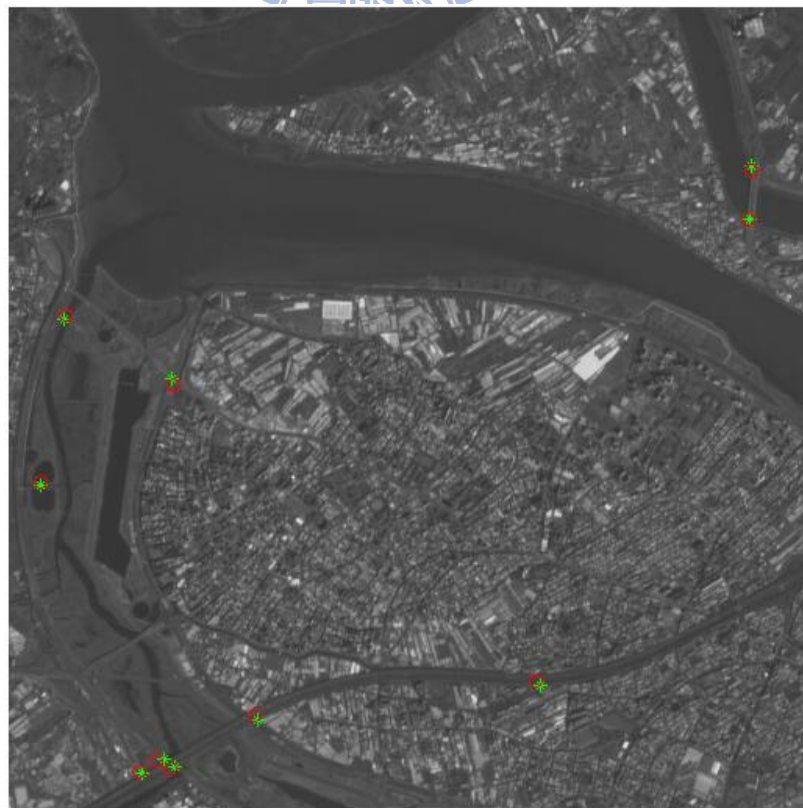


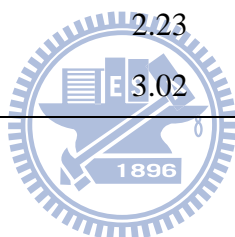
圖 68、測試區四線特徵匹配之檢核點分布圖

5.4.5 測試區四成果比較

第四組測是區位於台北地區，地表覆蓋物以人造建物、裸露地及水體為主，由於受到雜訊的影像，檢核點的量測不易，因此僅量測 10 個共軛點作為檢核。初步套合成果的 RMSE 值約為 3.72 個像元，互訊息匹配的成果沒有改善反而更差，可能受到雷達影像的雜訊影響，在人造建物雷達的反射強度較高，而在灰階的光學影像人造建物的灰度值則未必較高，因此造成匹配位置的誤判。線特徵及面特徵匹配對於初步套合成果均有不錯的改善效果，線特徵匹配成果的 RMSE 值為 3.21 個像元，面特徵的為 3.25 個像元。表 33 為測試區四的成果比較。

表 33、測試區四成果比較

RMSE (pixel)	Manual	MI	Region	Edge
Distance	3.72	3.76	3.25	3.21
Sample	2.70	2.23	1.58	2.09
Line	2.55	3.02	2.84	2.44



第六章 結論與建議

本研究主要探討光學及雷達影像兩種異質影像的影像套合，使用的影像資料為 AVNIR-2 及 PALSAR 影像，其中 PALSAR 影像為 Fine mode 模式的單觀點影像雷達影像，相較於多觀點雷達影像，具有較高解析度且較高的斑駁雜訊，並具有與 AVNIR-2 感測器進行同步獲取的特性。分別採用了互訊息匹配、面特徵及線特徵三種匹配方法進行，並測試了四組包含不同屬性的實驗資料，例如：影像等級不同、地表覆蓋物不同、實驗區域的高度不同及影像拍攝時間的同步性。互訊息匹配是屬於區域匹配的一種，主要利用兩張影像灰度值的熵作為匹配的判斷。面特徵匹配是利用分水嶺影像分割法萃取面特徵，再以 cost function 判斷面特徵是否相似。線特徵匹配是利用 Canny 進行線特徵萃取，再以 SSD 進行匹配，利用影像金字塔由粗到細的匹配流程，增加匹配的可靠度並且減少雜訊的干擾。實驗成果總結如下：

(1) 比較三種匹配方法：利用互訊息匹配法進行影像套合可以得到兩張影像的平移量，即使初步套合成果不佳依然可以得到不錯的匹配成果，在地表覆蓋物較為複雜的區域同樣能得到較好的匹配成果，然而影像尺度上的差異及灰度值的影響容易造成互訊息匹配的效果不好。利用面特徵匹配進行影像套合在影像中包含大面積的面特徵時能夠得到較好的匹配成果，但如果初步套合成果不佳則無法得到較好的匹配成果。線特徵匹配透過影像金字塔多尺度的匹配流程，在四組測試區都能得到較佳的套合成果。

(2) 比較不同地物類別：就地形差異而言，在山區可能受到地形效應的影響，例如：光學影像的高差移位及雷達影像的前坡縮短 (Foreshortening) 和後坡拉長，導致匹配成果較差，例如測試區二為山區地形，從互訊息匹配的套合成果可看出，在測試區二的套合成果均不如測試區一，而面特徵匹配因受到初步套合成果的影響導致測試區一的套合成果失敗。線特徵匹配則有完全相反的結果，其主要原因為測試區一的檢核點分布較為平均，而測試區二的檢核點則集中在水體的周圍，因此無法評估全區的精度。就地表覆蓋物差異而言，地表覆蓋物複雜，互訊息匹配所得到的成果較好，由於互訊息匹配是利用影像的熵計算兩張影像的相似度，當影像的熵愈高則有利於互訊息匹配的運作，例如

測試區三，影像中包含了植被、裸露地、人造建物及水體，互訊息匹配能夠得到較好的匹配成果；測試區四則大部分是裸露地、人造建物及水體，由於人造建物多半為混凝土材質雷達掃描時往往會得到較強的反射值，測試區四中的住宅區在雷達影像上看似為均調區，使得互訊息匹配無法得到良好的成果，面特徵及線特徵則無太大的影響。

(3) 比較不同影像等級：就原始影像品質而言，第一及第二組測試區的原始影像為未經幾何校正的衛星影像，第三及第四組測試區的原始影像則分別為正射化的光學影像及經衛星軌道參數校正的雷達影像，由於經過幾何校正後影像中的地形效應的影響會減少，因此影像品質愈好能得到較好的套合成果。以初步套合成果而言影像等級的優劣直接影響成果的精度，在互訊息匹配的成果方面也得到同樣的結論，唯獨使用線特徵匹配，在兩種影像等級的測試區中均能得到近似套合成果。

(4) 誤差來源探討：根據本研究的實驗成果，探討誤差來源的可能性，可以歸納為投影模式不同、地形效應、檢核點品質及初步套合成果。

投影模式不同：雷達影像為距離投影，而光學影像為透視投影，兩者的投影模式有相當大的差異，對於相同的物體進行掃描仍有很大的差異。

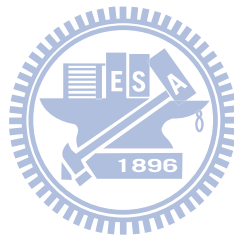
地形效應：地形效應所產生的高差移位現象，使得影像匹配失敗。

檢核點品質：本研究所使用的檢核點為人工量測的同名點，此作業方式本身存在量測者對於點位的主觀認定，加上雷達影像的雜訊斑駁使得量測作業更為艱難，因此檢核點的品質也可能是本研究成果的誤差來源之一。

初步套合成果：初步套合果的優劣直接影響精密套合的成果。以互訊息匹配法為例，若初步套合能夠消除大部分的旋轉及伸縮差異，則互訊息匹配能夠得到很好的成果。

本研究中互訊息匹配法僅計算兩張影像的平移量，若要克服旋轉及尺度上的誤差，未來可以將影像分割為若干區塊分別匹配，每區塊匹配後能得到一組共軛點，即可利用這些共軛點計算轉換參數。此外，面特徵匹配所採用的面特徵萃取為分水嶺影像分割法，此方法容易因影像品質造成過度分割，因此必須視影像調整分割門檻值或先將影像進行

平滑處理，利用多偏極之影像亦可提升雷達影像之品質。線特徵匹配採用影像金字塔的匹配流程，在解析度最粗的圖層進行匹配時，容易因為影像過度平滑而使線特徵偏離原本的位置造成匹配錯誤，需適當加入影像增顯以改善此情形。



參考文獻

1. 江采薇，2006，“融合光達及高解析影像建立三維植生覆蓋模型”，碩士論文，國立中央大學土木工程研究所。
2. 張鈞凱，2007，“高光譜影像立方體紋理特徵之三維計算”，碩士論文，國立中央大學土木工程研究所。
3. 劉邦偉，2003，“以特徵為基礎的方法對NASA/JPL AIRSAR影像與航測正射影像進行強鈍套合”，碩士論文，國立成功學測量工程學系。
4. 劉銘哲，2008，“研究不同資源衛星影像之匹配與套合”，碩士論文，國立中央大學土木工程研究所。
5. 蔡函芳，2009，“多重影像匹配於房屋邊緣線三維定位”，碩士論文，國立中央大學土木工程研究所
6. Abbasi-Dezfouli, M. and Freeman, T. G. 1994. Patch matching in stereo-images based on shape. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. 30(3):1-8.
7. Bentoutou, Y., Taleb, N., Bounoua, A., Kpalma, K. and Rosin, J. 2007. Feature based registration of satellite images. *Proceedings of the 15th International Conference on Digital Signal Processing*. 419-422.
8. Canny, J. 1986. A computational approach to edge detection. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8(6):679–698.
9. Chen, H. M., Arora, M. K. and Varshney, P. K. 2003. Mutual information-based image registration for remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*. 24(18): 3701-3706.
10. Dowman, I. J., Morgado, A. and Vohra, V. 1996. Automatic registration of image with maps using polygonal features. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. 31(B3): 139-145.

11. Dare, P. and Dowman, I. 2001. An improved model for automatic feature-based registration of SAR and SPOT images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 56: 13-28.
12. Hasan, M., Pickering, M. R. and Jia, X. P. 2009. Multi-modal registration of SAR and optical satellite images. *Digital Image Computing: Techniques and Applications*. 447-453.
13. Hong, T. D. and Schowengerdt, R. A. 2005. A robust technique for precise registration of radar and optical satellite images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*(2005): 586-593.
14. Huang, L. and Li, Z. 2010. Feature-based image registration using the shape context. *International Journal of Remote Sensing*. 31(8): 2169-2177.
15. Centre for Mathematical Morphology. Image Segmentation and Mathematical Morphology. URL: <http://cmm.enscm.fr/~beucher/wtshed.html>. Accessed 15 August 2011.
16. Jia, W. J., Zhang, J. X., Qing, D. and Yang, J. H. 2009. Automatic registration of SAR and optics image based on multi-features on suburban areas. *Urban Remote Sensing Joint Event*. 1-7.
17. Li, Q. and Murakami, Y. 2007. Steerable filter based multiscale registration method for JERS-1 SAR and aster images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 381-384.
18. Li, Q., Fu, B. H. and Dong, Y. F. 2010. Registration of radar and optical satellite images using multiscale filter technique and information measure. *IEEE Geoscience and Remote Sensing, New Achievements*. 458 - 476.
19. Mao, H., Yu, Q. and Zhang, T. X. 2007. Matching SAR image to optical image using modified Hausdorff distance and genetic algorithms. *SPIE 678820-1:6*.

20. Su, J., Lin, X. G. and Liu, D. Z. 2009. A multi-sensor image registration algorithm based on structure feature edges. *Act Automatic Sinica*. 35(3): 251-257.
21. Suri, S., Türmer, S., Reinartz, P. and Stilla, U. 2009. Registration of high resolution SAR and optical satellite imagery in urban areas. *ISPRS Hannover Workshop 2009 High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information*.
22. Suri, S., Schwind, P., Reinartz, P. and Uhl, J. 2009. Combining mutual information and scale invariant feature transform for fast and robust multisensor SAR image registration. *Proc. of the 75th ASPRS Annual Conference, Baltimore, Maryland, USA*.
23. Suri, S. and Reinartz, P. 2010. Mutual-information-based registration of TerraSAR-X and Ikonos imagery in urban areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 48(2): 939-949.
24. Wang, S. 2011. Segmentation Methods for Synthetic Aperture Radar. *Recent Hurricane Research - Climate, Dynamics, and Societal Impacts*. 593-616.
25. Yang, W., Han, C. Z., Sun, H., and Cao, Y. F. 2005. Registration of high resolution SAR and optical images based on multiple features. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 3542-3544.
26. Zhang, Y. and Chen, W. 2009. Auto-registration of SAR and optical images based on priority strategy. *Image and Signal Processing, CISP 2009 2nd Congress*.1-5.
27. Zhang, Z. H., Pan, C. H. and Ma, S. D. 2004. An automatic method of coarse registration between multi-source satellite images. *Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing Conference*. 205-209.