

應用於特定場景之最佳化衛星取像排程演算法

李勝義¹ 葉憶瑤^{2*} 黃楓台³

¹國防大學理工學院電機電子工程學系

²國防大學理工學院國防科學研究所

³國家太空中心

摘 要

本文提出一套結合球面幾何分析、機率統計模型以及最佳化排程理論的演算法，作為特定場景衛星取像排程的規劃。我們首先根據地球-衛星之間的球面幾何關係來決定每個地面點位的取像時間機會視窗，再以截尾型柯西機率分布模型來決定該點位的取像時間，最後以一種可以迅速達到目標函數收斂效果的基因演算法來決定單一軌道取像時間序列。實驗結果證實在數秒內即可快速完成單一任務軌道的取像排程規劃。此一快速收斂效果未來可延伸運用於解決複雜度更高的多衛星取像排程規劃問題。

關鍵詞：衛星取像排程，截尾型柯西機率分布，基因演算法

A Scenario Based Optimal Scheduling Algorithm for Earth Observing Satellites

Sheng-Yi Li¹, Yi-Yao Yeh^{2*}, and Feng-Tai Hwang³

¹ *Department of Electrical and Electronic Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University*

² *School of Defense Science, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University*

³ *National Space Organization (NSPO)*

ABSTRACT

In this paper, an algorithm incorporating spherical geometry analysis, probability distribution model and optimal scheduling theory is proposed for satellite imaging planning under a specific scenario. For each ground target, the imaging opportunity window is obtained by earth-satellite geometry. Then the imaging time is determined by truncated Cauchy probability distribution model. Finally, a method of genetic algorithm is developed to determine the imaging time sequence for a single satellite track. Simulation results show that the proposed algorithm provides good convergence speed for obtaining near-optimal solution in seconds, which can further be applied for solving the problem of more complicated multi-satellite imaging planning.

Keywords: satellite imaging scheduling, truncated Cauchy distribution, genetic algorithm

一、前言

利用衛星對地面進行遙測取像，可以在短時間內獲得大範圍的細部影像情資，除了是目前許多科學、軍事及商業等方面應用的重要資訊來源，在諸多支援救災與重建工作的實際案例中，也顯示出其重大的貢獻。具體而言，在滿足各項限制條件下，衛星取像排程作業必須篩選並決定地面取像點位的拍攝優先順序，以及決定每個取像點位的最佳拍攝時機。然而，受限於衛星資源有限以及客戶對影像品質及時效性等要求的影響，每日所能拍攝的符合影像數量通常很難因應與日遽增的需求[1, 2]。有鑑於此，如何有效利用衛星資源，以提昇每日獲取的影像數量及品質，進而達到預期的效益，實為目前衛星取像排程規劃的重要研究議題。

衛星取像排程考量的限制因素包括衛星飛越地面取像點位上空的時間區段、取像前的姿態轉換時間、酬載熱控限制、資料儲存空間、以及取像點位上空的雲覆量等[3]。在求解此一複雜的問題方面，Vasquez 等人[4]視其為背包問題(Knapsack Formulation)，並以禁忌搜尋演算法(Tabu Search Algorithm)求解每日衛星取像排程；Wang 等人[5]視其為具時間窗限制的提送貨問題(Pickup and Delivery Problem with Time Windows Constraints, PDPTW)，並以啟發式演算法及決策支援系統來求解多衛星的任務排程；而 Lin 等人[6]則視其為整數線性規劃問題，並以拉格朗日鬆弛(Lagrange Relaxation)及線性搜尋法來求解 FORMOSA-2 的每日作業排程。雖然採用的求解方式各異，但所有文獻都一致認同衛星取像排程是一個很難找到多項式時間解法的 NP-hard (Nondeterministic Polynomial-time hard)問題，也就是說，任何求解這個問題的最佳解，其計算時間會隨著取像點位數量的增加而呈指數成長[3, 7]。

衛星取像排程的研究範疇大致區分為問題建模、近似優化、以及局部優化等三大類[8]。由於假設的限制條件不同，所提出的解決方式也各有其適用的地方。值得注意的是，啟發式算法，包括禁忌搜尋法、模擬退火法以及基因演算法等，在多數文章中扮演關鍵性的

角色，尤其是基因演算法的應用與探討最多[9-14]。然而我們發現以往文獻在求解近似優化的基因演算法方面，所採用的基因編碼組合是由不同的取像點位所組成，主要目的是取像點位的子集選擇[9-13]，至於如何決定某個地面點位的取像時間，則鮮少提及其演算法則，僅以隨機取得或貪婪方法獲得可接受的可行解。然而，我們認為在可行解方案中，若以啟發式演算法分別求出每個地面取像點的取最佳像時間，將有助於提升衛星影像品質及排程效能。有鑑於此，本研究提出截尾型柯西機率分布基因取像法(Truncated Cauchy Distribution based Genetic Algorithm, TCDGA)運用於取像時間序列優化的求解。其實用特性在於每日拍攝作業的地面目標子集決定後，可再利用 TCDGA 進一步求取最佳的取像時間序列。驗證與實作方式是假設一個衛星軌道及數個地面取像點位均為已知的特定場景，在符合各項條件限制下，求得每個地面點位的取像時間，使得取像序列最符合目標函數的要求。為了方便起見，我們將此問題模型稱之為特定場景的排程問題(Specific Scenario Scheduling Problem, SSSP)。

此外，受限於基因演算法的局限性，排程結果可能會遭遇快速收斂到局部最優解而非全局最優解的早熟收斂現象(Premature Convergence)，我們認為出現近似最佳解的關鍵取決於父代族群內每個個體的基因好壞，換言之，基因演算法每次的迭代過程中，若配對的父代具有優質的基因，則應能產生更優質的子代。就本文所探討的排程問題與染色體編碼方式而言，我們提出尋求優質個體的實現方式有二個關鍵步驟：首先，以排除無效區間的方式縮短每個地面點位的可能取像時間區段；第二，以柯西機率分布函數(Cauchy Distribution Function)模型決定可觀測時間視窗內被挑選成為取像起始時間點的機率。

本文結構摘述如下：第 2 節描述本研究探討的單一任務軌道取像場景及取像排程所面臨的問題模型；第 3 節說明本研究提出的截尾型柯西機率分布基因取像法；第 4 節說明如何以基因演算法來決定單一軌道取像時間序列；第 5 節則討論不同實驗結果的比較；第 6 節為本研究貢獻、結論及未來研究方向探討。

二、問題描述

2.1 單一任務軌道取像場景

單一任務軌道是指一條由南往北，或是由北往南的衛星飛行軌跡。例如 FORMOSAT-2 的軌道設計採用太陽同步軌道 (Sun Synchronous Orbit, SSO)，同時使得衛星繞地球一周時，只有由北往南的降交期 (Descending Period) 飛行期間才有陽光照射，對於低軌道光學遙測衛星而言，這段約 3000 秒的期間才能進行地面點位的取像任務，我們稱之為任務軌道；反之，韓國 KOMSAT-2 衛星雖然也是 SSO 設計，但它的任務軌道卻是屬於由南往北的昇交期 (Ascending Period) 軌道；而加拿大的 RADARSAT 等雷達遙測衛星因為不限白天或黑夜都可執行取像任務，因此繞地球一周的昇交期及降交期軌道均可作為任務軌道。

如圖 1 所示是以 FORMOSAT-2 為例的單一任務軌道及 10 個地面目標(序號 1 至 10)的取像場景示意圖，軌道兩側的虛線代表衛星以最大 45 度滾轉角(Roll Angle)姿態的取像條帶邊界，地面點位必須落在此一條帶範圍內才能被取像。對於每個點位而言，以仰角 θ 觀測天空所對應的地面投影點是一個以該點位為圓心，半徑為 γ 的小圓 (Small Circle)，我們稱為仰角遮罩 (Elevation Mask) [15, 16]，衛星地面軌跡必須落在仰角遮罩範圍內，才能滿足以相對應限制的姿態角度對該點位進行取像。如前所述，由於受到諸多條件限制，衛星無法在同一個軌道期間內，都以最佳的時間點對每個地面點位進行取像。因此衛星取像排程的目的是在一群取像點位當中，找出一組取像點位及其取像時間序列組合，使得目標函數值為最佳，例如最早時間完成或是平均解析度最佳。

本文主要著重在探討單一任務軌道的衛星取像排程問題。由於不論單一衛星或多衛星的取像排程規劃，某一段期間(例如 7 天)的飛行軌跡都可分割成數個單一任務軌道的排程作業，一旦最基本的單一任務軌道的排程規劃不佳，將連帶影響整體單一衛星或多衛星的取像排程作業效率。因此本研究可視為是所有排程規劃研究的基礎，研究成果可進一步延伸至包含光學及雷達遙測衛星的混合型多衛星取像排程規劃作業。

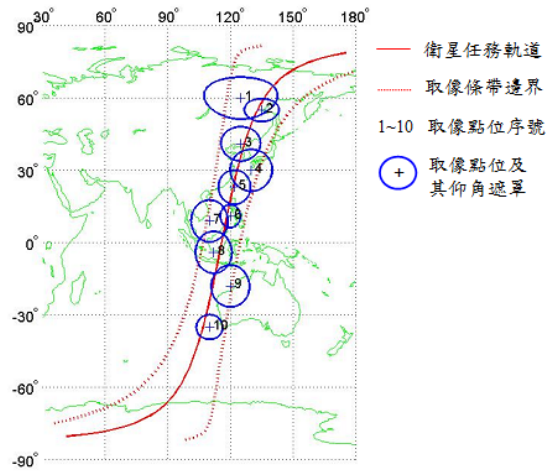


圖 1. 單一任務軌道取像場景示意圖

2.2 取像時間機會視窗

衛星飛行期間可以對某一地面點位進行取像的時間區段稱為取像時間機會視窗 (Time of Opportunity Window, TOW)。對單一地面點位而言，我們可以根據仰角遮罩 [15, 16] 的概念來求得 TOW 的開始及結束時間。

對於某一取像點位 G_n 而言，假設該點位設定為希望衛星能以視角 (View Angle) 小於 α 的角度，也就是地面點位觀測衛星的仰角大於 θ 的角度，對它進行取像，以維持一定的影像解析度品質，根據圖 2 所示的球面幾何關係，我們可以求得地面點位的 θ 仰角遮罩是一個半徑為 ζ 的小圓 (Small Circle)，表示成：

$$\zeta = \frac{\pi}{2} - \theta - \alpha, \quad (1)$$

其中，

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{(r_E + h) \sin \alpha}{r_E} \right) \quad (2)$$

為地面點位觀測衛星的仰角， r_E 及 h 分別為地球半徑及衛星軌道高度。而小圓上的任一點座標 $g(\phi, \lambda)$ 則可由以下步驟求得：

$$\phi = \phi_0 + \zeta \sin \beta, \quad \beta \in [0, 2\pi), \quad (3)$$

$$\lambda = \lambda_0 + \cos^{-1} \left(\frac{\cos \zeta - \sin \phi \sin \phi_0}{\cos \phi \cos \phi_0} \right), \quad (4)$$

其中， ϕ_0 及 λ_0 分別為取像點位 G_n 的緯度及經度。

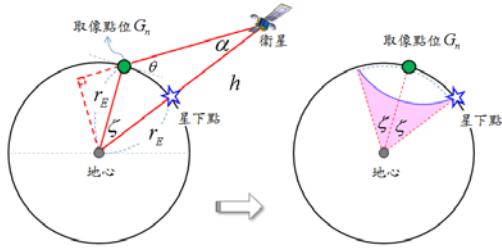


圖 2. 以取像視角推算仰角遮罩的示意圖

對於某個地面點位 G_n 而言，仰角遮罩與衛星的地面軌跡交點即為該點位的 TOW，假設該點位的取像時間為 q_n ，我們定義該點位的 TOW 為一組介於 t_{S_n} 及 t_{E_n} 之間的離散時間集合，表示成

$$W_n = \{q_n \in N \mid t_{S_n} \leq q_n \leq t_{E_n}\} \quad (5)$$

其中 t_{S_n} 及 t_{E_n} 分別為 G_n 的 TOW 開始時間及結束時間。

2.3 熱控、姿態轉換及穩定

除了上述的仰角遮罩限制，衛星在太空中運行時也需要考量其他限制因素，例如熱控限制、姿態轉換及姿態穩定時間限制等[15, 16]。

在熱控限制方面，以 FORMOSAT-2 為例，從開機到關機只有 $H=10$ 分鐘(含 2 分鐘預熱時間)的時間可以取像，如此一來相距過大的兩個取像點位就無法在單一開機期間內被取像。解決方式是可以藉由多次開關機的方式來達成，也就是僅在預定取像時間的前幾秒再開機。此一作法僅需額外付出每次開機所需的短暫熱機時間。假設某一衛星可於同一任務軌道進行多次開關機，而使得熱控限制在 H 分鐘內(含 h 分鐘預熱時間)，卻能對南、北兩端相距超過 $H-h$ 分鐘衛星飛行距離的 N 個取像點位進行取像，其限制條件可以表示成：

$$h + (N-1) \times h' + \sum_{n=1}^N P_n \leq H \quad (6)$$

其中， h' 代表短暫熱機時間， N 代表取像點的個數， P_n 為拍攝第 n 個點位所需的取像時

間長度。以 FORMOSAT-2 為例，假設每個點位的取像時間長度 $P_n, n=1, 2, \dots, N$ 至少需要 10 秒，則根據公式(6)，同一個任務軌道內最大的取像數將不超過 13 個。

在姿態轉換及穩定時間限制方面，姿態轉換的限制使得一群相距太近的取像點無法被同時取像，假設 Δt 是衛星姿態轉換總設置時間，表示如下：

$$\Delta t = \Delta t_R + \Delta t_P + \Delta t_T \quad (\text{sec}) \quad (7)$$

其中 Δt_R 及 Δt_P 分別為衛星的滾轉(Roll)及俯仰(Pitch)姿態角變換所需的轉動時間(Maneuvering Time)， Δt_T 為姿態轉換到達定位後的穩定時間(Tranquilization Time)，針對衛星取像排程的限制式如下表示：

$$q_n + P_n + \Delta t_{n,n+1} \in W_{n+1} \quad \forall n \in N \quad (8)$$

其中， P_n 為第 n 個取像點位所需拍攝時間長度， $\Delta t_{n,n+1}$ 為第 n 個取像點位到第 $n+1$ 個取像點位所需的衛星姿態轉換時間長度。

2.4 候選解集合與目標函數

對於一個具有 N 個取像點位的場景而言，假設共有 K 種不同的取像排程可行解，以集合 S 表示如下：

$$S = \{s_i, i=1, 2, \dots, K\} \quad (9)$$

其中，

$$s_i = \{q_j^{(i)}, j=1, 2, \dots, N\} \quad (10)$$

為第 i 個可行解的取像時間序列組合， $q_j^{(i)}$ 為第 i 個可行解中，衛星對第 j 個點位進行取像的時間點。以往文獻僅針對 $q_j^{(i)}$ 給定一個可取像的時間範圍，但並未明確說明該時間範圍是如何求得的；根據地球-衛星的球面幾何觀點，我們認為該時間最大範圍即是本文(5)式所述的取像時間機會視窗 W_n 。於是 $q_j^{(i)} \in W_j$ ，因此針對同一場景的所有可行解總數 K 則為：

$$K = \prod_{j=1}^N (t_{E_n} - t_{S_n} + 1) \quad (11)$$

然而，我們認為，如果可以進一步排除機會視窗的無效區間 Δ_n 來限定每一個點位的取像搜尋時間範圍，所得的可行解個數 K'_n 表示為：

$$K' = \prod_{j=1}^N (t_{E_n} - t_{S_n} - \Delta_n + 1) \quad (12)$$

上式所定義的無效區間 Δ_n 所代表的意義是指前一個取像點位完成取像作業的時間， $q_{n-1} + P_{n-1}$ ，加上衛星預設的最小姿態轉換時間及姿態穩定時間。若該時間點超過目前取像點位的最早可取像時間 t_{S_n} ，則超過的時間區間即稱為無效區間，也就是衛星在此區間內必定無法對該點位進行取像。比較(11)(12)兩式可以得知，若地面取像點位越多，或彼此間的機會視窗重疊愈密集，則會使得 $K' \ll K$ ，如此一來可以大幅降低搜尋的解空間，進而提昇搜尋的效能。

在 SSSP 的最佳化求解方面，依任務需求，其目標函數(Objective Function)可以是取像距離總和或是取像完成時間。SSSP 最佳化求解目的是找出最小化目標函數 $f(s^*)$ ，表示如下：

$$f(s^*) = \min \{ f(s_i), i=1, 2, \dots, K' \} \quad (13)$$

其中， s^* 是最佳解， $f(s_i)$ 是第 i 個可行解 s_i 的目標函數。若最佳化目標為最高解析度時，也就是每個取像時間當時的星下點(Sub-satellite Point)與地面目標點的距離總和為最小(稱為最短取像距離)，則目標函數 $f(s_i)$ 表示成：

$$f(s_i) = \sum_{j=1}^N \left[r_E \times d(g_j^{(i)}, G_j^{(i)}) \right] \quad (14)$$

上式中 $d(g_j^{(i)}, G_j^{(i)})$ 為第 j 個取像點被取像時，衛星的星下點 g_j 與地面取像點位 G_j 之間的距離。假設兩者的地理座標經緯度分別為 (ϕ_s, λ_s) 及 (ϕ_n, λ_n) ，根據球面幾何：

$$d(g_j, G_j) = \cos^{-1} \left[\begin{array}{l} \sin \phi_s \sin \phi_n \\ + \cos \phi_s \cos \phi_n \cos(\lambda_s - \lambda_n) \end{array} \right] \quad (15)$$

由於球面幾何是以角度來定義兩點間的距離，以便於同一公式可適用於任意半徑的球體，若要換算成地表弧長距離 L ，則為 $L = r_E \cdot d$ 。

然而，若最佳化目標為最早完成時間， $f(s_i)$ 則是第 i 個可行解 s_i 的最後一個取像點的完成時間，表示如下：

$$f(s_i) = q_N^{(i)} + P_N \quad (16)$$

三、TCDGA 演算法

根據以上的問題描述，本文提出截尾柯西分佈基因演算法(Truncated Cauchy Distributed Genetic Algorithm, TCDGA)來求解 SSSP 問題，演算法流程如圖 3 所示。首先根據衛星軌道預測以及仰角遮罩來決定每個地面點位的 TOW，再根據相鄰點位 TOW 重疊程度以及熱控、姿態轉換及穩定時間等限制來決定縮減取像時間機會視窗(Trimmed TOW, TTOW)，並以截尾型柯西機率分布(Truncated Cauchy Probability Density Function, TCPDF)模型來決定該點位的取像時間，最後以一種可以迅速達到目標函數收斂效果的基因演算法來決定單一軌道取像時間序列。

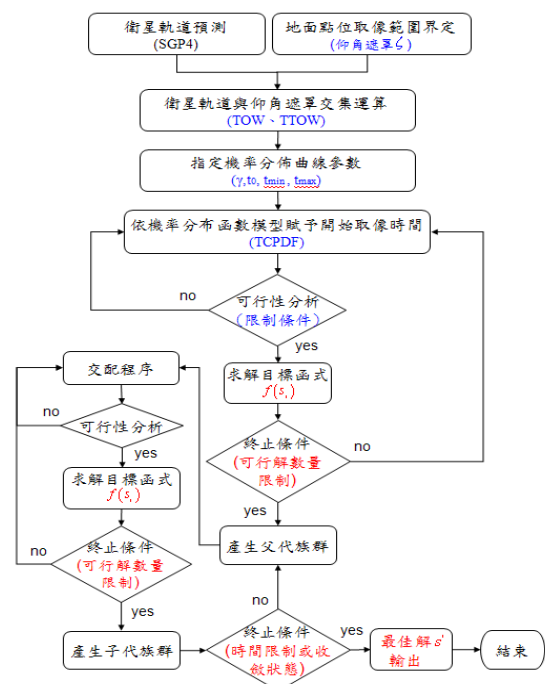


圖 3. TCDGA 演算法流程圖

3.1 縮減取像時間機會視窗

如前所述，對於單一點位而言，仰角遮罩與衛星的地面軌跡交點即為該點位的取像時間機會視窗(TOW)。然而，衛星取像排程探討的都是較複雜的多地面點位取像問題。由於受到姿態轉換時間的限制，衛星對 G_n 的取像時間加上預計對下一個取像點位 G_{n+1} 取像姿態轉換所需的時間，很可能超過 G_{n+1} 的TOW範圍，造成此一取像時間組合的失敗。因此可以預期的是，對於一群取像點位過於集中，也就是彼此的TOW相互重疊區域大的場景而言，若無特定的搜尋方式而僅以隨機方式來決定每個點位的取像時間，則會增加搜尋時間而導致收斂速度下降。為了提高時間決策效能，本文提出縮減取像時間機會視窗(TTOW)的概念來改善此一問題。

對於某個地面點位 G_n 而言，當前一個點位 G_{n-1} 的開始取像時間 q_{n-1} 決定後，受到姿態轉換所需時間的影響，原先預定的最早可取像時間可能會往後推延 Δ_n 。因此我們定義該點位經縮減後的取像時間區間為縮減取像時間機會視窗，表示如下：

$$TW_n = \{q_n \in N | t_{S_n} + \Delta_n \leq q_n \leq t_{E_n}\}, \Delta_n > 0 \quad (17)$$

其中，

$$t_{S_n} + \Delta_n = q_{n-1} + P_{n-1} + \Delta t_{n-1,n} \quad (18)$$

q_{n-1} 及 P_{n-1} 分別為拍攝 G_{n-1} 的取像時間點以及所需的取像時間長度， $\Delta t_{n-1,n}$ 為拍攝完前一個點位後，衛星姿態轉換到準備拍攝該點位所需的姿態轉換時間長度。

3.2 取像時間機率分布函數模型

對於每個取像點位而言，與任務軌道最接近的時間點為解析度最高的理想取像時間點，但基於整體目標函數最佳化的考量，除非拍攝點位數量少且分散(如此一來就不需要有所謂的排程規劃問題)，否則我們通常很難實現每個取像點位都以其最理想的取像時間點拍攝。因此，本文提出以科西機率密度分佈函數(Cauchy PDF)模型來決定取像時間的概念。

對於一個隨機變數 t 而言，Cauchy PDF

定義如下：

$$f_c(t; t_0, \gamma) = \frac{1}{\pi} \frac{\gamma}{\gamma^2 + (t - t_0)^2}, \gamma > 0 \quad (19)$$

其中， t_0 稱為位置參數(Position Parameter)，是指曲線峰值所在位置； γ 稱為尺度參數(Scale Parameter)，用來描述曲線的半峰值寬度。柯西機率分布函數的曲線與常態分佈機率函數相似，其差別在於柯西機率分布函數的曲線比較扁平且具有較平緩的長尾巴(Longer and Flatter Tails)。圖4所示為柯西機率分布函數在 $t_0 = 0$ 及 $t_0 = 200$ 條件下，參數 γ 分別指定為10、20、50以及100的曲線差異圖。

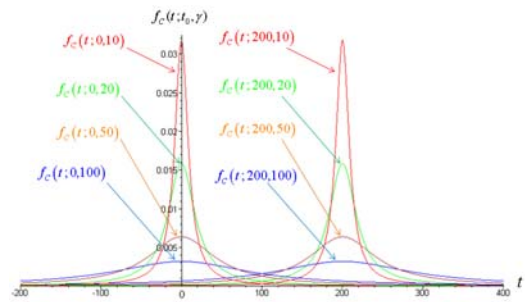


圖 4. 柯西機率密度函數曲線

值得注意的是，上式中的科西隨機變數 t 沒有界限，也就是 $t \in R$ ，然而就實際應用而言， t 只會在TOW的某個限定範圍內變動，我們可以根據截尾型分布函數的轉換作法[17]，據此進一步推導有限定時間 t 範圍的截尾柯西機率密度分布函數(TCPDF)，表示如下：

$$f_T(t; t_0, \gamma, t_{\min}, t_{\max}) = \frac{f_c(t; t_0, \gamma)}{F_c(t_{\max}; t_0, \gamma) - F_c(t_{\min}; t_0, \gamma)}, t_{\min} \leq t \leq t_{\max} \quad (20)$$

其中， $F_c(t; t_0, \gamma)$ 為 $f_c(t; t_0, \gamma)$ 的累積分布函數(Cumulative Distribution Function, CDF)，表示如下：

$$F_c(t; t_0, \gamma) = \int_{-\infty}^t f_c(t; t_0, \gamma) dt = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{t - t_0}{\gamma} \right) \quad (21)$$

由以上二式可得

$$f_{T_c}(t; t_0, \gamma, t_{\min}, t_{\max}) = \frac{1}{\tan^{-1}\left(\frac{t_{\max}-t_0}{\gamma}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{t_{\min}-t_0}{\gamma}\right)} \cdot \frac{\gamma}{\gamma^2 + (t-t_0)^2} \quad (22)$$

在本研究中，我們將 t_0 設定為 TOW 的中心點，也就是衛星最接近地面點位的瞬間，表示成

$$t_0 = \frac{t_S + t_E}{2}, \quad (23)$$

t_{\min} 及 t_{\max} 則是 TTOW 的邊界； γ 則是根據該點位與相鄰點位的 TOW 重疊情形來設定，表示如下

$$\gamma = 100 \cdot \left(1 - \frac{B}{W}\right) \quad (24)$$

其中， W 為仰角遮罩時間區段， B 為未被前後取像點 TOW 覆蓋的時間區段。 $\gamma=0$ 代表沒有重疊，而 $\gamma \rightarrow \infty$ 代表完全被重疊。例如對第 n 個點位而言，在原始取像視窗沒有與相鄰點位重疊的情況下，也就是 $TTOW=TOW$ ，此時(22)式的 t_{\min} 及 t_{\max} 為 TOW 的邊界， $\gamma=0$ ， $t_0 = (t_{\max} + t_{\min})/2$ ，代入得

$$f_{T_c}(t; t_0, \gamma, t_{\min}, t_{\max}) = \delta(t_0) \quad (25)$$

值得注意的是，(24)式的尺度參數 γ 是根據大量實驗模擬的經驗，認為能普遍得到較佳的結果而直接採用的。若要驗證是否為最佳化，則需要更完整的論述與實驗數據來支持，不在本文討論的範圍。

上式結果說明了衛星對該點位的取像時間只有一種可能，那就是衛星最接近地面點位的瞬間 t_0 ，此一結果除了可以免除決定最佳取像時間點的搜尋時間，所得的取像時間 t_0 也確保解析度為最佳。至於 TOW 與相鄰點位相鄰的情況下，此時若設定 γ 值越大，則(22)式的 TCPDF 越趨近均等分布 (Uniform Distribution)，代表取像時間落在 TTOW 範圍內的機會都相同，此一結果確保取像決策不會排除最佳取像點可能位於 TTOW 邊界的情況，但相對的，搜尋時間也會跟著變長。此外，

若最佳解析度取像時間 t_0 落在 $[t_{\min}, t_{\max}]$ 之外，則 TCPDF 曲線會呈指數型遞減，而非 t_0 落在 $[t_{\min}, t_{\max}]$ 之內的鐘型曲線，以圖 5 所示為例，鐘型曲線的 TCPDF 為 $f_{T_c}(t; 100, 10, 70, 130)$ ，而指數型曲線的 TCPDF 為 $f_{T_c}(t; 100, 10, 120, 180)$ 。

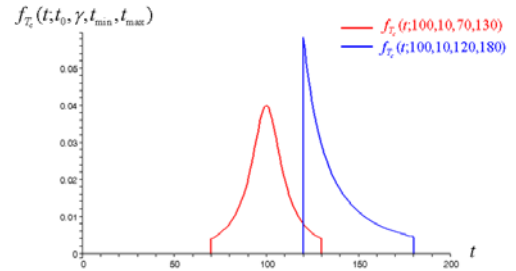


圖 5. 截尾型柯西機率密度函數曲線

四、基因演算法

基因演算法(Genetic Algorithm, GA)是模擬自然界生物進化過程與機制用來求解問題的方法。GA 模擬了自然選擇和遺傳中發生的複製、交叉和變異等現象，從任一初始族群 (Population) 開始，經由反覆的隨機選擇、交叉和變異的迭代操作過程，將產生更能適應環境的優質個體。根據上述的概念，本文的作法是將各地面點位的取像時間點的組合作為基因演算法的染色體編碼，若以此編碼方式隨機產生 M 組染色體(或稱 M 個初始個體)為父代族群，其後則為選擇、交叉遺傳運算子的迭代運算過程。求解步驟如圖 6 所示，演算步驟說明如下：

- Step A: 依 TCPDF 模型，分別從每個取像點位的 TTOW 中選取基因，組合成一組染色體並驗證是否為可行解。重複上述步驟，直到產生屬於可行解的 M 組染色體，稱之為原始父代族群。
- Step B: 從原始父代族群中，隨機選取兩組父代染色體進行交配程序，終止條件為子代染色體數量同等於父代數量。
- Step C: 將原始父代與子代染色體視為同一族群，族群內染色體依目標函數值由小至大排序後，取前半數較優者為下一次迭代程序(Step D)之父代族群。
- Step D: 從已進化父代族群中，隨機選取兩組父代染色體進行交配程序，終止條件

為子代染色體數量同等於父代數量。

Step E: 將已進化父代與子代染色體視為同一族群，族群內染色體依目標函數值由小至大排序後，取前半數較優者為下一次迭代程序(Step D)之父代。

Step F: 迭代程序，也就是依序重複執行 D 及 E 步驟，終止條件為最佳解收斂程度符合預設值(如目標函數值連續出現相同值 100 次)。

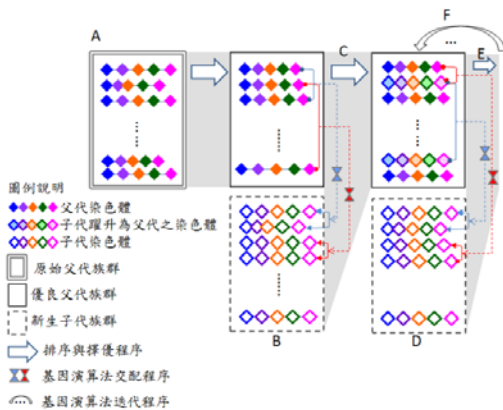


圖 6. 截尾型柯西機率密度函數曲線

4.1 基因編碼設計

基因編碼設計(Gene Coding)又稱個體表示法，本文採用 TCPDF 模型，是以 TTOW 為每一個基因的取值範圍。以第 n 個取像點位為例，其取值範圍為 $q_n \in [t_{S_n} + \Delta_n, t_{E_n}]$ ，選取之基因值為 q_n 。決定每個點位的取像時間點之集合為候選解，稱為一個個體(Individual)，又稱染色體(Chromosome)。圖 7 所示為以 5 個取像點位為例的編碼設計，第 i 個染色體的基因組合為 $s_i = \{q_j^{(i)}, j = 1, 2, \dots, 5\}$ 。

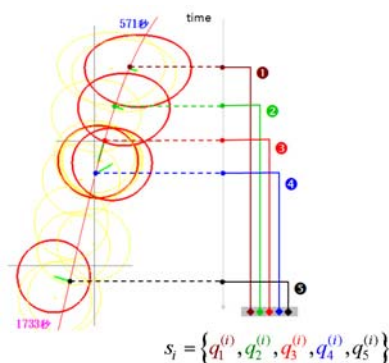


圖 7. 染色體編碼設計示意圖

4.2 挑選父代族群

在符合各項條件限制下，我們挑選父代族群的目的是選取 M 組染色體視為一個族群。圖 8 所示是以 5 個取像點位為例(取像點位編號依序為 K01G18、K01G09、K01G12、K01G01 及 K01G10)，於單一染色體內，當這 5 個基因根據相鄰 TTOW 重疊所決定的 TCPDF 的 γ 參數分別為 44、68、100、100 以及 30 時，各基因在 TTOW 取值範圍內的機率密度函數曲線。

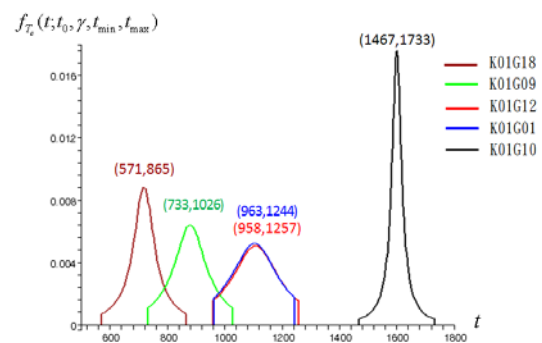


圖 8. 基因取值的機率密度函數曲線

4.3 遺傳交叉運算

基於取像時間視窗與取像點位具緊密相依性，為避免產生過多不可行解以提昇運算效能，並力求保存部分取像點位之較佳解。遺傳運算方法採用單點基因交叉算法(Single-Point Crossover)。如圖 9 所示，其特性為父代雙方僅於相對位置交換基因值，而不影響染色體的前後取像點位順序[14]。

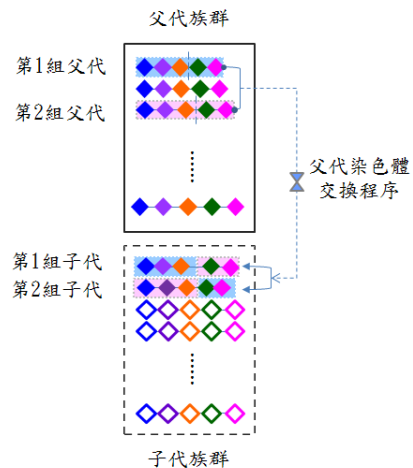


圖 9. 單點交叉遺傳運算示意圖

五、實驗模擬結果

5.1 實驗設計

本研究根據假設的場景以四種不同的演算法來比較其取像效能，分別為隨機取像法 (Uniform Distribution Algorithm, UDA)、隨機機率分布基因演算法 (Uniform Distribution based Genetic Algorithm, UDGA)、截尾型柯西機率分布取像法 (Truncated Cauchy Distribution Algorithm, TCDA) 及截尾型柯西機率分布基因取像法 (Truncated Cauchy Distribution based Genetic Algorithm, TCDGA)，所採用的目標函式為影像解析度最高，也就是每個取像時間當時的星下點與地面目標點的距離總和為最小，簡稱為最短取像距離，如(14)式所示。模擬場景如圖 10 所示，衛星軌道、熱控限制以及姿態轉換時間等都是 FORMOSA-2 為模擬參數。我們從國家太空中心提供的 FORMOSA-2 第 1 任務軌道 20 個取像點位 (編號 K01G01~K01G20) 中分別選取 5 個及 8 個取像點為本研究的特定場景，定義 5 個取像點為場景 A，8 個取像點為場景 B。表 1 及表 2 分別為場景 A 及場景 B 的模擬參數列表，包括取像點位代號、經緯度位置、所需拍攝時間長度、縮減取像時間機會視窗以及 TCPDF 的位置參數及尺度參數等。

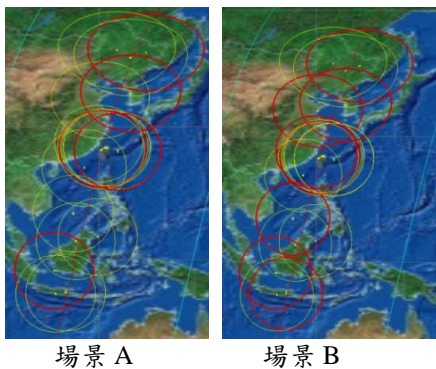


圖 10. 取像排程場景示意圖

表 1. 場景 A 各取像點位的模擬參數

取像順序	ID	G (lat.lon)	P (sec)	TW (sec)	t_0	γ
1	K01G18	(46.81, 130.35)	13	571-865	718	44.8
2	K01G09	(37.54, 126.98)	13	733-1026	880	68.2
3	K01G12	(24.97, 120.80)	52	958-1257	1108	100.0
4	K01G01	(24.39, 124.16)	13	1032-1244	1104	100.0
5	K01G10	(-2.53, 110.20)	13	1467-1733	1600	0.0

表 2. 場景 B 各取像點位的模擬參數

取像順序	ID	G (lat.lon)	P (sec)	TW (sec)	t_0	γ
1	K01G18	(46.81, 130.35)	13	571-865	718	44.9
2	K01G09	(37.54, 126.98)	13	733-1026	880	100.0
3	K01G19	(36.08, 120.35)	13	784-1066	925	100.0
4	K01G03	(26.19, 119.96)	13	942-1238	1090	100.0
5	K01G12	(24.97, 120.80)	52	977-1257	1108	100.0
6	K01G04	(10.37, 114.37)	13	1229-1513	1371	26.1
7	K01G10	(-2.53, 110.20)	13	1467-1733	1600	96.6
8	K01G08	(-7.45, 112.72)	13	1522-1821	1672	70.6

5.2 模擬分析

以下根據特定的場景 A 及場景 B，以四種不同演算法分別比較其最佳解及可行解的取像效能差異，終止條件為搜尋時間達 30000 毫秒或可行解收斂曲線達到穩定狀態 (即取像距離連續出現相同值 100 次的最終時間)，取兩者的最小值。其中基因演算法採用父代數量 100 組，交叉運算次數 300 次進行模擬，圖 11 所示分別為場景 A 及場景 B 的可行解收斂曲線，根據上述的終止條件設定，表 3 所示為各種演算法求得最佳解所需的搜尋時間及其相對的取像距離。

在比較最佳解的運算效能差異方面，增加基因演算法有助於運算效能提昇。以表 3 為例，就場景 A 及 B 而言，有基因演算法的 UDGA 及 TCDGA 相較於無基因演算法的 UDA 及 TCDA，運算時間分別快約 25 倍及 18 倍。

在比較最佳解的影像解析度差異方面，採用柯西分佈的取像時間法則優於採用均等分佈者。以表 3 為例，就場景 A 及 B 而言，採用柯西分佈的 TCDA 及 TCDGA 相較於採用均等分佈的 UDA 及 UDGA，影像解析度品質以對應的取像距離表示，分別提昇約 1.90% 及 1.97%。

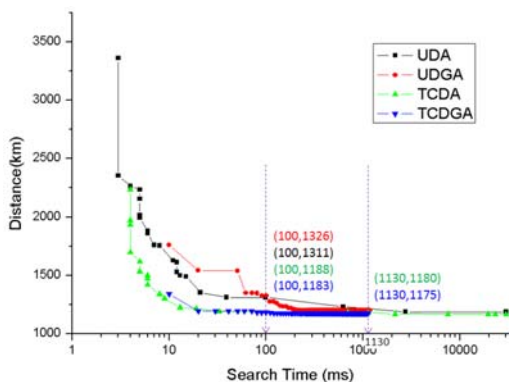
在比較可行解的影像解析度差異方面，以圖 11(a) 求解 5 個取像點的模擬結果為例，當搜尋時間為 100 毫秒時，UDA、UDGA、TCDA 及 TCDGA 四種演算法求得可行解取像距離分別為 1311、1326、1188、1183 公里，TCDA 及 TCDGA 取像解析度較 UDA 及 UDGA 高 10.6%；以圖 11(b) 求解 8 個取像點的模擬結果為例，當搜尋時間為 26 毫秒時，TCDA 及 TCDGA 求得可行解取像距離分別為 2245 及 2418 公里，TCDA 取像解析度較 TCDGA 高

7.4%；當搜尋時間為 240 毫秒時，求得可行解取像距離分別為 1801 及 1723 公里，TCDGA 取像解析度較 TCDA 高 4.4%；由觀察圖 11(a) 及 (b) 的 TCDA 及 TCDGA 收斂曲線，我們可以得知 TCDA 可以較早求得可行解，但是 TCDGA 可以較早獲得近似最佳解。以場景 B 為例，TCDA 及 TCDGA 第一個可行解出現的時間分別為 6 毫秒及 26 毫秒，然而當 TCDGA 於 1662 毫秒達到終止條件並獲得近似最佳解 1720 公里時，TCDA 於 1662 毫秒尚未達到終止條件，且在此時間點求得的取像距離為 1801 公里，較 TCDGA 差 81 公里。對於這樣的求解速度與品質的權衡關係，我們即可根據任務需求，擇優延伸應用於多衛星取像排程之參數臨界值設定。

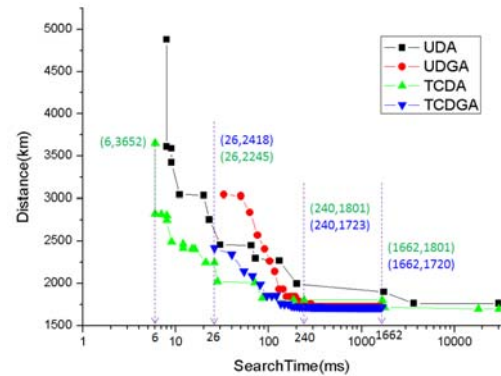
上述模擬實驗結果證實不論有無採用基因演算法，以 TCPDF 為基礎的 TCDGA 及 TCDA，均較傳統的 UDA 及 UDGA 演算法有較佳的影像解析度品質。此外，實驗結果也證實本文所提出的演算法可以在短時間內獲得理想的取像時間序列。以 Intel Core 2 Quad CPU (2.83 GHz, 2GB DDR3 RAM) 的 Win XP 作業系統模擬 TCDGA 為例(如表 3)，在單一任務軌道的 5 個及 8 個取像點位的排程求解時間分別為 1130 毫秒及 1662 毫秒。

表 3. 各種演算法求得最佳解所需的搜尋時間及其相對的取像距離

演算方法	場景 A		場景 B	
	搜尋時間 (ms)	取像距離 (km)	搜尋時間 (ms)	取像距離 (km)
A. UDA	30000	1186	30000	1762
B. UDGA	1183	1199	1620	1722
C. TCDA	30000	1165	30000	1696
D. TCDGA	1130	1175	1662	1720



(a) 場景 A 的可行解收斂曲線



(b) 場景 B 的可行解收斂曲線

圖 11. 各演算法的可行解收斂曲線

六、結 論

本文提出以截尾科西機率分佈函數為基礎的取像時間決定法則，作為特定場景之最佳化衛星取像排程規劃的參考，並與傳統的均等分佈取像時間決定法則做比較。實驗結果證實，以 TCPDF 為基礎的 TCDGA 及 TCDA，均較傳統的 UDA 及 UDGA 演算法有較佳的排程效能表現。此外，TCDA 能快速求出可行解，適用於多衛星取像排程之求解探索階段；TCDGA 於有限時間內所求得近似最佳解之衛星影像品質較高，較適用於多衛星排程之取像時間序列最佳化調整階段。

本研究結果可延伸運用於多衛星取像排程系統，作為充分運用衛星資源，達到最短時間內獲取所需解析度品質要求的衛星影像排程策略。未來我們將接續本研究結果，將 TCDA 及 TCDGA 演算模組實際應用於多衛星取像排程，求解多目標最佳化的柏拉圖前緣曲線。

參考文獻

- [1] Potter, W. and Gasch, J., "A photo album of earth: Scheduling landsat 7 mission daily activities," In Proceedings of the 5th International Conference on Space Operations, Tokyo, Japan, 1998.
- [2] Smith, D. E., "Choosing Objectives in Over-Subscription Planning," In proceedings of the International Conference on Autonomous Planning and Scheduling, pp.393-401, 2004.

- [3] Lemaître, M., Verfaillie, G., Jouhaud, F., Lachiver, J. M., and Bataille, N., "Selecting and scheduling observations of agile satellites," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 6, pp. 367–381, 2002.
- [4] Vasquez, M. and Hao, J. K., "A Logic-Constrained Knapsack Formulation and a Tabu Algorithm for the Daily Photograph Scheduling of an Earth Observation Satellite," *Journal of Computational Optimization and Applications*, pp. 137–157, 2001.
- [5] Wang, P., Gao, P., and Tan, Y., "A Model, a Heuristic and a Decision Support System to Solve the Earth Observing Satellites Fleet Scheduling Problem," *CIE. International Conference*, pp. 256-261, 2009.
- [6] Lin, W. C., Liao, D. Y., Liu, C.Y., and Lee, Y. Y., "Daily Imaging Scheduling of an Earth Observation Satellite," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, Vol. 35, No. 2, pp. 213-223, 2005.
- [7] Garey, M. R. and Johnson, D. S., Computers and Intractability, a Guide to the Theory of NP-Completeness, W.H. Freeman & Co., New York, 1979.
- [8] Zhang, G., Yin, J., Zhu, E., and Mao, L., "On the Selection of Multi Optimal Imaging Frames in Single Time Slot for Earth Observation Satellite," *The 9th International Conference for Young Computer Scientists*, pp.791-796, 2008.
- [9] Wolfe, W. J. and Sorensen, S. E., "Heuristics for Scheduling Earth Observing Satellites," *Part of the SPIE Conference on Earth Observing Systems IV*, Vol. SPIE-3750, pp. 328-339, 1999.
- [10] Globus, A., Crawford, J., Lohn, J., and Morris, R., "Scheduling Earth Observing Fleets Using Evolutionary Algorithms: Problem Description and Approach," *Proceedings of the 3rd International NASA Workshop on Planning and Scheduling for Space*, Houston, 2002.
- [11] Globus, A., Crawford, J., Lohn, J., and Pryor, A., "Scheduling Earth Observing Satellites with Evolutionary Algorithms," *International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology (SMC-IT)*, Pasadena, CA, 2003.
- [12] Globus, A., Crawford, J., Lohn, J., and Pryor, A., "A comparison of techniques for scheduling earth observing satellites," *Proceedings of the AAAI*, pp. 836-843, 2004.
- [13] Wang, J., Jing, N., Li, J., and Chen, H., "A multi-objective imaging scheduling approach for earth observing satellites", *New York, NY, USA : Association for Computing Machinery* , pp. 2211-2218, 2007.
- [14] Soma, P., Venkateswarlu, S., Santhalakshmi, S., Bagchi, T., and Kumar, S., "Multi-Satellite scheduling using Genetic Algorithms", 2004.
- [15] Hwang, F. T. and Li, S. Y., "Development of Multi Remote Sensing Satellites Mission Planning System," *Asian Conference on Remote Sensing*, 2007.
- [16] Hwang, F. T., Yeh, Y. Y., and Li, S. Y., "Multi-Objective Optimization for Multi-Satellite Scheduling System," *Asian Conference on Remote Sensing*, 2010.
- [17] Nadarajah, S. and Kotz, S., "R Programs for Computing Truncated Distributions," *Journal of Statistical Software*, Vol. 16, pp.1-8, 2006.

