

巡弋飛彈飛行路徑最佳化之研究

謝德望* 黃楓台** 李勝義*

*國防大學理工學院電機工程學系

**國家太空中心

摘要

巡弋飛彈的飛行路徑在發射之前均已事先規劃，因此，規劃的結果將影響飛彈到達目標之前的生存機率。本文結合風險場概念、3D 立體網格架構與動態規劃的方法，提出一種陸攻型巡弋飛彈路徑規劃的演算法，以作為我軍巡弋飛彈飛行路徑最佳化規劃的參考，或是預估敵軍巡弋飛彈可能來襲的飛行路徑之用。在作法上，除了考慮巡弋飛彈飛行時之速度、飛行姿態及巡弋飛彈在空氣動力學上的限制之外，並且應用動態規劃的方法，在 3D 立體網格上尋找最佳的飛行路徑。本文探討的問題，除了從以往文獻僅針對 2D 曲面網格的路徑規劃，擴展到 3D 立體網格的探討分析之外，而且可依據實際的環境資料來改變各項模擬的參數，因此，除了包含 2D 曲面模擬時所應考量的各項因素之外，更提供了數倍於 2D 曲面模擬時的路徑選擇彈性。在模擬結果中，我們也根據單位網格大小對於路徑規劃結果的權重值之影響關係作一探討，以提供使用者在精確度與計算量之間作取捨之用。

關鍵字：巡弋飛彈，路徑最佳化，動態規劃

Optimal Route Planning Algorithm for Cruise Missiles

Te-Wan Shieh*, Feng-Tai Hwang**, and Sheng-Yi Li*

**Department of Electrical Engineering, Chung-Cheng Institute of Technology, National Defense University*

***National Space Organization*

ABSTRACT

An algorithm for planning or estimating the flight route of a land attack cruise missile (LACM) is proposed. The concept of risk field, 3-D grid model and the theory of dynamic programming are applied. Some characteristic parameters such as flight velocity, flight skill and various aerodynamics constraints are taken into account to maximize the survival probability in the flight duration. Simulation results show that minimum achievable weighting value is obtained and is superior by comparing with that for a conventional 2-D grid model route planning. As the grid size influences the performance of route planning, the trade-off between grid resolution and weighting value is also discussed in the literature.

Keywords: cruise missile, flight route optimization, dynamical programming

文稿收件日期 96. 7. 16; 文稿修正後接受日期 97.4.7.

Manuscript received July 16, 2007; revised April 7, 2008.

一、前言

巡弋飛彈能夠貼著地表並依地形的起伏變化而飛行，以達到隱匿行蹤之目的，因此增加了防禦的困難度。依其功能特性，主要可以區分為反艦型巡弋飛彈(Anti-Ship Cruise Missile, ASCM)與陸攻型巡弋飛彈(Land Attack Cruise Missile, LACM)兩種；兩者間最大不同之處在於後者需要具有更精密的導引系統，以便於處理與計算各種複雜的導航信息與地形資料等。本論文針對陸攻型巡弋飛彈的路徑規劃問題進行探討，由於反艦型巡弋飛彈路徑規劃問題的複雜性較低，因此可以直接採用本文所提出的演算法而不需另行探討。

綜觀世界各國在巡弋飛彈的發展上，無論是巡弋飛彈導航系統的可靠度或飛彈命中率的精確度上，美國一直位居於領先的地位；而受到美軍在兩次波灣戰爭中大量使用的戰斧巡弋飛彈，能精準的命中目標並造成強大震撼效果的啟發，中共近年來也開始積極發展屬於自己的巡弋飛彈。因為巡弋飛彈具有自動導航的能力，可使人員遠離砲火攻擊威脅的危險，並具有非常高之精確度，投資成本小相對的效益卻非常大；並且能夠利用地形高低起伏的變化，達到隱匿行蹤的目的。截至目前為止，中共至少已經研發出數種不同型式的巡弋飛彈，包括：長風型巡弋飛彈、紅鳥型巡弋飛彈及鷹擊型巡弋飛彈等[1-3]，在精確度上，前兩者可到達 20 公尺以內，而後者更可達 10 公尺以內。中共更從美軍對伊拉克、阿富汗、塞爾維亞及科索沃等各國所進行的各項軍事行動中的相關戰場上所取得的未爆巡弋飛彈進行「反逆工程」的研究並加以仿製，其所獲得的技術明顯的提升了包括導航系統在內的各種能力，並且可以運用船艦或戰機等不同的載具來進行巡弋飛彈的投射，增加巡弋飛彈在運用上的彈性。在中共一直不放棄武力犯台的承諾，並且積極發展巡弋飛彈此類不對稱武器的前提下，對我國的國家安全上產生非常重大的威脅[4]。因此，如何反制巡弋飛彈的攻擊，甚至於發展這類具有長程精準攻擊能力的武器，為進行本研究的目的。

現今一般巡弋飛彈的大小，長度及直徑各約在六公尺與六、七十公分左右，對一般偵測系統而言，確實難以發現及追蹤，所以，各國都極力想研究出能夠提早偵測到巡弋飛彈的

方法或技術，以儘早做出防禦與反制作為。以美國為例，目前則將重點優先置於(一)載台及偵測系統，如空中預警系統、海軍聯合交戰能量計畫、單一整合空中戰場圖像、海軍的「未來海上巡弋飛彈防禦能力」計畫等，(二)針對殺傷巡弋飛彈能力的改進與提升的計畫，包括「聯合陸攻巡弋飛彈防禦提升聯網偵測器」計畫及低價攔截器等[5]，都是積極研發中或即將發展的計畫。國內部分學者也有針對巡弋飛彈的弱點提出一些學理上的討論，但是截至目前為止，所建議採用的手段都是消極被動的方法，並沒有積極主動的作為，例如各種對設施、設備實施隱蔽、掩蔽的方法或是使用煙霧、熱源欺騙[1,2]等。另外，雖然有文獻探討有關低空飛行器的飛行路徑規劃問題[6,7]，但因考量參數的不同而無法直接運用於巡弋飛彈路徑規劃上。例如，[6]是運用 Dijkstra 演算法[8]配合動態規劃[9,10]的方法來模擬低空飛行器的路徑，但對於飛行器的飛行速度有所限制，並且只運用固定的航速(409m/s)來模擬飛行器飛行時的狀況，所以在爬升率(最大 254m/s)與迴轉半徑(固定 300m)上之探討較少，雖然以是虛擬地形來從事研究，然而將飛行器之飛行條件限制為貼地飛行，因此，不論是在計算量或計算時間上都不是很複雜，只能視之為 2D 曲面的模擬分析。另外，[7]的研究同樣是以動態規劃為主軸來模擬飛行器的最佳路徑，除考慮牛頓力學的因素外，並加入空氣動力學上的限制，因此在模擬結果上較[6]更精準；該研究雖然使用 3D 立體圖形為模型，而且在地表地形上增加了幾種不同的變化，因此飛行器可依照不同地形或限制條件(高山及丘陵地形、中繼點等)，進而增加了多種不同規劃的選擇性，但是依然限制在與地面維持一固定高度的飛行條件。所以，此種以低空飛行器為考量的研究，尚無法滿足巡弋飛彈實際的飛行需求與外在的因素變化。

基於上述原因，本研究提出一種適用於巡弋飛彈路徑規劃的網格架構，結合風險場的概念及動態規劃法，進而求得巡弋飛彈最佳飛行路徑。本研究的成果在被動的防禦作為上，除了可將重要的政、軍、經設施的部署或配置位置週邊資料納為模擬參數外，還可考量週邊地區或飛彈可能來襲路徑上現有的防禦武器，再加上敵方巡弋飛彈的參數或特性，用模擬的方式找出防禦上的漏洞並加以改進，以爭取我方在防禦作為上的反應時間，提升重要設施之存

活率；若能進一步研發巡弋飛彈，則在主動攻勢作為上，可將目標區附近的地理資料，結合空中或衛星偵照情資，找出存活率最高之攻擊路徑，達成作戰之目的。本研究除了應用 Dijkstra 演算法外，並結合巡弋飛彈風險場 (Risk Field) 的概念[11,12]，再增加巡弋飛彈實際之飛行條件及限制因素，例如射程、爬升率、迴轉半徑及本身的導航系統等資料，並以自行設計的 3D 立體網格模型為模擬的基礎，來進行整個規劃的研究。爾後，若再加上實際的地理資訊系統 (GIS, Geographic Information System) 為場景，則在軍事應用上將有極大的貢獻。

二、巡弋飛彈飛行路徑數學模型

本文所提出的巡弋飛彈飛行路徑最佳化的數學模型，包括數值地形模型及動態規劃方法的運用、巡弋飛彈風險場的建立及巡弋飛彈飛行參數的限制條件等，茲將各種模型及參數的運用說明如下：

2.1 數值地形模型

為了驗證路徑規劃的結果並作為爾後結合數值地形資料的基礎，本文以 Matlab 應用軟體中之 peak 函數來建立一個虛擬數值地形模型的模擬場景。此場景的內容主要是選取一個 x-y 平面上的模擬區域，再將此一平面等分成 M×N 個區域，並在此一區域上建立一個高度為 $z = f(x, y)$ 的數值地形模型，其表示式如下：

$$z_{ij} = f(x_i, y_j), 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N, \quad (1)$$

其中，下標 i 及 j 分別為 x 及 y 方向的節點編號，而各個方向節點之間的距離則分別以 Δx 及 Δy 來表示，亦即：

$$x_{i+1} = x_i + \Delta x, \quad (2)$$

$$y_{j+1} = y_j + \Delta y, \quad (3)$$

模擬區域之數值地形確定後，發射點 S 與目標點 T ，則可以由使用者自行定義在 x-y 平面上的任何節點上。

2.2 巡弋飛彈風險場

巡弋飛彈風險場 (Risk Field) 的概念，是由 Siva 等學者於 1998 年所提出的[11,12]，其主

要概念是說明巡弋飛彈飛行路徑的選擇可由飛彈所經過飛行路徑的風險值大小來決定。在作法上先假設巡弋飛彈從發射點到目標點的生存機率為 P_s ，再將整體飛行路徑區分為 L 個片段，而每一片段稱為單位長度，當所有單位長度具有相同的長度時，巡弋飛彈每段單位長度的局部生存機率為 p_s ，則整體飛行路徑上，則 L 段單位長度的巡弋飛彈全域生存機率為 p_s^L 。若單位長度不同時（假設全域共有 m 種不同長度之單位長度），則全域的生存機率為各段的局部生存機率之乘積，即

$$P_s = p_{s_1}^{L_1} \times p_{s_2}^{L_2} \times \cdots \times p_{s_m}^{L_m}, \quad (4)$$

依此再定義飛行經過某一路徑時，其單位長度的風險函數 R_j ，最後則可建立全區域的風險值 J 。因此，首先可找出單位長度的巡弋飛彈生存機率為

$$p_s \equiv 1 - p_d p_{ek}, \quad (5)$$

其中， p_d 為以該節點為中心，選擇周圍某個方向節點的機率； p_{ek} 為選定某節點後，該選定方向飛彈被攔截的機率，亦即單位長度內飛彈會被偵測的條件下，其被截殺的機率。由式(5)可知，巡弋飛彈的生存機率與它所在位置以及飛行方向有關，因此，第 j 段單位長度其風險函數可定義如下：

$$R_j \equiv -\ln p_{s_j} = -\ln(1 - p_d p_{ek})_j, \quad (6)$$

其中 p_{s_j} 為第 j 段路徑的生存機率。根據式(4)及式(5)，則全域累積的風險值定義為：

$$J \equiv -\ln P_s = \sum_{j=1}^m -\ln p_{s_j} L_j = \sum_{j=1}^m R_j L_j, \quad (7)$$

其中 L_j 為節點間的長度，且共有 m 個單位長度（不論單位長度是否固定）。由式(7)可知當 P_s 值越大時，則 J 值越小，也就是說風險值越低，全域累積的生存機率就越高。

影響風險值因素之一就是地面雷達的涵蓋範圍，若飛行路徑經過此區域時，越接近雷達站則風險值越高。在實際的應用上，由於運用雷達偵測物體時，雷達波反射回波的強弱 P 與雷達和被測物之間距離 d 的四次方成反比關係，也就是 $P \propto (1/d^4)$ ，這將影響到雷達是否能夠“看到”巡弋飛彈，所以雷達偵測目標的能力與距離的遠近呈現指數性的衰減，同時，外型的設計也關係著巡弋飛彈是否會被雷達“看到”。因此，我們可以依據雷達系統性能的優劣程度與防空武器的部署位置，建構一個巡

弋飛彈完整的風險場，而此一風險場的建立又與前述數值地形模型息息相關，例如：高山地形會遮蔽雷達波的行進而形成偵測上的死角。因此，這些死角區域的風險值較低，相對的生存機率較大，也就是巡弋飛彈可能考量的飛行路徑。

2.3 巡弋飛彈飛行性能

巡弋飛彈的飛行性能會影響到巡弋飛彈路徑的選擇，本文主要考慮下列三個因素，分別為射程、爬升率以及迴轉半徑[13]。

(1)在射程的考量上，巡弋飛彈在飛行時，其飛行距離可以由 Breguet 射程方程式(Breguet Range Equation)[14]來估算，表示如下：

$$R = \frac{L}{D} I_{sp} V_{avg} \ln \left(\frac{W_L}{W_L - W_p} \right), \quad (8)$$

其中， L 為升力(Lift)， D 為阻力(Drag)， I_{sp} 為比衝值(Specific-Impulse)， V_{avg} 為平均速度， W_L 為發射時的重量， W_p 為燃料的重量。一般而言，升力與阻力的比值(L/D)與飛彈外型設計有關，比衝值及平均速度與飛彈推進器的性能有關，而飛彈外殼材料的不同則會影響燃重比 W_p/W_L ，當質量越輕時，相同燃料的條件下則有較遠的航程，以美國戰斧巡弋飛彈為例，其最大射程可達兩千多公里。

(2)在爬升率方面，巡弋飛彈在巡航飛行時，其穩態爬升率(或稱爬升速度)可表示如下[14]：

$$V_c = V_\infty \sin \gamma_c, \quad (9)$$

其中 V_∞ 為全速度， γ_c 為爬升時的飛行路徑角度(Flight Path Angle)。式(9)爬升率可以進一步表為：

$$V_c = (T - D) \frac{V_\infty}{W}, \quad (10)$$

其中 $T - D$ 為推力與阻力的差，又稱為剩餘推力(Excess Thrust)， W 是飛彈飛行過程中扣除消耗燃料後的重量。由式(9)與式(10)可知，當剩餘推力越大時，飛彈爬升率越快，可爬升的角度也越大。

(3)在迴轉半徑的計算方面，巡弋飛彈的迴轉半徑可以表示為[14]：

$$r_T = \frac{2W}{\rho_\infty C_L S_{ref} g}, \quad (11)$$

其中 ρ_∞ 為空氣密度， C_L 為升力係數， S_{ref} 為飛彈的橫截面積。由上式可知，迴轉半徑的大小與飛彈重量成正比，與空氣密度、升力係數與橫截面積等因素成反比。若已知巡弋飛彈的各項參數與諸元，則我們可以推估該型飛彈的最大射程、最大爬升角度與最小迴轉半徑。

綜合上述各節的討論，巡弋飛彈路徑最佳化問題的數學模型，可以描述如下：若給定一組發射點與目標點 (S, T) ，則可找到一組節點的序列

$$D = \{S = d_0, d_1, d_2, \dots, d_{K-1}, T = d_K\}, \quad (12)$$

使得全域的風險值

$$J(D) = \sum_{d_i \in D} R(d_i, d_{i+1}) L(d_i, d_{i+1}), \quad (13)$$

為最小。其中 d_i 與 d_{i+1} 為兩兩相鄰的節點； $R(d_i, d_{i+1})$ 與 $L(d_i, d_{i+1})$ 分別為連結 d_i 與 d_{i+1} 兩節點間的風險值與距離，並同時滿足下列限制：

(1)在射程限制方面：

$$\sum_{d_i \in D} L(d_i, d_{i+1}) \leq R_{\max}, \quad (14)$$

其中 $R_{\max}$ 為巡弋飛彈最大射程。

(2)在爬升率限制方面：

$$\tan^{-1} \left(\frac{\Delta z_{i+1}}{L(d_i, d_{i+1})} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{\Delta z_i}{L(d_{i-1}, d_i)} \right) \leq \gamma_{\max}, \quad (15)$$

其中 $\gamma_{\max}$ 為巡弋飛彈的最大爬升角度， Δz_i 為 d_{i-1} 和 d_i 兩節點間的高度差。

(3)在迴轉半徑限制方面：

$$\beta \geq 2 \tan^{-1} \left(\frac{r_{\min}}{\Delta} \right), \quad (16)$$

其中 $r_{\min}$ 為巡弋飛彈的最小迴轉半徑， Δ 為路徑相鄰節點間之距離， β 為 $\overline{d_i d_{i-1}}$ 與 $\overline{d_i d_{i+1}}$ 兩線段間的夾角。

從上述的討論中可知，若僅考慮同一平面的 8 個方向時，則數學模型是屬於 2D 曲面的模型，主要的限制為節點的選擇只有在該節點四周同一曲面上的八個方向，無法將爬升率的條件考量進去，如圖 1(a)所示。本文將進一步把巡弋飛彈路徑最佳化的問題擴展到 3D 模型的探討，將規劃的範圍延伸至三度空間的 26

個方向，如圖 1(b)所示，以增加更多的路徑選擇彈性。

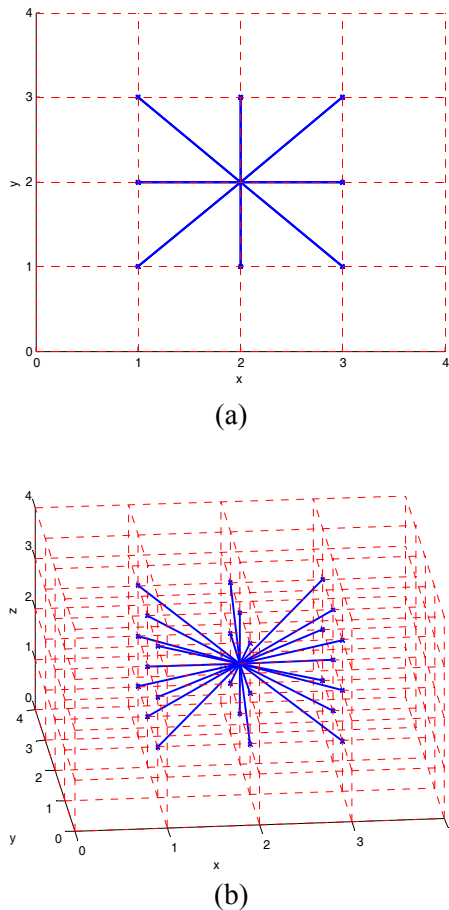


圖 1. (a)2D 網格，每一節點最多有 8 條路徑；
(b)3D 網格，每一節點最多有 26 條路徑。

三、數值計算

3.1 數值演算法

巡弋飛彈飛行路徑最佳化的問題，與圖論 [15] 中單一源頭最短路徑問題(Single-Source Shortest Path Problem)相似，其中圖(Graph)是指由若干節點和連接各節點的連線，或是邊緣(Edge)所組成的。單一源頭最短路徑問題就是在圖中的任意兩節點找出一條路徑，使得連接這兩個節點各個邊緣權重值的和為最小。而對於解決單一源頭最短路徑的問題，已經有數種數值演算法發展出來，例如，Dijkstra 演算法 [8]、Bellman-Ford 演算法 [10] 等，其中 Dijkstra 演算法用於處理邊緣權重值大於或等於 0 的單一源頭最短路徑問題，因為該演算法

具有較快速的運算時間，而 Bellman-Ford 演算法雖然可處理邊緣權重值為負的問題，但是其運算較為複雜，所以一般若無負權值問題的話，都是以 Dijkstra 演算法來處理單一源頭最短路徑問題。

在不考慮式(14)-(16)限制條件的情況下，巡弋飛彈風險場之中，由於各路徑的風險值在已知的條件下均大於 0，因此，Dijkstra 演算法與 Bellman-Ford 演算法互相比較之下，採用 Dijkstra 演算法便可以獲得一最佳路徑，並且可得到較短的運算時間及較少的運算量。但由於巡弋飛彈受到迴轉半徑及爬升率等條件的限制，使得該演算法無法直接運用，因此我們必須同時利用動態規劃的方法來解決此一問題[6,7]。此外，為了符合實際的飛行狀況，本文採用了 3D 網格為模擬基礎，同時也呈現 2D 網格的模擬情況，以便於觀察及比較兩者間的差異。另外，我們也模擬了固定 x、y 軸的間距參數，並改變 z 軸的間距，以觀察間距變化與權重值間之關係。

3.2 3D 網格建立

為了驗證路徑規劃的結果，我們以 peak 函數為基礎來產生本文模擬中所需要的虛擬數值地形模型，此一地形模型在 x、y、z 方向上的網格大小與節點的間距，可由使用者依需要自行訂定大小及長短。本文的例子即是以 x、y 方向各為 25km，z 方向在 -1.5km 至 1.5km 之間的模型為例來進行模擬。此一模型依據實際的地形狀況，包含了山峰與山谷的複雜地形，相較於在[6,7]中的飛行路徑須設定為沿地表飛行，本文之模擬除了可迴避高山地形外，山谷地形則可視威脅的情況，選擇沿地表飛行或在敵情威脅不大的狀況下直接飛越，以減少燃料的消耗，也就是同一網格有不同飛行高度的選擇，此為 3D 網格的路徑規劃優點之一。修正後的數值地形函數可表示為：

$$P(x, y) = P \left(x_{\min} + \frac{2|x_{\min}| \cdot x \cdot s_x}{N_x}, y_{\min} + \frac{2|y_{\min}| \cdot y \cdot s_y}{N_y} \right) \cdot s_z, \quad (17)$$

其中， $P(x, y)$ 為原始的 peak 函數，表示如下：

$$P(x, y) = 3(1-x)^2 e^{-(x^2+(y+1)^2)} - 10 \left(\frac{x}{5} - x^3 - y^5 \right) e^{-(x^2+y^2)} - \frac{1}{3} e^{-(y^2+(x+1)^2)}, \quad (18)$$

$x_{\min} = y_{\min} = -4$ ， $z_{\min} = -8$ 為各方向的最小起算值， $s_x = s_y = 1$ ， $s_z = 5$ 為此三方向的縮放比

例； $N_x = N_y = 25$ 為 x 、 y 方向的網格數。

四、模擬結果

以下分別針對不需考慮風險場的最短路徑模擬、考慮風險場存在的模擬，以及網格解析度與權重值的相互關係進行模擬。

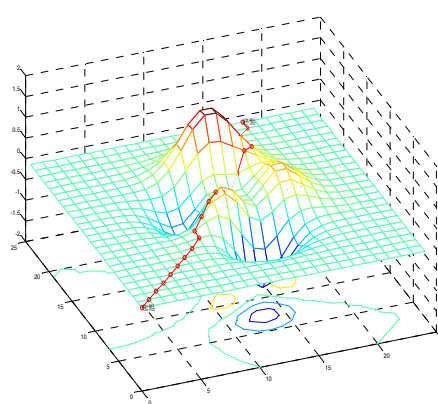
4.1 實驗模擬場景的建立

在實驗模擬的驗證方面，我們根據(17)-(18)式建立 2D 及 3D 數值地形及網格，並進行各種不同情境下的 2D 及 3D 路徑規劃結果的驗證，在 2D 的網格的建立方面，假設 X 及 Y 方向的網格點數分別有 $N_x = 25$ 及 $N_y = 25$ 個，因此共有 625 個 2D 網格，其中 (X_i, Y_j) 與數值地形模型的 (x_i, y_j) 重合。其次，在 3D 的網格規劃方面，假設 X 、 Y 及 Z 方向的網格點數分別有 $N_x = 25$ 、 $N_y = 25$ 、 $N_z = 10$ 個，也就是 6250 個 3D 網格，其中，每一網格座標 (X_i, Y_j, Z_k) 中的 X 、 Y 方向則是與數值地形模型的 (x_i, y_j) 重合，本文為便於計算，模擬時在 Z 方向僅考慮 $Z_k \geq z_{ij}$ 的節點，也就是排除低於地表的情況。對於 2D 的模擬環境設定，巡弋飛彈的發射點設置在 $(0,0)$ ，目標點在 $(19,24)$ ，也就是跨越地圖中央山峰及山谷的水平面對角線位置；而 3D 環境中巡弋飛彈的發射點設置在 $(0,0,0)$ ，目標點在 $(19,24,0)$ 。雖然 2D 及 3D 網格在發射點及目標點的座標表示上不同，但都是在模擬地形相同的位置上。

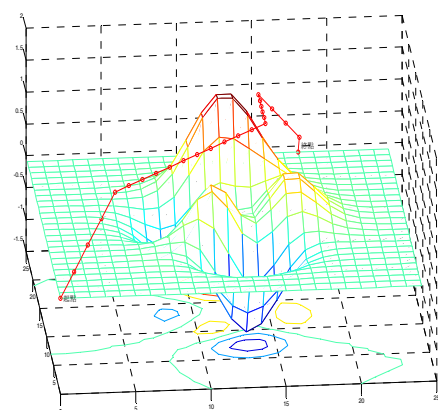
4.2 最短路徑模擬

在 2D 與 3D 模擬的比較上，我們首先產生一個不含防空雷達或防空武器等威脅的場景，分別以 2D 網格及 3D 網格計算由發射點至目標點的最佳路徑，也就是生存機率最大的一條路徑，在此時的最佳路徑就等同是最短路徑；我們以飛行路徑各分段的權重值總和作為最佳路徑的比較標準，權重值越小者表示其規劃結果越佳。在不考慮飛行力學的限制條件之下，直接以 Dijkstra 演算法進行計算，模擬結果如圖 2 所示。比較後可以發現，2D 網格所

計算出來的飛行路徑是沿著地表曲線飛行，其權重值 32.021228 則是整個飛行路徑的距離；而利用 3D 網格所求得的路徑，巡弋飛彈則是爬升至某一固定高度飛行，到達目標前再降低高度，其權重值則為 31.598852，明顯可看出 3D 網格的規劃路徑優於 2D 的規劃結果。由於此時並未考慮巡弋飛彈的爬升率或是迴轉半徑等問題，所以模擬出來的路徑純粹為最短路徑，若加上巡弋飛彈特性及戰術運用的需求之後，則可達到實際運用的程度。



(a)



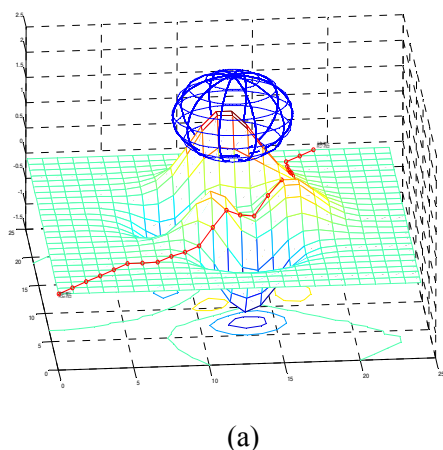
(b)

圖 2. 不考慮飛行力學限制的路徑規劃結果：
(a) 2D 網格規劃結果，權重值 32.021228；
(b) 3D 網格規劃結果，權重值 31.598852。

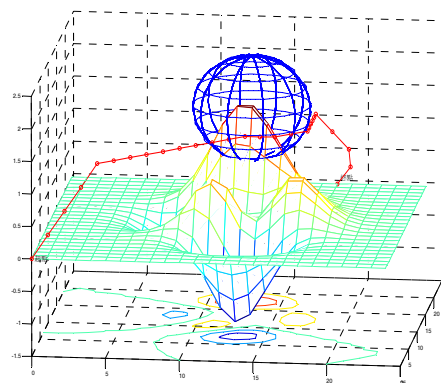
4.3 考量風險場存在的模擬

其次，我們再建立一個建置有防空雷達與防空武器的風險場模擬場景，由於運用雷達偵測物體時，雷達波反射回波的強弱 P 與雷達

和被測物之間距離 d 的四次方成反比關係，也就是 $P \propto (1/d^4)$ ，如圖 3 所示，圓球區域為防空雷達與防空武器涵蓋的範圍，表示其為風險較高的區域。當風險場大小改變時，節點的權重值跟著改變，路徑規劃的結果也就不相同，如圖 4 及圖 5 分別顯示了半徑分別為 4 單位及 8 單位的威脅區域存在時巡弋飛彈避開該區域的飛行路徑。為了驗證 3D 網格規劃優於 2D，我們分別以 2D 網格及 3D 網格計算由發射點至目標點的最佳路徑，同時考慮飛行力學的限制，例如圖 4 及圖 5 分別根據(15)及(16)式，限制最大爬升角度為 $\gamma_{\max} = 45^\circ$ 以及迴轉半徑 $r_{\min} = 90^\circ$ ，再運用動態規劃演算法進行計算。結果顯示 3D 網格的規劃方式只需由原高度避開雷達區域即可，並且，在同一高度時與威脅源距離不同則權重值亦不相同；同時，若再考慮雷達波向上輻射的角度問題，則雖然是相同的飛行高度，但因威脅程度不同，權重值也就不相同。但是 2D 網格的規劃方式，因為其無法定義不同高度，所以，為了確保路徑垂直方向不會被雷達掃描區域所涵蓋，則必須增加飛行路徑(亦即貼地飛行)，權重值也就跟著增加了。因此，在規劃上缺乏彈性，所以，無法運用到實際巡弋飛彈的路徑規劃問題上。

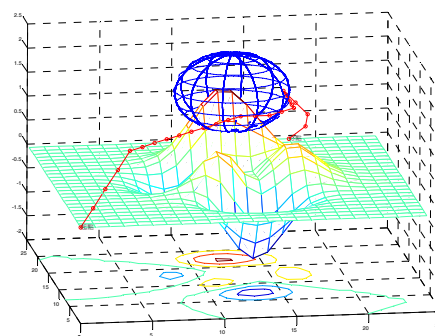


(a)

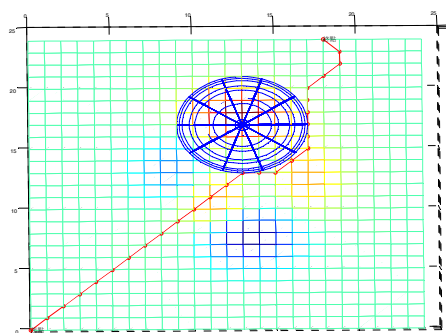


(b)

圖 3. 考慮飛行力學限制的路徑規劃結果：
(a) 2D 網格規劃結果；
(b) 3D 網格規劃結果。



(a)



(b)

圖 4. 半徑為 4 單位的威脅區域路徑規劃的結果，權重值 32.784625：
(a) 立體圖；
(b) 俯視圖。

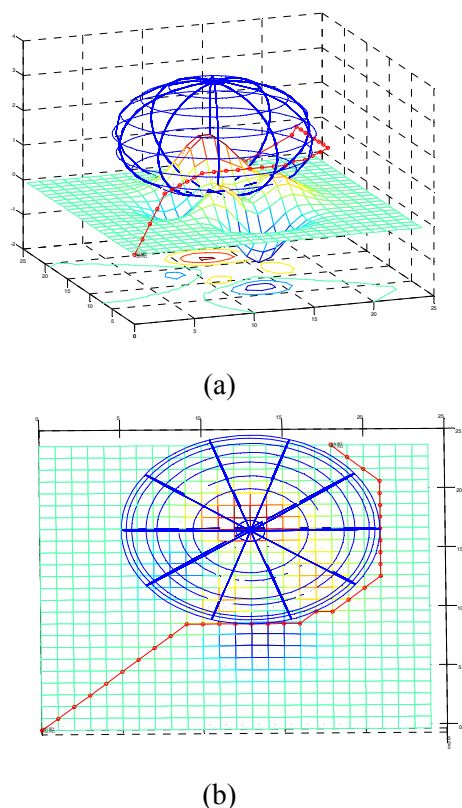


圖 5. 半徑為 8 單位的威脅區域路徑規劃的結果，權重值 38.698921：
(a)立體圖；
(b)俯視圖。

4.4 網格解析度與權重值的關係

為了驗證 3D 網格權重值與網格間距變化之關係，我們模擬了固定 x 、 y 軸參數並改變 z 軸間距(雷達半徑固定為 4km)，以觀察間距變化與權重值之間的關係，當間距越小時，權重值亦減少，顯示越接近最佳路徑，模擬結果如圖 6 所示，其中，虛線為一參考線，由此可看出，模擬結果接近於指數變化的趨勢，當網格間距愈小時，其權重值逐漸收斂，值得注意的是當網格的解析度大於地形變化的解析度時，權重值會有收斂的情形發生，例如圖 6 中當 z 軸間距小於 0.05 時，權重值收斂於 32.627 附近，此一結果可作為選定網格高度間距的參考依據。

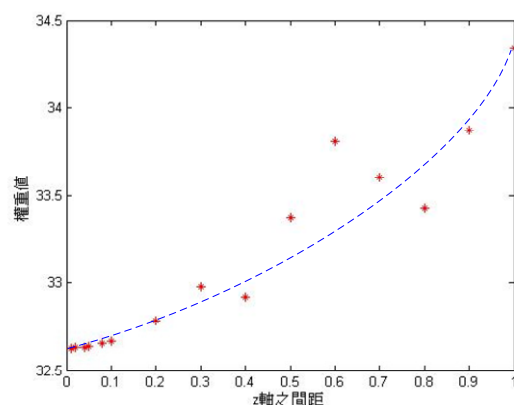


圖 6. z 軸間距變化與權重值之關係圖。

五、結論

本文提出一個創新的巡弋飛彈飛行路徑規劃最佳化的規劃方式，文中除了延伸 Siva 巡弋飛彈風險場的概念，並考慮巡弋飛彈各種飛行限制條件。路徑規劃所採用的 3D 網格模型使得模擬結果更接近真實景況，也就是同一網格點可以有不同飛行高度的選擇，相較於 2D 曲面的網格模型，3D 網格的路徑選擇數可達 $(26/8)^N$ 倍之多(其中 N 為網格點總數)，顯示出 3D 網格比 2D 網格的規劃方式具有更多的選擇空間。此外，當 x 、 y 軸間距固定，變動 z 軸間距大小時，由圖 6 可看出，當其間距越小，則網格數越多，此時因為可選擇的路徑增加了，所以權重值也就跟著降低，表示此時演算法所求得的路徑，更接近最佳路徑，也顯示出本研究的結果具體可行。

本研究不論是在攻擊或在防禦上，都具有相當程度的研究價值。在攻擊方面，除了可以結合數值地形模型，並可配合各種可供運用之載具，提供我軍打擊敵方最佳的路徑規劃，以達到事半功倍之效。在防禦方面，則可與我軍防空雷達、武器系統以及敵方各種巡弋飛彈參數相整合，並且進一步與真實數值地形相結合，以便模擬出敵方巡弋飛彈各種可能的攻擊景況，找出數條機率最大的攻擊路徑，進而發掘出我方防禦上的漏洞，並予以補強或修正相關設施的配置，進而減低敵方攻擊成功的機率，進一步提升我軍在敵方第一擊後的存活率，用以保存反擊的戰力。

本研究所提出的 3D 網格作法未來也可延伸其應用，例如飛彈姿態與雷達相對應位置間

之雷達截面積之變化關係模型等，使得路徑規劃結果更具實用性。

參考文獻

- [1] 李建生、何孟君，“中共攻陸巡弋飛彈發展與我地面部隊防護與反制作為”，陸軍步兵季刊，第 218 期，頁 3-18，2005。
- [2] 李雨林，“共軍巡弋飛彈發展與威脅”，國防雜誌，第 18 卷第 2 期，頁 96-108，2002。
- [3] 胡元傑譯，“中共之巡弋飛彈發展”，國防譯粹，第 31 卷第 7 期，頁 111-118，2004。
- [4] 林中斌，“反制巡弋飛彈破解硬殺點穴戰”，中國時報，2000 年 2 月 24 日。
- [5] 何小林，“巡弋飛彈偵測與防禦研析”，海軍學術月刊，第 36 卷第 11 期，頁 37-46，2002。
- [6] 郭柏廷，低空飛行載具之路徑規劃，台大應力所碩士論文，2001。
- [7] 蔡境倫，飛行載具之路徑規劃與高度計誤差分析，台大電機工程研究所碩士論文，2002。
- [8] Dijkstra, E. W., “A Note on two problem in connexion with graphs”, Numer. Math., Vol. 1, pp. 269-271, 1959.
- [9] Bertsekas, D. P., “Dynamic programming and optimal control”, Athena Scientific, 1995.
- [10] Bellman, R., Dynamic Programming, Princeton Univ. Press, Princeton, 1957.
- [11] Siva, N. S., Bigelman, P. A., Lee, L. T., “The probability of negation of a cruise missile”, AIAA Missile Science Conference, pp 1-7, 1998.
- [12] Siva, N. S., and Collins, S. K., “Probability of negation for cruise missiles using lease defendable routes”, 8th Annual AIAA/BMDO Technology Conference and Exhibit, pp. 1-25, 1999.
- [13] Fleeman, E. L., Tactical Missile Design, AIAA Education Series, pp.197-217, 2001.
- [14] Houghton, E. L., and Carruthers, N. B., Aerodynamics for Engineering Students, Edward Arnold, 1982.
- [15] Wilson., R. J., Introduction to Graph Theory, Harlow, Longman, 1996.

