

應用地理資訊系統於船舶近岸航行 自動避障航路規劃之研究

A Study of Automatic Route Planning for Obstacle Avoidance in Coastal Navigation by GIS

薛朝光*、李雨懂**、莊詠琳***

摘要

完善的航路規劃係航行前不可或缺的重要工作，目前電子海圖顯示與資訊系統 (ECDIS) 在船舶上已普遍被使用於輔助航路規劃；然現行 ECDIS 於遭遇礙航區時僅具有警示功能，而仍需透過航行員依個人經驗手動調整轉向點，進行避障航路規劃，以致相對減低了 ECDIS 的實質助航效益。因此本研究乃基於 ECDIS 之功能架構，在考量航行員於規劃船舶近岸航路的實務需求下，透過偏航角最小原則作為繞過障礙物外圍邊界之避障概念，並運用 GIS 在空間資料處理上優異的功能特性，反覆進行圖層分析運算，以規劃避障航路；同時藉由截彎取直方式減少航路點及簡化路徑，以縮減因避障所致增加之航程距離，而建構可符合實際航行所需的船舶自動避障航路規劃模式。最後藉由情境與實例測試之結果分析與探討，充分顯示出本研究所發展自動避障航路規劃模式良好的分析成效及適用情形，期可有助於航行員在進行航路規劃時之建議，並提供後續 ECDIS 與航路規劃自動化整合發展的參考。

關鍵詞：避障、航路規劃、電子海圖顯示與資訊系統、地理資訊系統

ABSTRACT

Appropriate route planning is an important part before navigation. The Electronic Chart Display and Information System (ECDIS) on board is used to assist navigator in route

-
- * 薛朝光 Chao-Kuang Hsueh，國立臺灣海洋大學商船學系助理教授，國立臺灣海洋大學工學博士。
E-mail: ckhsueh@mail.ntou.edu.tw
- ** 李雨懂 Yu-Chong Li，國立臺灣海洋大學商船學系碩士。
- *** 莊詠琳 Yung-Lin Chuang，國立臺灣海洋大學商船學系碩士生。

planning, and displays voyage information. ECDIS will show warning message while the preliminary route made by ECDIS passes through unnavigable areas. However, a safety detoured route (obstacle avoidance route) is still required manual judgments and adjustment. It might relatively reduce the navigational aid benefits of ECDIS, since the lack of manipulative experience or the negligent judgment and verification. Depending on the navigator's requirements for the practical route planning, therefore, the purpose of this study is to develop an ECDIS-based model for obstacle avoidance route planning in Coastal Navigation. This is done on the basis of the least difference in course rule as an obstacle avoidance concept for detouring along the barrier boundary and according to the excellent capacity of GIS in spatial data processing to conduct a series of spatial overlapping analyses. The model proposed also consists of the route straighten process to simplified detoured path and reduced the number of waypoint for minimize the increased distance of obstacle avoidance route. Finally, the analyzed results of scenario tests and practical case studies all indicated that the model proposed in this study has enough ability for obstacle avoidance route planning and is to be provided with good applicability. It provides a reference for the subsequent development of an automated route planning module integrated into the ECDIS system, and could also assist navigators in their route planning implementation.

Key words: Obstacle Avoidance Route Planning, ECDIS, GIS.

壹、緒論

航路規劃是航行前重要的準備工作之一，若能在啟航前使用適當的工具協助規劃，便可有效地減少因經驗不足或人為疏忽所造成的影響。隨著科技發展，助航設備結合地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)在空間資料處理上優異的能力，進行圖層套疊分析運算，適時調整航行路線，以達到安全航行的目的。現今船隻大多使用向量式(vector)海圖之電子海圖顯示與資訊系統(Electronic Chart Display and Information System, ECDIS)作為航路規劃的輔助設備，國際海事組織(IMO)也在 MSC Resolution 282(86)的決議上要求所有大於 500 總噸的商船最遲須於 2018 年以前完成 ECDIS 的安裝；海上人命安全公約(Safety of Life at Sea Convention, SOLAS)也在 2010 年修正案中規定 ECDIS 為一般船舶航行時之必要設備，除顯示各項海圖資料外，亦整合駕駛台多項航儀之相關訊息，規劃及展示各項航路資訊。然而 ECDIS 在航路規劃的過程中，仍須先透過有經驗之航海員於紙海圖上手動規劃計算，再輸入各航路點經緯度才能加以分析計算，無法直接透過系統本身主動提出安全航路建議，增加了人為疏失的可能，故如何妥當建議避障航路，以供航行員在進行航路規劃時參考，遂成為船舶航行安全上一項相當重要的研究課題。

現今航海技術日趨進步與科技迅速的發展，若能於啟航前妥善地規劃出避開礙航區的航路，並在 ECDIS 之功能架構下利用 GIS 在空間資料分析上優異的處理能力，進行圖層套疊且根據礙航區分佈情況逐一進行圖層空間分析運算，並調整航行路線及修訂簡化航線，以自動擬定出最佳避障路徑，作為航海者規劃航路時之參考，便可大幅降低人為疏失所造成的影響。其中，賴奕安(2008)與薛朝光等人(2015)皆在向量式 ENC 之架構下，運用自動導航車所採繞過障礙物外圍邊界之避障概念，於初始航路遭遇礙航區時即透過 GIS 幾何圖像之空間分析功能，產生一或多個可涵蓋各礙航區範圍之最小矩形邊界，並根據此最小矩形邊界之四個角隅點分別建立有效繞過礙航區兩側之避障航路。然而，該角隅點避障模式雖可成功建立避障航路，但在遭遇起迄點位於同一礙航區（陸塊）兩側；或不同礙航區分佈位置相近（如峽灣或狹窄水域）致兩者最小矩形邊界上角隅點與礙航區範圍有所重疊時，便可能因模式限制而出現大幅繞路或甚至無法有效完成避障航路規劃的情形。

為改善此一問題，本研究乃參考大陸學者張立華等人(2007)所提出的方位相差最小原則，即繞行礙航區偏航角度最小及航段距離最大之避障方法，並結合多障礙避障機制來修訂改善既有避障模式的限制，以有效避開礙航區而達成安全且符合航行所需之避障航路規劃，最後再使用避障航路簡化模式，減少轉向點，達成最精簡且安全的航路產生。

貳、文獻回顧

航路規劃是航海相當重要的工作之一，若能在啟航前完整規劃出避開礙航區的航路，海事事故發生機率便會下降，航行安全亦會大幅地提升。本研究以符合航海者之觀點，藉由航路規劃相關之參考文獻，建立一套船舶避障航路規劃之模式，並透過地理資訊系統相關資料蒐集，思考及分析出適合航海者的航線規劃。由於目前避障路徑搜尋法大多應用於陸地上之路徑規劃，僅少數研究能應用於海上之航路規劃，卻又侷限在網格式(raster)之海圖上，以致似乎難以直接將其與向量式圖層為主之地理資訊系統或電子航器 ECDIS 做最有效率之整合，因此本研究針對目前所蒐集的避障航路規劃自動化及整合至地理資訊系統之相關研究綜整如下。

2.1 避障航路規劃之相關研究

有關目前航路規劃之相關研究大都應用於網格式的圖資，因其與傳統紙海圖較為相似，且每單位空間具有大小與形狀相同之特性，故較易進行空間之分析。其中 Beattie (1995)曾利用電子海圖(ENC)與 GIS 技術來發展船舶自動導航系統。Jan et al. (1997)提出八方向最短路徑搜尋法，以輻射狀的方式進行路徑搜索，Chang et al. (2003)再將其輻射狀八方向搜尋法更細分為 16 方位作為搜尋最佳路徑之模式。而陳志平(2006)則應用 Jan

(1997)的八方向最短路徑搜索法，在網格式圖資上解決路徑上遭遇障礙物的規劃問題，再將其應用到海上找出避開障礙物的最短路徑。Fawcett and Robinson (2000)亦曾針對道路地圖的繞行問題提出解決方法。陳傳波等人(2003)研究了繞行不可航區的最短路徑搜索算法，基於電子海圖自動搜索海上任兩點之間的最短距離，提出了一種在不可航區中兩點間最短路徑的算法，利用所要繞行不可航區的頂點與測試線距離最小原則，建構了自動繞行不可航區機制，但尚無法有效處理複雜不可航區航線的生成。Szlapczynski (2006)針對船舶避開障礙物或避免相互碰撞提出演算法來尋求最佳路徑規劃解決之道。蘇建民等人(2009)為使船舶於遭受海象因素影響下仍可維持在原先所規劃的航路上，乃針對網格式的電子海圖，藉由向量解析概念導入船舶向來調整航路，並以高維迷宮式搜尋演算法來處理具水流之船舶最佳航路規劃問題。然上述文獻所提出之方法僅限使用於網格式海圖上，而無法直接與向量式(vector)海圖之電子海圖顯示與資訊系統(Electronic Chart Display and Information System, ECDIS)，或海洋地理資訊系統(Marine Geographic Information System, MGIS)進行整合應用；且部分方法所規劃之航路僅以障礙物幾何形狀和距離為考量，雖可避開障礙物，但實際上會有沿著障礙物周圍不斷轉向的情況出現，以致轉向點過於繁複，較不符合航行使用。

其次至於在船舶避障航路規劃之研究上，張立華等人(2007)為優化軍艦航路規劃提出了一種基於電子海圖的航線自動生成方法，首先透過追蹤等深線，找出不可航區，然後進行不可航區的擴充、處理，得到可航行區域，在可航行區域進行路徑的測試，利用方位相差最小原則，分別對繞行障礙物兩側之路徑進行分析運算，自動規劃出一條最短距離的航線，並根據不可航區的動態變化，適時更新調整和優化航線。此種方法與傳統手動規劃航路所花費的時間明顯減少許多，航線的距離也縮短不少。Tsou (2010)使用了最小邊界矩形將障礙物擴大到適當的範圍，建立航路判斷是否與不可航區相交，並作垂直線經過與航路相交之不可航區的中心點，又與不可航區產生另外兩的交點並和最小邊界矩形也產生兩個交點，在不可航區與最小邊界矩形兩個交點產生的線段中採用改進的遺傳演算法選取適當的航路點，航路規劃好之後利用 Douglas- Peucker algorithm (Douglas and Peucker, 1973)簡化路徑，最後得到最短距離的航路。陳智鵬等人(2010)提出了長條狀障礙物情況下兩點間最短距離的求解方法，透過繞過障礙物之上下邊界點，求取兩點間之最短距離，然而不可航區受限於長條形之分布情況，較不符合實際航行中所遇之其他不規則分布情形之不可航區。

蒐集彙整目前關於 ECDIS 航路規劃之研究中，薛朝光等人(2015)在向量式 ENC 之架構下，運用自動導航車所採繞過障礙物外圍邊界之避障概念，於初始航路遭遇礙航區時即透過 GIS 幾何圖像之空間分析功能，產生一或多個可涵蓋各礙航區範圍之最小矩形邊界，並根據此最小矩形邊界之四個角隅點分別建立有效繞過礙航區兩側之避障航路。然而，該角隅點避障模式雖可成功建立避障航路，但在遭遇起迄點位於同一礙航區（陸塊）兩側；或不同礙航區分佈位置相近（如峽灣或狹窄水域）致兩者最小矩形邊界上角

隅點與礙航區範圍有所重疊時，便可能因模式限制而出現大幅繞路或甚至無法有效完成避障航路規劃的情形。

2.2 海洋地理資訊系統之相關研究

海洋地理資訊系統是從地理資訊系統而來，將地理資訊系統的應用轉移到海洋上面，因此，使用海洋地理資訊系統來做海洋空間資料分析、管理與提供決策時之參考的依據，並在航海上作事前的航路規劃並展示出來，使涵蓋範圍廣闊的海洋提供服務有效地減少事故發生率。在管理的方面，賴新元(2004)以船舶交通服務系統(Vessel Traffic Service, VTS)的觀點來探討船舶避碰系統的決策管理需求，並將 MGIS 的概念加入於 VTS 的避碰系統之中，利用其強大的系統分析功能，在向量式海圖上解算船與船之間空間關係，並可迅速地支援決策，在繁忙的港口提供幫助，並減輕人員作業的負擔。

而在支援決策方面，張德龍(2003)提出應用海洋地理資訊系統之分析能力來建立海洋油污染管理的系統規劃，其採取螢幕數化的方式，藉以取得較準確的地理位相資訊，透過海洋資訊系統有效地對海上油污染進行監控，再利用決策支援系統幫助油污染事件發生時，能夠有效地掌控油污染事件。邱柏翰(2009)利用 MGIS 將傳統海圖依人工方式以文字註記各海圖、人工繪圖工具，透過數位板、電腦及繪圖機繪製成海洋數位地圖，並以 GIS 系統軟體作為圖層分析與資料庫管理等相關 GIS 之作業，運用各項海洋資料庫及工具，將海洋世界的面貌與事件簡化，套入電腦分析，可輔助管理者在做決策時之最佳判定。蘇健民(2010)使用操船模擬機反覆實際操演，使會遇船舶不進入碰撞危險領域情況下，保持安全距離相互通過，將資料予以記錄，由於考量航行安全及經濟效益，因此，藉由 MGIS 空間分析決策與空間資料篩選功能，經統計分析之計算可快速找出最佳路徑模型輸入資料庫，決定船舶最佳復航路徑。Tsou (2010)為了有效地提高航路規劃的效率，採用地理資訊系統為平台，透過其空間資料管理、空間分析及幾何運算的能力，檢測不可航區的存在及自動生成備選航路群組，再利用演化演算法消除多餘航路並得到最佳的航路。

因此，參考前人研究並基於航路規劃對確保船舶航行安全及營運效益上的重要性，本研究根據 ECDIS 之功能架構，以 GIS 的空間分析(Spatial analysis)工具，與其它空間資料處理之功能模組為基礎，在考量航行員於規劃船舶近岸航路的實務需求下，運用 GIS 在空間資料處理上優異的功能特性，透過轉向角度最小及航段距離最大之偏航角最小原則作為繞過礙航區外圍邊界之避障概念，來修訂改善現有避障模式的限制，依初始規劃航路所遭遇礙航區之不同分佈情形，反覆與海圖圖層資訊間的幾何圖像進行分析運算以規劃避障航路，同時藉由截彎取直的原則，減少航路點及簡化路徑以縮減因避障所致增加之航程距離，再透過航法解算，以具體呈現各航路於啟航點至目的點間之各航段詳細規劃資訊（如：轉向點位置、航向、航程距離等），而發展出可用於輔助實務航行上之

船舶避障航路規劃自動化模組，最後將其程式化，除供後續 ECDIS 與航路規劃自動化的整合發展外，期可對航行員於航路規劃之實務作業上有所助益。

參、船舶避障航路規劃模式建構

本研究參考張立華等人(2007)之方位相差最小原則作為建構船舶避障模式的概念，藉由選取避障角度較小的一側規劃航路，使船舶因避障而偏離原航路能有較小之偏航角度，除可限縮因避障所需增加的航程距離外，在繞行礙航區邊界時，該原則採轉向（偏航）角度最小的方式亦可確保規劃之路徑其各轉向角度變化均小於 90° ，而不致出現走回頭路或掉頭朝反方向前進的情形，符合航行實務所需。同時，本研究也在薛朝光等人(2015)採用 GIS 所發展之船舶避障模式的基礎上，修訂航線所遭遇多礙航區且不同分佈情形下之避障航路建構模式，改進其多障礙避障機制的不足，且根據截彎取直使各航路點間航段距離最大之概念，減少航路點及簡化路徑以縮減因避障所致增加之航程距離，使分析模式能在 ECDIS 的架構下，有助於航行員於實務近岸航路規劃時之所需。

3.1 避障航路規劃模式

為達到自動避開礙航區且符合航海者導向之目的，提供適當的航路作為航行依據，便有其安全上之必要性。本研究以初始航路（測試線）遭遇陸地、淺灘或水下障礙物等礙航區與否，來判斷是否變更原航線，同時，藉由轉向角度最小及航段距離最大之偏航角最小原則來選擇航路，最後透過路徑簡化求得最短航路，以達到自動規劃出能夠安全避開礙航區且符合航行實務之建議航線。完整船舶避障模式執执行程序說明如下（流程圖如圖 1 所示）：

程序 1：輸入起始點與目的點與避障安全距離後，以避障安全距離為依據，環域分析擴大各礙航區範圍，作為後續避障分析之依據。

程序 2：將起始點設為當前測試點，由當前測試點至目的地點建立一條連線作為測試線，利用圖層套疊分析判斷該測試線是否與礙航區有交集。若未經任一礙航區，即兩點間可直線連接，該測試線便轉為備選航路並結束航路規劃；反之，若遭遇任一礙航區則先判斷當前測試點是否位於最近礙航區邊界上之任一頂點。如為最近礙航區上之頂點，便執行**程序 3**，否則進行**程序 4**。

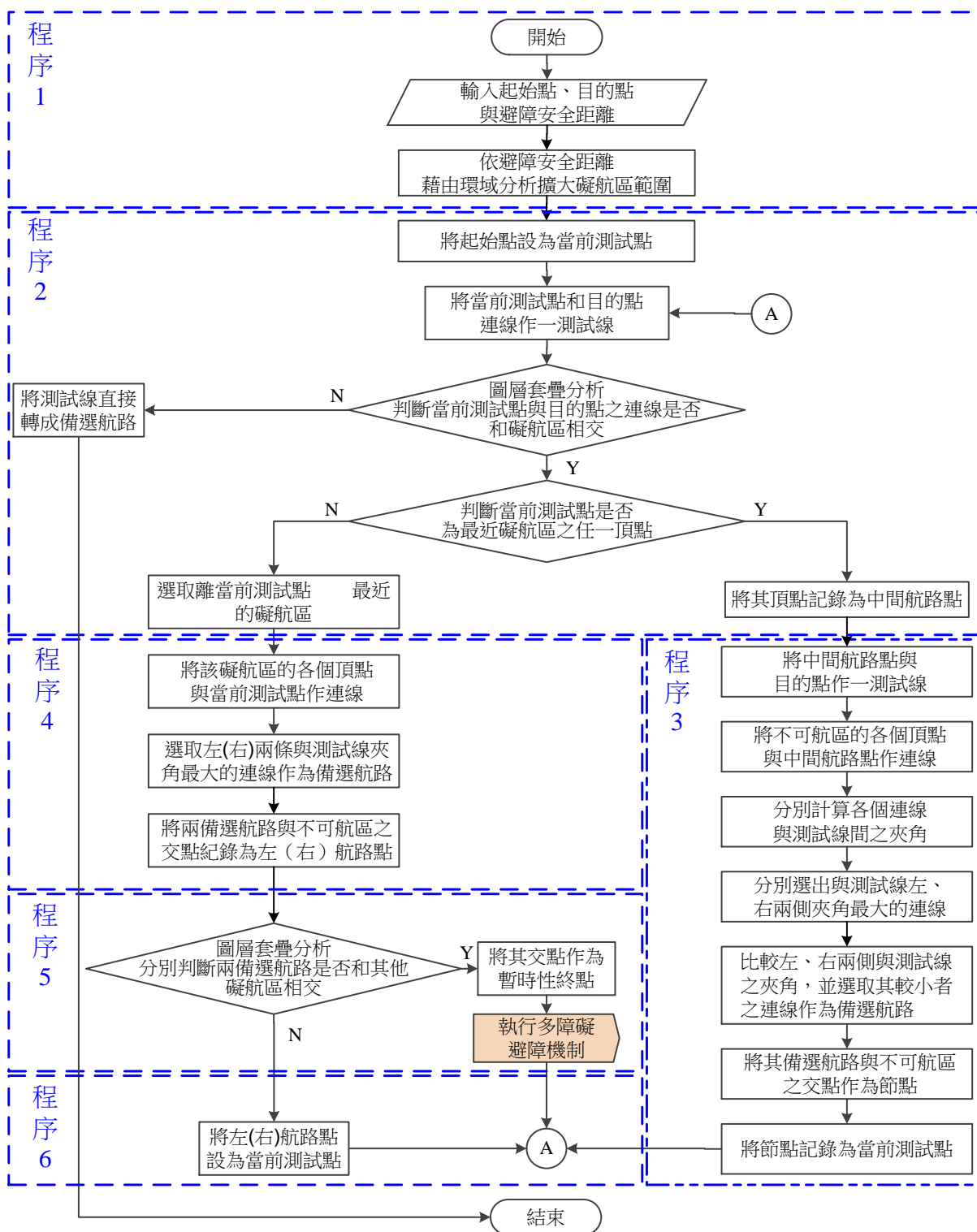


圖 1. 船舶避障規劃模式流程圖

程序 3：將當前測試點（即位於最近礙航區邊界上之某一頂點）設為中間航路點，接著將其與目的點作一測試線後，進行對該障礙區繞行的動作，將位於該礙航區邊界上的各頂點與中間航路點逐一加以連線，並分別計算各連線與測試線間之夾角，先求出與測試線左（右）兩側夾角最大的連線（即能夠避開障礙物之最小角度），再根據偏航角最小原則，比較左、右兩側與測試線之夾角，選取其較小者之連線，作為備選航段，並將該備選航段與礙航區之交點紀錄為節點，即當前測試點，返回**程序 2**。由於此程序根據礙航區的頂點及邊界可建立繞過該礙航區的備選航段，再藉由返回**程序 2** 重覆執行，便可逐步建立一條繞過礙航區之航路。

程序 4：選取離當前測試點最近的礙航區，將當前測試點與該礙航區邊界上的各頂點逐一加以連線，且分別計算各連線與測試線間之夾角，由偏航角最小之原則，選取與測試線左（右）兩側夾角最大的連線（能以最小角度避開礙航區），分別記錄左（右）兩條最可能航線為備選航段，並將兩備選航段與礙航區之兩交點各別記錄為左（右）航路點，進入**程序 5** 進行判斷。

程序 5：利用圖層套疊分析，分別判斷兩備選航段上是否經過其他礙航區。若未與其他礙航區有交集，便執行**程序 6**；反之，則將該備選航段之交點設為暫時性終點，並啟動執行多障礙避障機制，完成後返回**程序 2** 接續執行。

程序 6：將左（右）航路點分別設為當前測試點後，返回執行**程序 2**，並依序將左（右）當前測試點和目的點個別連線以建立測試線，同時利用圖層套疊分析判斷該測試線是否與礙航區有所交集，直到左（右）當前測試點和目的點間的連線均不會經過任一礙航區止。

綜整上述，本研究採偏航角最小原則作為建構船舶避障模式之繞行礙航區的主要概念，在航路規劃的過程中，當遭遇礙航區時，先求得能避開障礙物之最小角度連線（即與測試線夾角最大之連線），並直接記錄左（右）兩條可能行駛的路徑。然而，沿著礙航區繞行時，將礙航區的各個頂點與中間航路點作測試，分別計算並選取左、右兩側與測試線夾角最大之連線，比較兩者之大小後，取其較小者之連線作為備選航段，使繞行的路唯一。若建立的備選航段與其他礙航區仍有交集時，也須分別計算並選取角度較小之連線，但遇到新的礙航區，又必須由測試點再次建立兩條航路。故針對初始航路遭遇單一礙航區之避障航路建構情形，如圖 2 所示，步驟整理說明如下：

步驟 1：如圖 2(a)所示，某段初始航路 S-T（為麥氏海圖上兩點間採恆向線之最短航行距離）經過一礙航區 A，輸入避障安全距離，藉由環域分析擴大礙航區範圍，接著進入**步驟 2**。

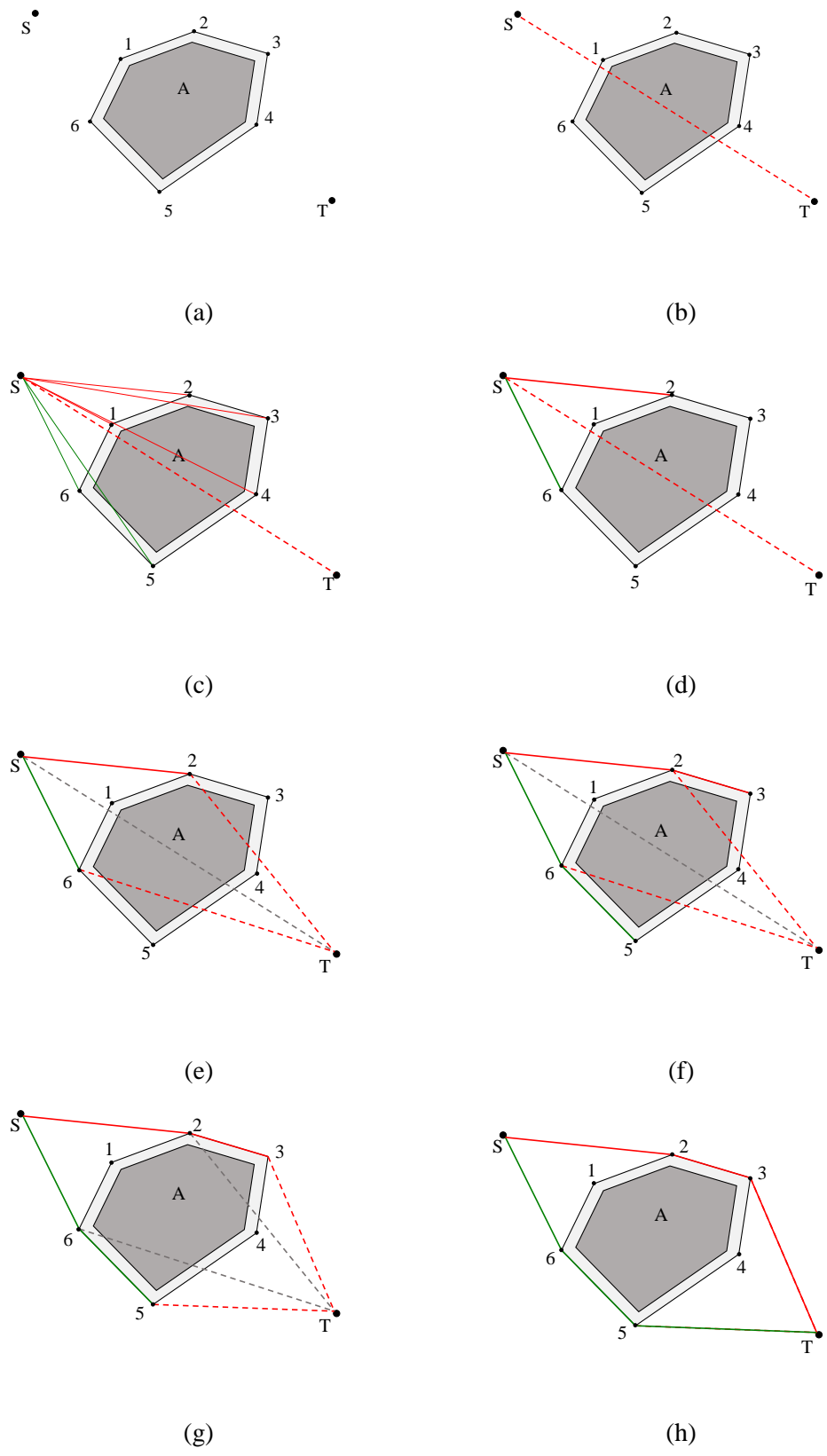


圖 2. 船舶單障礙避障機制航路建構示意圖

步驟 2：將起始點 S 與終點 T 分別設為當前測試點及目的點，並建立兩點間的連線，即為 S - T 測試線如圖 2(b)所示。該測試線與礙航區 A 經圖層套疊分析後確認有交集，接著判斷當前測試點 S 並非最近礙航區 A 邊界上之任一頂點，進入**步驟 4**。

步驟 3：由 S 點依序與 A 礙航區邊界上之各頂點逐一連線（如圖 2(c)），並個別計算與 S - T 測試線間的夾角後，分別選出位於 S - T 測試線左、右兩側與其夾角最大的連線（如圖 2(d)之 S - A_2 與 S - A_6 ），且經圖層套疊分析確認均無遭遇任何礙航區後，紀錄兩條路徑並將 A_2 、 A_6 兩點設為當前測試點，返回**步驟 2**（如圖 2(e)）。

步驟 4：將 A_2 和終點 T 作連線，即為 A_2 - T 測試線，判斷此測試線（ A_2 - T ）是否和任一礙航區相交，由於該測試線仍與 A 礙航區有所交集，故由 A_2 點依序與 A 礙航區邊界上之各頂點逐一連線，並個別計算與 A_2 - T 測試線間的夾角後，依據偏航角最小原則，將位於 A_2 - T 測試線左、右兩側與其夾角最大連線之相對較小者，如圖 2(f)之 A_2 - A_3 所示，並經圖層套疊分析確認後記錄為備選航段，而 A_3 亦記錄為新當前測試點。左（右）側航路重複上述過流程（如圖 2(g)），即可求得接續之備選航段 A_3 - T ，以及 A_5 - T ，而結束單障礙之避障航路規劃，如圖 2(h)所示。

3.2 多障礙避障機制

當航路規劃過程中，生成航路與其他礙航區相交時，則啟動多障礙避障機制。多障礙避障機制須以測試點為基準，將該礙航區各個頂點與中間航路點逐一連線（測試線）進行測試，以偏航角最小原則為基準，為避免有過多繞行之情況發生，會刪除偏航角度較大之備選航路，只選角度較小的一側。執行程序之流程如圖 3 所示，並藉由圖 4 之多礙航區分佈為例來依序說明本研究所建構的多障礙避障機制。

程序 1：起始點 S 至目的地點 T 之航路規劃過程中，經由圖層套疊分析，其左側備選航路段與其他障礙物 B 相交（如圖 4(a)），啟動多障礙避障模式，將 A_1 設為暫時性終點， S 為新當前測試點，兩者之連線 S - A_1 為測試線。

程序 2：選取和測試線 S - A_1 相交，且離新當前測試點 S 最近之礙航區 B ，將其各個頂點與 S 做連線，並比較與測試線夾角大小，分別選出左（右）夾角最大者作為備選航路段。如圖 4(b)上之 S - B_1 與 S - B_4 。

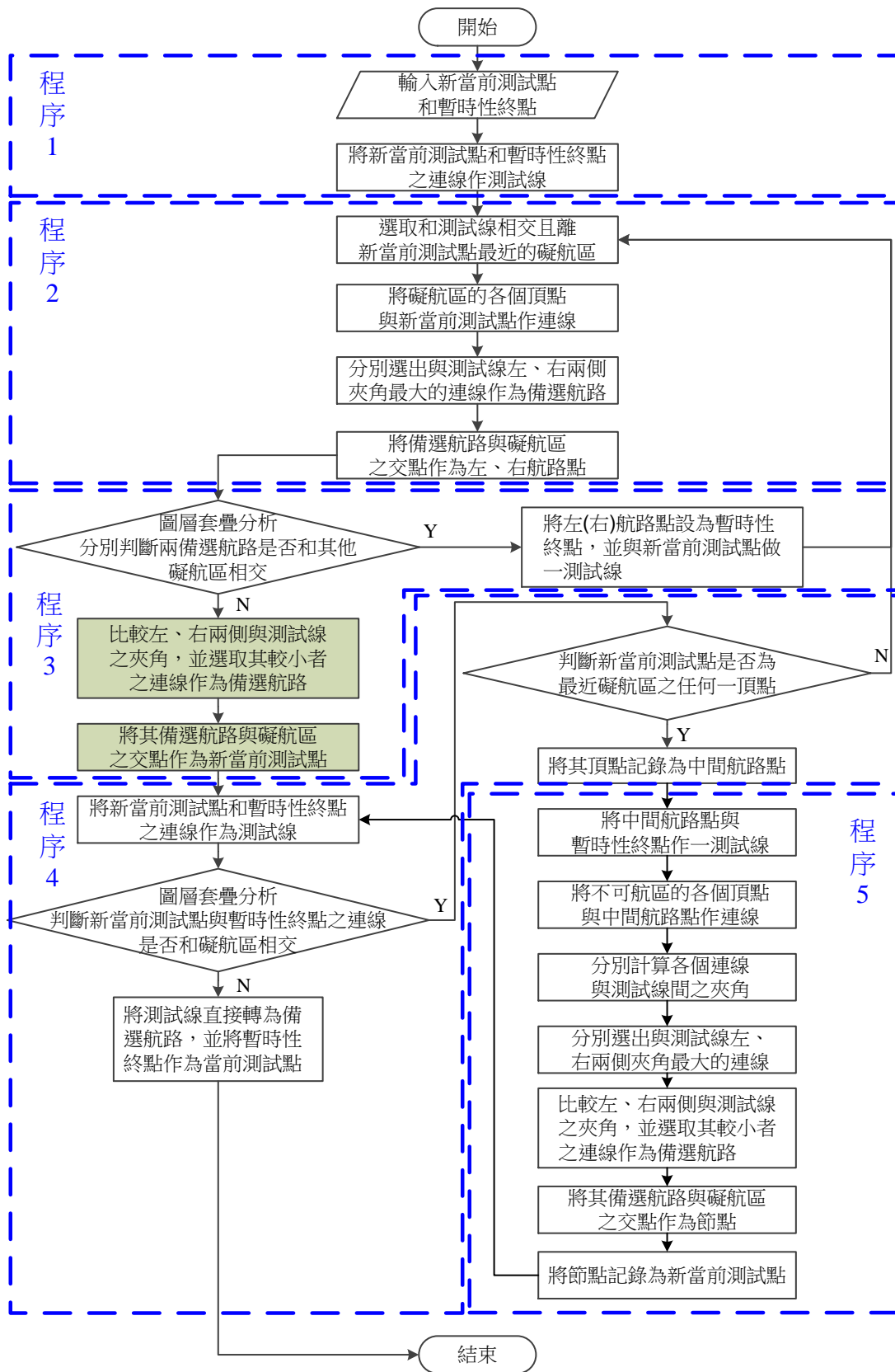


圖 3. 多障礙避障機制流程圖

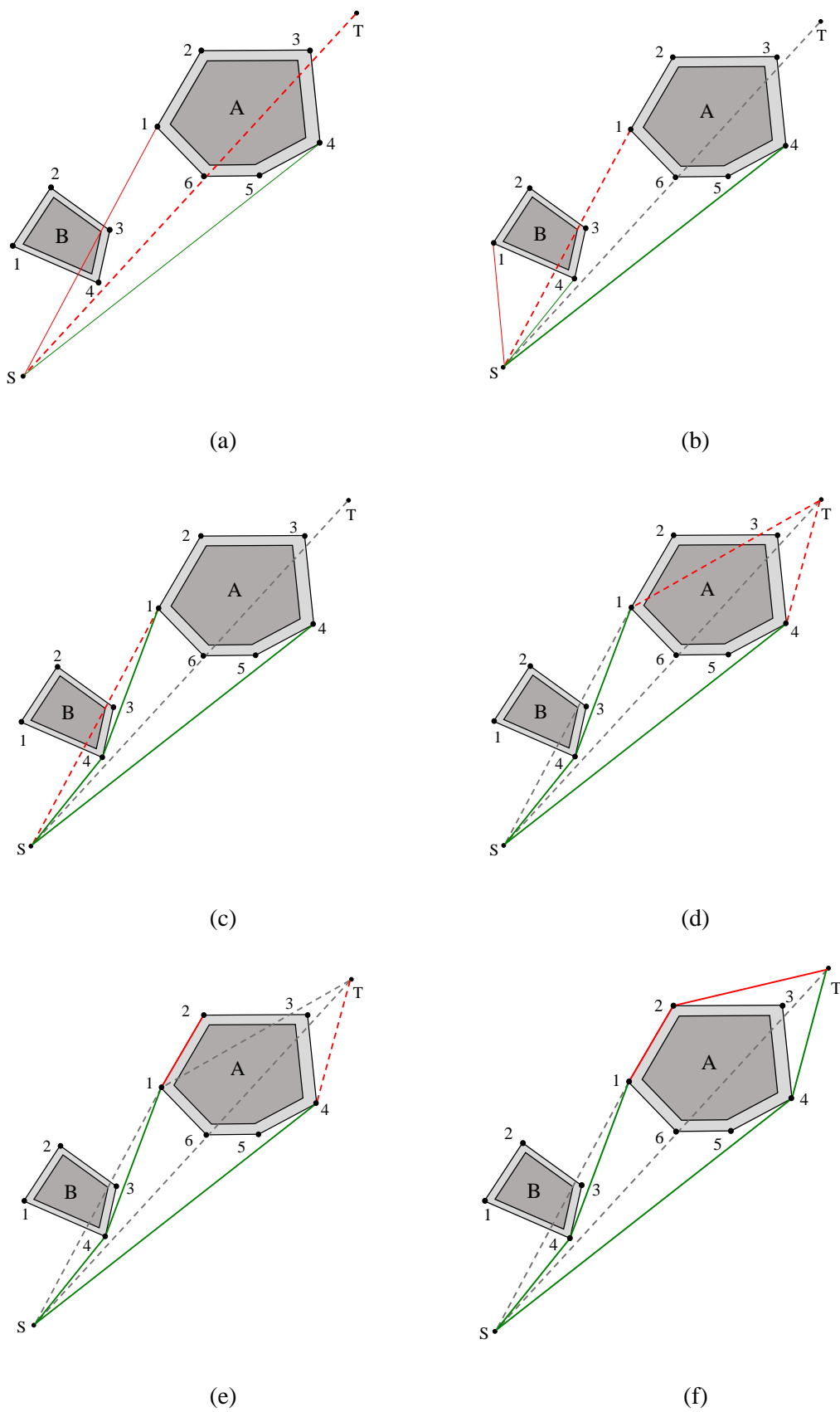


圖 4. 多障礙避障機制之各階段避障航路建構情形

程序 3：將備選航路進行圖層分析，分別判斷左（右）航路段是否與其他礙航區相交，若有礙航區與其相交，將左（右）航路點設為暫時性終點，返回**程序 2**；反之，比較左（右）航路段與測試線之夾角，依照偏航角最小原則，選取較小者，取其連線作為備選航路段，如**圖 4(b)**中之 S-B₄，接著將 B₄ 設為新當前測試點，進入**程序 4**。

程序 4：將新當前測試點 B₄ 和暫時性終點 A₁ 連線，做一測試線，對 B₄-A₁ 做圖層套疊分析，判斷是否與礙航區相交，若有礙航區與測試線相交，且交點為最近礙航區上之頂點，將其頂點記錄為中間航路點，進入**程序 5**，若非該礙航區上之頂點則返回**程序 2**。因此，**圖 4(c)**顯示，B₄-A₁ 未與礙航區相交，測試線直接轉為備選航路段，同時將暫時性終點作為當前測試點，結束多障礙避障機制，返回避障航路模式繼續進行航路規劃，將 A₁、A₄ 設為當前測試點，與終點 T 連線做一測試線（如**圖 4(d)**），右側航段 A₄-T 未與任一礙航區相交，故直接連線記錄為備選航段；而其左側航段 A₁-T 因為與礙航區相交，且 A₁ 為最近礙航區上之頂點，便啟動繞行障礙物的動作，規劃出 A₁-A₂ 之航段（如**圖 4(e)**），接著再將 A₂ 設為當前測試點，返回**程序 2**，繼續進行推算。最後如**圖 4(f)**規劃出所有備選航路。

程序 5：將中間航路點與暫時性終點連線（測試線），再與位於該礙航區邊界上的各頂點逐一加以連線，並分別計算各連線與測試線間之夾角，求出與測試線左（右）兩側夾角最大的連線後，根據偏航角最小原則，比較左、右兩側與測試線之夾角（偏航角），選取較小者之連線作為備選航段，並將該備選航段與礙航區之交點記錄為節點，即新當前測試點，返回**程序 4**。

3.3 避障航路簡化

當避障航路規劃完成前述所有程序後，由於在避障航路建構的過程中會產生許多航路點，若某條航路中的某兩個航路點或許可直線航行，其中間的航路點便為多餘航路點，多餘航路點的存在不僅增加了航線的航程，甚至影響到最後優選的結果，且可能因多餘的航路點造成大角度的轉向，所建立的航路亦可能不是最短距離之航路，導致不必要的轉向及航程距離增加，因此需要簡化路徑移除多餘的航路點。因此，本研究擬藉由路徑截彎取直的概念進行航路簡化，刪除多餘航路點，把可直線連接且不會與任一礙航區有所交集的點連接起來，以達到減少航路點與縮短航程距離之目的。

避障航路修訂簡化程序說明：首先，排除最末個航路點與終點的航段外，先將終點與倒數第二個航路點至起點逐一連線，再利用圖層套疊分析判斷這些連線是否與礙航區有交集，若皆與礙航區相交，則往前採下一個航路點重覆連線進行測試；反之，若其中

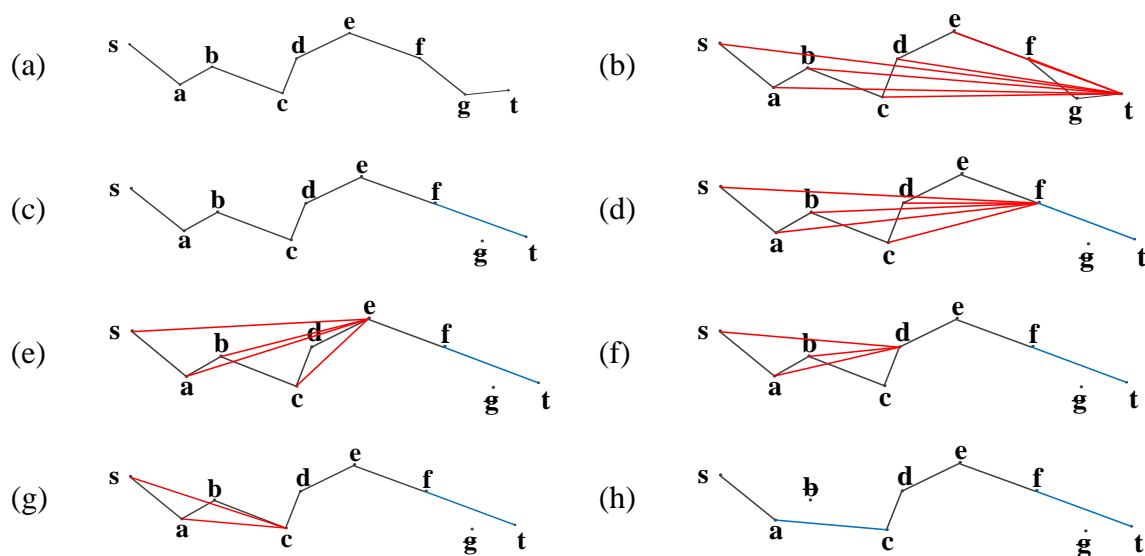


圖 5. 避障航路簡化示意圖

只有一條未經過礙航區，則將此航段保留，如有兩條或兩條以上，則比較其距離後，選取距離較長的保留，並繼續往前根據下一個航路點進行測試。

以圖 5(a)之避障航路為例，先將終點分別與倒數第二個航路點至起點依序連線（圖 5(b)），圖層套疊分析後，只有一航段 f-t 未與礙航區有交集，故將航段 f-t 保留，刪除航路點 g（圖 5(c)）。接著，將航路點 f 與 d、c、b、a、s 逐一連線（圖 5(d)），皆與礙航區相交，則往前一個航路點 e 與 c、b、a、s 各航路點連線，亦與礙航區皆有交集（圖 5(e)），再繼續往前一航路點 d 與 b、a、s 依序連線，分析後皆與礙航區相交（圖 5(f)），則再往前將航路點 c 與 a、s 連線進行圖層套疊分析，其中航段 a-c 並未與礙航區有所交集（圖 5(g)），刪除多餘航路點 b 而保留航段 a-c。持續執行上述步驟至最終，即可將原規劃避障航路上之多餘航路點 b、g 刪除（圖 5(h)），避免因這兩點造成無謂且大角度的轉向，同時有效縮短航程距離，並確實達到各航路點間航段距離最大之目的。

肆、情境測試及實例分析與討論

在航路規劃問題中，障礙物的複雜度影響航線的制定，以航行於最短航路為原則，同時需避免因人為疏失而導致錯誤判斷與決定，因此，航行前的航路規劃往往是影響航行安全的關鍵。此外，船舶避障模式的建構目的是期望能將成果應用於實際規劃航路中，且整合至 GIS 操作中以驗證本研究在實際航路規劃中可能帶來的成效，並檢視其適用性。故以下根據本研究所發展之船舶避障模式進行情境測試來檢核，並將其與 GIS 整合開發而應用在實例上進行分析及討論。

4.1 情境測試

目的：增加幾何圖形的複雜度組合變化，礙航區分布情形如圖 6(a)，試利用自動航路規劃系統規劃出建議避障航路，並在 GIS 操作中求得完整航路資訊，包括各航路點經緯度、各航段之距離以及轉向角。

步驟 1：將起始點 TestP 設為當前測試點，與目的點 PEnd 做一測試線，利用圖層套疊分析判斷是否與礙航區相交，測試線 TestP-PEnd 與三個不可航區相交，將此三礙航區歸納為原路徑上遇到之礙航區，其餘皆為其他礙航區。同時判斷當前測試點是否為最近不可航區上之任一頂點，如為最近礙航區之任一頂點，便執行**步驟 4**；TestP 不在任一頂點上，進入**步驟 2**。

步驟 2：選取離當前測試點最近之礙航區，將其各個頂點與當前測試點連線，選取左(右)兩條與測試線夾角最大的連線作為備選航路段(圖 6(b))，利用圖層套疊分析，判斷兩備選航路段是否與其他礙航區相交，若沒有可直接連線；若與其他礙航區相交，則將其交點作為暫時性終點，進入多障礙避障機制。圖 6(c)之 A₂-B₁ 航段進入多障礙避障模式，A₂-B₄ 航段則是進入繞行礙航區的動作。

步驟 3：圖 6(d)進入多障礙機制，利用偏航角最小原理為基準，求出與測試線左(右)兩側夾角最大的連線後，根據偏航角最小原則，比較左、右兩側與測試線之夾角(偏航角)，取其較小者一側作為備選航段(如圖 6(e)之 A₂-D₂)，且將該點記錄為新當前測試點(D₂)，接著與暫時性終點(B₁)作測試，若測試未經其他礙航區，即結束多障礙避障機制(如圖 6(e))，返回**步驟 1**；否則繼續重複**步驟 3**。

步驟 4：如圖 6(f)所示，若當前測試點位於最近礙航區之任一頂點上，則將其記錄為中間航路點，將中間航路點與目的點作一測試線，接著，分別計算各個連線與測試線間之夾角，分別記錄左、右兩側夾角最大的連線作為備選航段，例如圖 6(f)中的 B₂-C₃、B₂-C₆，且將備選航段與礙航區之交點作為節點(如圖 6(f)中之 C₂、C₃、C₄、C₆)，再將節點記錄為當前測試點回到**步驟 1**。

依序執行上述步驟，直到當前測試點能與目的點直接連線，便完成避障航路規劃(如圖 6(h))，以下整理各備選航段，並由 GIS 求得各航段的航路資訊(如圖 8)，最後統整各航路之總行程進行比較(如圖 7)，航海者可依目前需求選擇航路，若是以總航程最短為基準，則選擇航程為 214.4 浬的備選航路 8 (TestP-A₁-A₂-D₂-B₁-B₂-C₃-PEnd)為最佳航路。

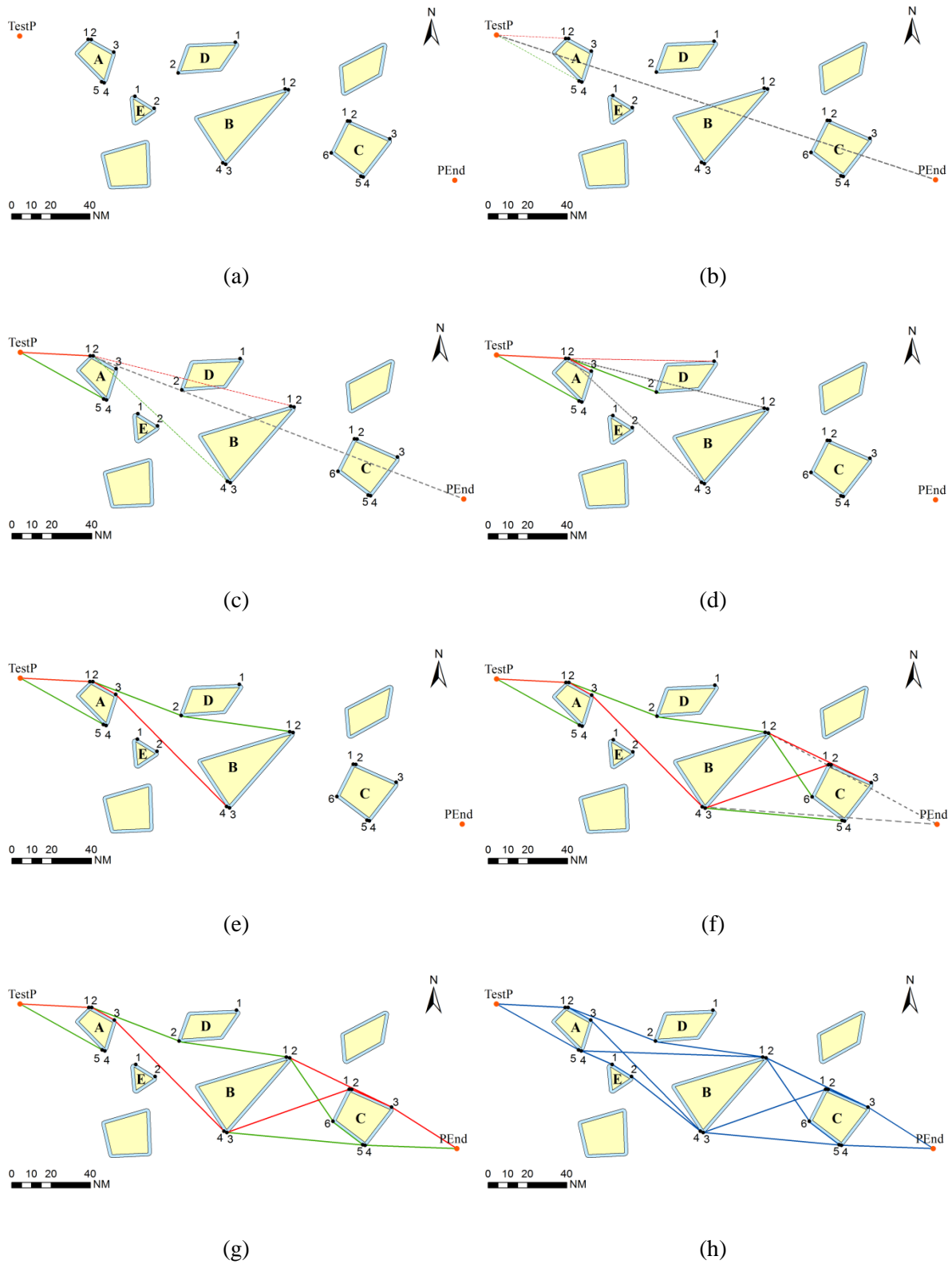


圖 6. 情境測試之各階段避障航路建構情形

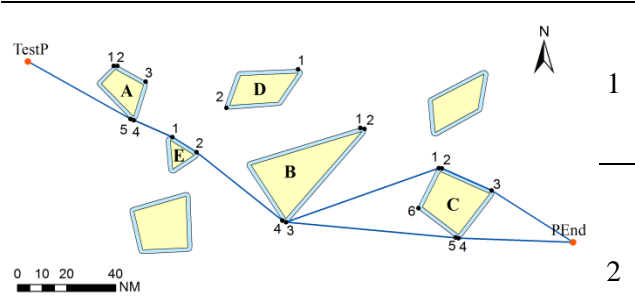
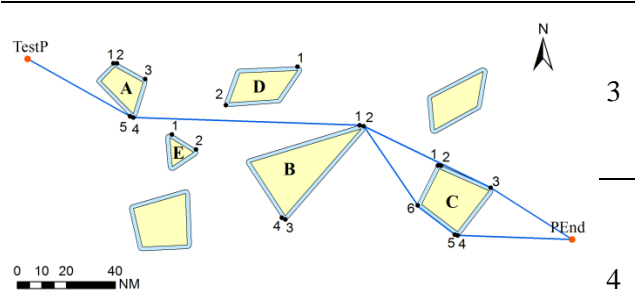
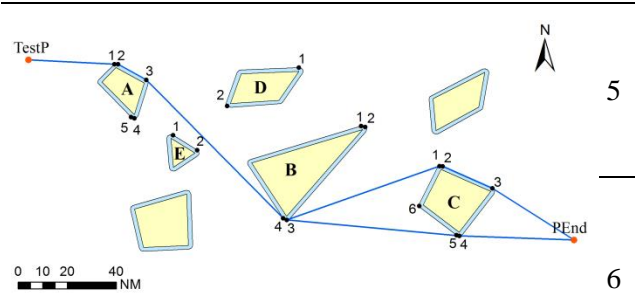
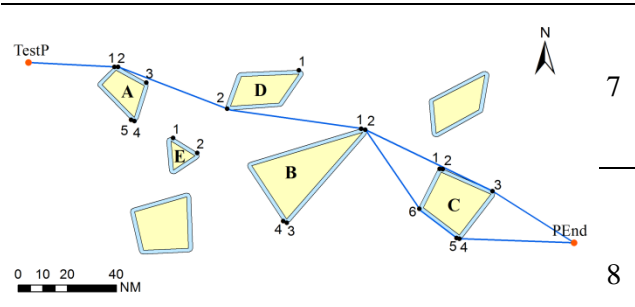
避障航路建構結果	備選航路	總航程 [排序]
 <p>(a)</p>	<p>1 TestP-A₅-A₄-E₁-E₂-B₄-B₃-C₅-PEnd</p>	<p>217.7 NM [3]</p>
	<p>2 TestP-A₅-A₄-E₁-E₂-B₄-B₃-C₁-C₂-C₃-PEnd</p>	<p>230.9 NM [7]</p>
 <p>(b)</p>	<p>3 TestP-A₅-A₄-B₁-B₂-C₆-C₅-C₄-PEnd</p>	<p>225.0 NM [6]</p>
	<p>4 TestP-A₅-A₄-B₁-B₂-C₃-PEnd</p>	<p>215.8 NM [2]</p>
 <p>(c)</p>	<p>5 TestP-A₁-A₂-A₃-B₄-B₃-C₅-C₄-PEnd</p>	<p>224.8 NM [5]</p>
	<p>6 TestP-A₁-A₂-A₃-B₄-B₃-C₁-C₂-C₃-PEnd</p>	<p>238.0 NM [8]</p>
 <p>(d)</p>	<p>7 TestP-A₁-A₂-D₂-B₁-B₂-C₆-C₅-C₄-PEnd</p>	<p>223.6 NM [4]</p>
	<p>8 TestP-A₁-A₂-D₂-B₁-B₂-C₃-PEnd</p>	<p>214.4 NM [1]</p>

圖 7. 情境測試之避障航路建構結果

Name	Line	Lat_d''	Lat_m'	N_S	Long_d''	Long_m'	E_W	C	Cn	Dist_NM
From	1	28	54	N	18	30	W	S57.7° E	122.3"	0
WayP1	1	28	30.7	N	17	48.3	W	S69.4° E	110.6"	43.5
WayP2	1	28	30.2	N	17	46.9	W	S63.6° E	116.4"	1.4
WayP3	1	28	23.3	N	17	31.2	W	S54.9° E	125.1"	15.6
WayP4	1	28	17.3	N	17	21.4	W	S48.3° E	131.7"	10.5
WayP5	1	27	49	N	16	45.7	W	S76.8° E	103.2"	42.5
WayP6	1	27	48.8	N	16	44.9	W	S84.1° E	095.9"	0.7
WayP7	1	27	42.4	N	15	34.7	W	S87.7° E	092.3"	62.6
Target	1	27	40.7	N	14	48	W			40.9
From	2	28	54	N	18	30	W	S57.7° E	122.3"	0
WayP1	2	28	30.7	N	17	48.3	W	S69.4° E	110.6"	43.5
WayP2	2	28	30.2	N	17	46.9	W	S63.6° E	116.4"	1.4
WayP3	2	28	23.3	N	17	31.2	W	S54.9° E	125.1"	15.6
WayP4	2	28	17.3	N	17	21.4	W	S48.3° E	131.7"	10.5
WayP5	2	27	49	N	16	45.7	W	S76.8° E	103.2"	42.5
WayP6	2	27	48.8	N	16	44.9	W	N68.3° E	068.3"	0.7
WayP7	2	28	10.8	N	15	42.7	W	S85.3° E	094.7"	59.5
WayP8	2	28	10.7	N	15	41.4	W	S63.5° E	116.5"	0.8

圖 8. 情境測試之完整避障航路資訊

4.2 實例分析與討論

船舶避障模式建構目的為應用於實際規劃航路中，因此將礙航區分析、避障模式及航路簡化機制透過 Visual C Sharp (VC#) 結合 ArcGIS 提供之 Add-in 套件與 Model Builder 整合至 GIS 介面上，以建構出符合航海習慣之船舶避障航路規劃模式。為檢視其適用性，而使用此模組進行由 Taki 前往 Honiara 之避障航路規劃（如圖 9），並對執行結果進行分析與討論。

步驟 1： 首先輸入起始點與目的點，起始點即為當前測試點，作一條當前測試點與目的點的測試線（如圖 10 所示）。如果僅需考慮航行需求，在海圖上從 Taki (TestP) 到 Honiara (PEnd) 的直線就是最短航路。

步驟 2： 判斷測試線是否和礙航區相交。若該測試線不與任何礙航區相交，則可直線連接，並完成航路規劃；否則接續至**步驟 3**。

步驟 3： 判斷當前測試點是否為最近礙航區上之任一頂點，若此測試點位於最近礙航區之任一頂點上，則跳至**步驟 6** 沿礙航區繞行。此測試點不在最近礙航區上，則選一個相交於測試線上且離起始點 Taki (TestP) 最近的礙航區，在此礙航區上，作各點與 Taki 的連線，得到左右兩條與測試線夾角最大的連線，即為備選航路

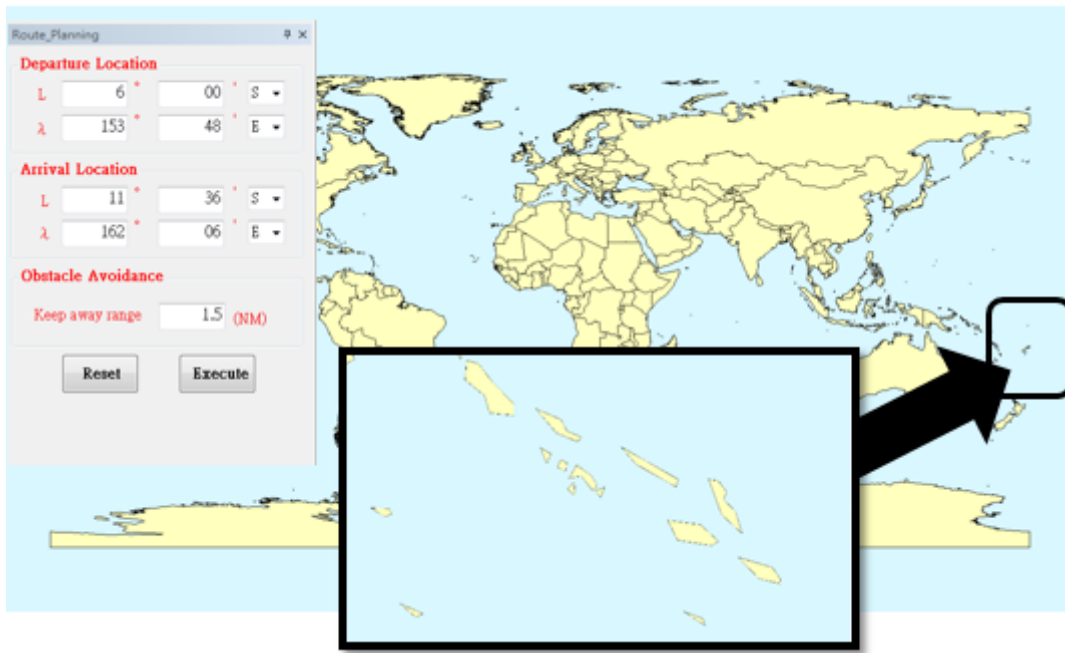


圖 9. 實例分析之地理區域位置

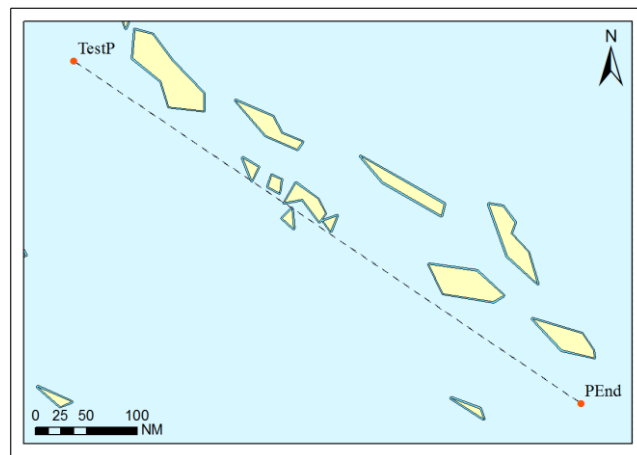


圖 10. 起始點與目的點相連之測試線

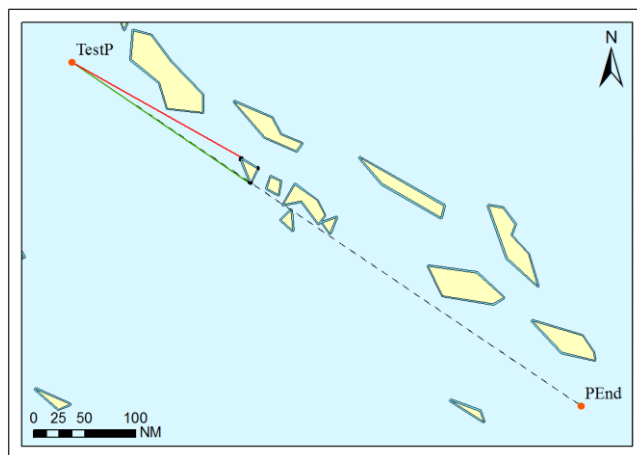


圖 11. 分析所得之備選避障航路

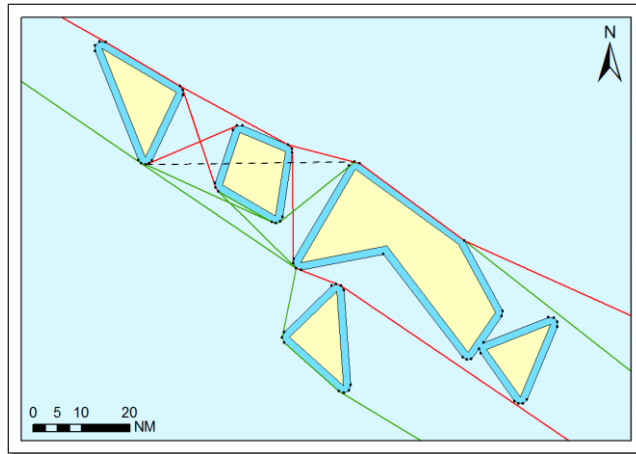


圖 12. 實例中進入多障礙避障機制階段之規劃分析情形

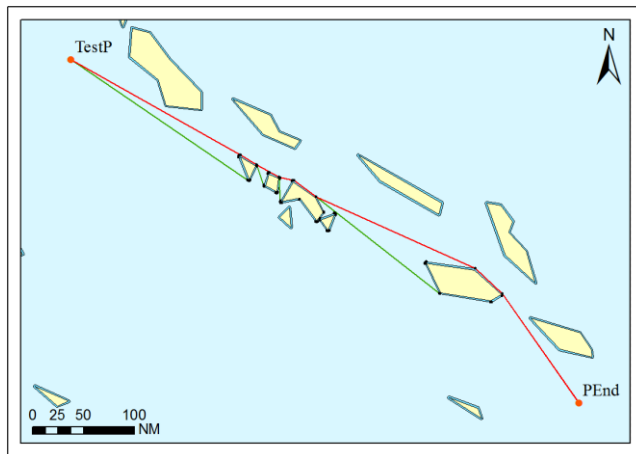


圖 13. 實例中沿礙航區繞行之避障航路規劃結果

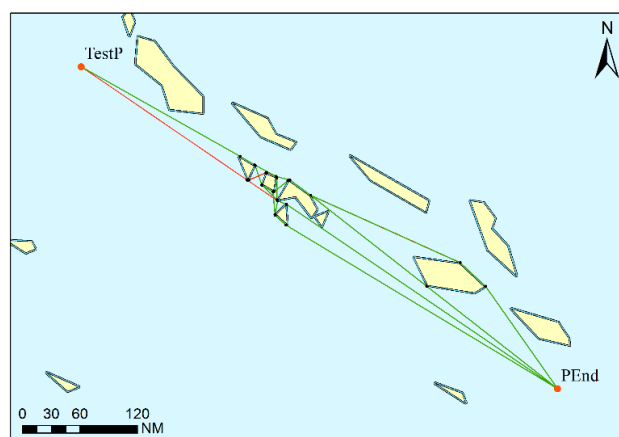


圖 14. 實例分析所得之初始避障航路規劃結果

(如圖 11)。分別判斷兩備選航路是否與其他礙航區相交，兩備選航路皆不與任何礙航區相交，則將其交點設為當前測試點，回到**步驟 1**；否則進入**步驟 4**。

步驟 4：如圖 12 所示，左備選航路與礙航區相交，則將其交點作為暫時性終點，啟動多障礙避障機制，進入**步驟 5**；右備選航路不與任何礙航區相交，則將其交點設為當前測試點，回到**步驟 1**。

步驟 5：將新當前測試點與暫時性終點作一測試線，選出與測試線左、右兩側夾角最大的連線，比較並選取夾角較小者之連線作為備選航路，將其備選航路與礙航區之交點作為新當前測試點，繼續與暫時性終點作測試，直至可與暫時性終點直線連接，且將暫時性終點作為當前測試點，即結束多障礙避障機制。

步驟 6：沿礙航區繞行時，將其頂點記錄為中間航路點，將中間航路點與目的點作一測試線，與自身礙航區的各個頂點做連線，找到左、右兩邊與測試線夾角最大的連線，判斷兩夾角之大小，取其中較小者之連線作為備選航路，並將其備選航路與礙航區之交點作為節點，且記錄為當前測試點，回到**步驟 1**（如圖 13 所示）。

綜整上述步驟，於建立航路時，將航路點一分為二，產生兩條備選航路，並在繞行不可航區時，根據偏航角最小方法，分別計算並選取左、右兩側與測試線夾角最大的連線，比較兩者大小後，取其較小者之連線作為備選航路，使接下來的航路唯一，反覆進行測試，直至與目的點可直接連線，便可完成初步船舶避障航路規劃。重複上述步驟逐一進行圖層套疊分析、計算，即可規劃出 14 條路徑不一之初始避障航路（如圖 14 所示）。

步驟 7：最後進行避障航路簡化，以截彎取直的原則，若任兩個航路點之連線不會經過礙航區，則可直接連線，記錄為備選航段，同時除去多餘航路點。航路的簡化除了避免多餘轉向點造成繞路的情形，在航路規劃上也更符合航海者需求，圖 15 為 Taki 到 Honiara 經簡化後的 4 條避障航路，同時簡化後的航路點座標、航向、距離等資料也顯示在屬性表格內（如圖 16），航海者可依照需求選擇適當的航線，若是航程距離最短的航線可選擇 Line2，總航程距離為 598.7 浬；而轉向點最少的航線則為 Line1，總共只有一個轉向點，總航程距離為 599.2 浬。

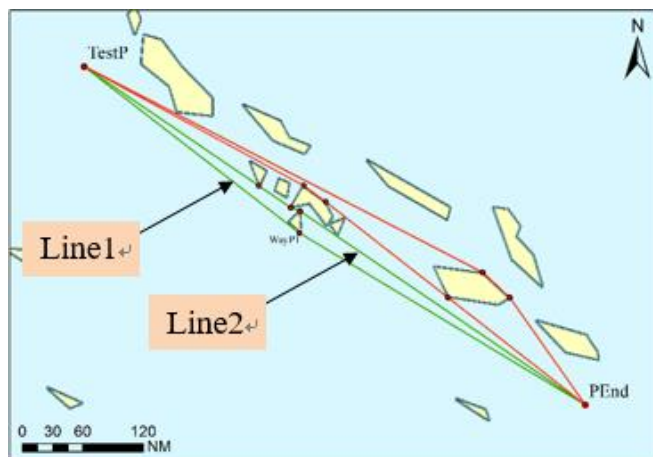


圖 15. 完成簡化後所得之避障航路規劃結果

Name	Line	POINT_X	POINT_Y	Lat_d'	Lat_m'	N S	Long_d'	Long_m'	E	C	Cn	Dist_NM	Total Dist
From	1	153.8	-6	6	0	S	153	48	E	852.3°E	412.3'	0	0
WayP1	1	157.367567	-8.753165	8	45.2	S	157	22.1	E	858.71°	418.7'	270.1	270.1
Target	1	162.1	-11.6	11	36	S	162	6	E			329.1	599.2
From	2	153.8	-6	6	0	S	153	48	E	855.7°E	415.7'	0	0
WayP1	2	156.689489	-7.972035	7	58.3	S	156	41.4	E	855.8°E	415.8'	209.8	209.8
WayP2	2	157.220991	-8.332159	8	19.9	S	157	13.3	E	869°E	429°	38.4	248.2
WayP3	2	157.376116	-8.391581	8	23.5	S	157	22.6	E	855.6°E	415.6'	9.9	258.1
Target	2	162.1	-11.6	11	36	S	162	6	E			340.5	598.7
From	3	153.8	-6	6	0	S	153	48	E	861.5°E	421.5'	0	0
WayP1	3	157.439693	-7.971772	7	58.3	S	157	26.4	E	853.6°E	413.6'	248.2	248.2
WayP2	3	157.800073	-8.236656	8	14.2	S	157	48	E	851.7°E	411.7'	26.8	275
WayP3	3	159.820721	-9.820361	9	49.2	S	159	49.2	E	851.7°E	411.7'	153.5	428.5
Target	3	162.1	-11.6	11	36	S	162	6	E			172.3	600.8
From	4	153.8	-6	6	0	S	153	48	E	862.6°E	422.6'	0	0
WayP1	4	160.399982	-9.405466	9	24.3	S	160	24	E	846.8°E	406.8'	444.7	444.7
WayP2	4	160.843221	-9.818823	9	49.1	S	160	50.6	E	834.9°E	394.9'	36.2	480.9
Target	4	162.1	-11.6	11	36	S	162	6	E			130.3	611.2

圖 16. 簡化後所得之完整避障航路資訊

伍、結論與建議

本研究為建構之避障航路規劃模式使其達成自動化之目標，透過不斷反覆測試判斷是否經過礙航區，並以測試線作為規劃依據，若遭遇非原礙航區，則利用偏航角最小原則之多障礙避障模式規劃出備選航路，再將規劃後之避障航路進行簡化，經由不同情境分析可知校調後之避障航路能在轉向點個數上更為精簡，且可避免因轉向點減少而增加航行距離之問題，足以驗證本研究之船舶幾何避障模式在實際應用上的可行性。綜整本研究之模式開發、系統整合與模擬分析成果，概可歸納出以下之結論與建議：

1. 本研究將船舶避障模式、多障礙避障機制以及避障航路簡化等，與地理資訊系統在空間資料管理、圖層套疊分析及幾何運算上優異的能力透過 VC#加以整合後，經由各種不同的情境模擬與驗證分析，最後透過實際案例進行探討，確實可對單一或多障礙等礙航區有效地規劃，提供符合實際航行所需之建議規劃航路。
2. 本研究以偏航角度最小的避障方法達到繞行礙航區所需之船舶避障目的。多障礙避障機制中，在建立左右兩側備選航段時，計算兩側備選航段與測試線之夾角（偏航角），選取角度較小的一側留下，再由此留下之備選航段與礙航區的交點繼續進行測試，如此一來，可使備選航路趨近於直線且其距離較短。
3. 航路規劃主要利用截彎取直的概念消弭多餘的航路點以縮短航行距離，由於本研究所發展之偏航角最小避障模式，透過實例分析結果可明顯看出修訂簡化後確實可減少多餘航路點，但在航程距離上的縮減程度有限，相對表示本研究所發展之船舶避障模式已有良好的成效。
4. 本研究主要以建構船舶避障航路模式為目的，實際上船舶航行所參考之依據不僅是轉向點的資料，亦須將影響航行之氣候、水文等外在環境因素納入考量，以更符合實際船舶航行之情況，建議後續可將風、流、潮汐、氣象等影響因素加以考慮，使避障航路規劃模式更符合航行實務所需。
5. 若航線遭遇如歐、亞、非等大疆域時，受該陸塊（礙航區）所涵蓋之大範圍或超出分析區域限制，將可能使分析模式無法有效完成所有避障航路規劃，建議可針對此一限制情形運用空間分析技術進一步加以考量修訂。

參考文獻

- 陳志平，2006，**韋伯區位問題與其最佳路徑規劃於網格圖上之研究**，國立台灣海洋大學商船學系碩士論文。
- 陳傳波，唐浩，2003，「**向量圖中繞過障礙物的最短路徑算法研究**」，**自動化技術與應用**，22(1)：34-36。
- 張立華、朱慶、劉雁春、李樹軍，2007，「**電子海圖平台下的航線自動設計方法**」，**武漢大學學報**，33(3)：109-112。
- 曹鴻博、張立華、賈帥東、張莉，2011，「**電子海圖最短距離航線自動生成的改進方法**」，**武漢大學學報：信息科學版**，36(9)：1107-1110。
- 湯清慧，2011，**基於電子海圖的航線規劃方法研究**，中國海洋大學地圖學與地理信息系統學系博士論文。

- 楊智翔，2010，**導航機器人之研製**，國立中央大學資訊工程研究所碩士論文。
- 薛朝光、袁自揚、高聖龍，2015，「MGIS 平台下船舶近岸航行之避障航路規劃模式建構與開發」，**第五屆海峽兩岸海洋工程和航海技術研討會(OEMT)**，頁 39-44。
- 陳智鵬、楊詩琴，2010，「帶障礙物情況下兩點間最短距離的求解方法」，**計算機工程**，36(16)：171-173。
- 邱柏翰、高聖龍、蘇健民，2009，「海洋地理資訊系統於電子海圖之研究」，**地理資訊系統季刊**，3(1)：16-20。
- 葉清、鬱振偉，2003，「改進最短路徑算法在最佳航線選擇中的應用」，**中國航海**，55(2)：15-17。
- 賴新元，2004，**海洋地理資訊系統在 BTS 之應用**，國立臺灣海洋大學導航與通訊系碩士論文。
- 張德龍，2003，**海洋地理資訊系統應用於油污染應急管理之研究—以北台灣海域為例**，國立台灣海洋大學商船學系碩士論文。
- 邱柏翰、高聖龍、蘇健民，2009，「海洋地理資訊系統於電子海圖之研究」，**地理資訊系統季刊**，3(1)：16-20。
- 蘇健民、施建龍、詹景裕，2009，「具海象資料之電子海圖上航路規劃」，**航運季刊**，18(3)：1-15。
- 蘇健民，高聖龍，張啟隱，鄭智湧，2010，「海洋地理資訊系統應用於船舶復航決策」，**航運季刊**，19(2)：23-38。
- Beattie, J. H., 1995, "The Future of Electronic Charts in Merchant Ships," *The Journal of Navigation*, 48(3): 335-348.
- Chang, K. Y., Jan, G. E., and Parberry, I., 2003, "A Method for Searching Optimal Routes with Collision Avoidance on Raster Charts," *The Journal of Navigation*, 56(3): 371-384.
- Cheng, X. D., Liu, Z. Y. and Zhang, X. T., 2006, "Trajectory Optimization for Ship Collision Avoidance System Using Genetic Algorithm," *IEEE OCEANS 2006 ASIA PACIFIC*, pp. 1-6.
- Douglas, D. and Peucker, T., 1973, "Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature," *The Canadian Cartographer*, 10(2): 112-122.
- Fawcett, J. and Robinson, P., 2000, "Adaptive Routing for Road Traffic," *IEEE Computer Graph*, 20(3): 46-53.
- Gewali, S. N. and Tollis, Ioannis G., 1990, "Path Planning in the Presence of Vertical Obstacles," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 6(3): 331-341.
- Szlapczynski R, 2006, "A New Method of Ship Routing on Raster Grids with Turn Penalties and Collision Avoidance," *The Journal of Navigation*, 59(1): 27-42.
- Tsou, M. C., 2010, "Integration of a Geographic Information System and Evolutionary Computation for Automatic Routing in Coastal Navigation," *Journal of Navigation*, 63(2): 323-441.

Zhang, L. H., Zhu, Q., Liu, Y. C. and Li, S. J., 2007“A method for automatic routing based on ECDIS,” *Journal of Dalian Maritime University*, 33(3): 109-112.