

## 具海象資料之電子海圖上航路規劃 Efficient Route Planning for ECDIS with Current

蘇健民<sup>1</sup> Chien-Min Su

施建龍<sup>2</sup> Jian-Long Shih

詹景裕<sup>3</sup> Gene Eu Jan

### 摘要

為有效維持船舶航路規劃，本文提出一套新的演算法，針對網格化後的電子海圖，船舶由出發港至目的港航路，當遭受海象因素影響下，船舶應如何克服海象影響仍能維持最佳航路規劃。因此，本文藉向量解析概念，導入船艏向來修正航路，俾能維持在原先所規劃路徑。規劃船舶最佳航路時，於每一時間點探討取決船舶應該前進的下一個最佳位置，並以高維迷宮式搜尋演算法為核心演算法。最後，將提出一套創新的具水流之網格圖最佳航路演算法來完成船舶航路規劃，其時間複雜度為  $O(qN)$ ，空間複雜度為  $O(N)$ 。其中  $q$  為高維迷宮式搜尋演算法執行的次數， $N$  代表網格圖中所有網格的數目，且  $q < N$ 。

**關鍵字：**水流、電子海圖、環境、航路規劃

### ABSTRACT

Environment is an important factor for route planning problem at sea. The course of the ship will be changed by environment current. To overcome the problem, this study presented an efficient method to search optimal route from source to destination for ECDIS with current on raster. The algorithm is proposed by using the concepts of heading and vector to correct course for ship navigation. The algorithm will decide the optimal route based on *Higher Geometry Maze Router*. The time and space complexities of the algorithm are  $O(qN)$  and  $O(N)$ , respectively, where  $N$  is the number of cells on raster and  $q$  is the number of *Higher Geometry Maze Router* function called and  $q < N$ .

**Keywords :** Current, ECDIS, Environment, Route Planning

---

<sup>1</sup> 國立臺灣海洋大學電機工程學系博士班 研究生

<sup>2</sup> 國立臺灣海洋大學資訊工程學系碩士班 研究生

<sup>3</sup> 國立台北大學電機工程研究所 教授

## 壹、緒論

路徑規劃問題(Path Planning Problem)一直是科學熱門的研究方向,所謂路徑規劃,即是在區域中為移動物體完成某一給定任務且提供一條安全且高效率的移動路徑。有關航海領域的路徑規劃係指船舶於海上航行時,如何考慮現況並做好航路規劃(Route Planning),這也是航海人員基於安全及合乎經濟效益下,一致追求的目標。航路規劃為航程開始前之要務,即自啓航點(Departure Point)至到達點(Destination Point)間,各轉向點位置的決定。航程中之相關資訊,如燈塔、潮汐、洋流、港口、海圖與其修正、航海用表曆、航行警告等,事先即必須準備妥當。進而透過此等資訊,規劃航程,包括航程總距離、轉向點,以及因應天候狀況、航行警告等。通常船舶航行若不受任何外力或環境因素影響,行駛大圈航路將可獲得最短航程。但實際上,海上航行所遭遇環境絕非如此單純,由於船舶航行於海上,除陸岸、礁嶼和危險區外,船舶原先所規劃之航路,常會受到自然環境因素的影響(包含風速、海浪、水流、磁力、3D空間中的重力、太陽風等),導致改變其行進路線,故如何規劃最佳路徑,使船舶遭受自然環境因素影響下,仍能維持最佳航路規劃,便成爲一個重要的研究議題。最佳路徑規劃的應用研究領域非常廣, Mikami 與 Tabuchi (1968)<sup>[1]</sup>及 Lin 等人(1990)<sup>[2]</sup>就曾提出應用於印刷電路板(Printed Circuit Board, PCB)與超大型積體電路(Very Large Scale Integration, VLSI)的佈線問題。Beattie (1995)<sup>[3]</sup>曾利用電子海圖(ENC)及地理資訊系統(GIS)技術來發展船舶自動導航系統。Jan 等人(1997)<sup>[4]</sup>曾探討電子海圖顯示資訊系統(Electronic Chart Display Information System, ECDIS)的最短路徑搜尋問題。Chang 等人(2003)<sup>[5]</sup>及 Szlapczynski (2006)<sup>[6]</sup>均於網格圖中探討最佳路徑規劃問題,針對船舶避開障礙物或避免相互碰撞提出演算法尋求解決之道。Gewali 與 Tollis (1990)<sup>[7]</sup>提出3D空間中含多邊形障礙物時,機器人之路徑搜尋問題。Takahashi 與 Schilling (1989)<sup>[8]</sup>利用 Heuristic Techniques 於工作空間中找尋一條與多邊形障礙物無發生碰撞的最佳路徑。詹景裕等人(2002)<sup>[9-10]</sup>針對任意形狀機器人,藉由單圓、多圓模組化機器人並於網格圖中利用平移、旋轉技巧完成最短路徑規劃。Fawcett 與 Robinson (2000)<sup>[11]</sup>曾針對道路地圖的繞行問題提出解決方法。有關動態環境的路徑搜尋問題則有 Aggarwal 與 Fujimura (1994)<sup>[12]</sup>、Fujimura (1993)<sup>[13]</sup>及 Castro 等人(2002)<sup>[14]</sup>提出不同的方法去深入探討及解決。F Xavier Martínez de Osés 及 Castells (2008)<sup>[15]</sup>曾指出,依據歐洲聯盟運輸白皮書期中評論,2000至2020年近洋航運業務預估可大幅成長59%,但文中分析惡劣天候或海況將會影響到選擇的航線,故建議利用高速船舶可有效降低惡劣天候或海況的影響。由此可見,天候條件確實會影響到船舶航行及營運。而本文旨在探討網格化(Rasterization)後的電子海圖,船舶由出發港(起始點)至目的港(終點)的航路規劃過程,當遭受海象因素影響下,船舶應如何克服海象影響仍能維持最佳航路規劃。由於海象環境因素複雜多變,為便於探討,本文僅考慮水流對船舶所造成的偏航效應,應用向量解析的概念,導入船舶向(Heading)去修正

偏差航向(Course)，俾能維持在原先所規劃路徑，進而解決船舶最佳航路規劃問題。

有關處理地圖資訊的形式，施保旭(1995)<sup>[16]</sup>及 Eastman (1990)<sup>[17]</sup>的論著中均曾提及，主要可分為兩大類，一為向量圖形(Vector Graphics)的資料結構，另一則為網格式圖形(Raster Graphics)或稱其為蜂巢組織狀(Cellular Organization)的資料結構。由於使用的資料結構不同，相對用來找尋最短路徑的演算法也會不相同。若使用向量式資料結構的路徑規劃，對於物體間相互碰撞的關係並不容易判斷、會花費相當大的計算量且只可處理有稜有角的凸邊形，若為凹邊形則需將其分割為多個凸邊形，始可計算，最後所求出之路徑也未必為最佳路徑。因此，本文使用網格式資料結構去建構模擬環境，因其易於實現計算機的建模、儲存、處理、更新與分析，而其應用亦較為廣泛，如 Chow 與 Rad (2002)<sup>[18]</sup>及 Moravec 與 Elfes (1985)<sup>[19]</sup>均曾於其發表之論文中採用。

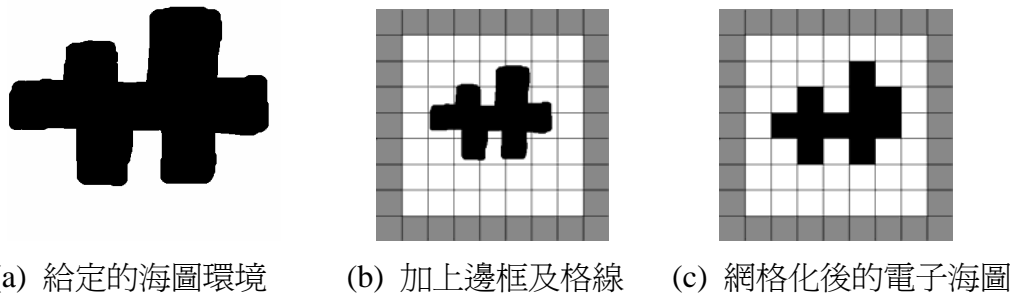
傳統的迷宮式搜尋演算法(Maze Router)係採用網格式資料結構的路徑規劃，早期均以 Lee 演算法為主，Lee (1961)<sup>[20]</sup>曾提出二維平面四角網格式上的最短路徑搜尋演算法，但缺點在於只能做四向連接相鄰網格式之路徑搜尋。為解決上述問題，Jan 等人(2003)<sup>[21]</sup>提出一個考慮八向連接相鄰網格式之最短路徑演算法，此演算法改善 Lee 演算法只考量四個方向路徑搜尋的缺點，將網格式的八向連接相鄰網格式納入考慮，以汎洪的方式計算出每組自由空間網格式的近似距離。Jan 等人(2005)<sup>[22]</sup>將原本的平面八向拓展到平面十六向，甚至更高，提出高維迷宮式搜尋演算法(Higher Geometry Maze Router, HGMR)的理論，順利解決在平面空間的最短路徑規劃問題且時間複雜度可有效改善為  $O(N)$ ，其中  $N$  代表網格式中所有網格式的數目。相較於傳統的迷宮式搜尋演算法，HGMR 可擴增連結網格式並增加路徑規劃之精確度與美觀性。另外，透過 HGMR 執行網格式之路徑規劃，不再只針對網格式中含特定形狀的障礙物，更可擴展至任意形狀的障礙物，完成最短避碰路徑規劃，且路徑尋找時的計算量也沒有向量式資料結構所需龐大。因此，本文係以 HGMR 為核心演算法，針對任意電子海圖，將給定的海圖環境先掃描進行網格式處理並建構成網格式圖(Raster)，為方便計算及顯示於網格式圖，將船舶本體視為單一網格式(Cell)並以 *Single-Cell Ship* 表示，*heading* 代表船艙所朝的方向，另外，海象環境水流的參數值為  $v_E(t, dir)$  代表每個時間點受水流影響所產生之距離值，其中變數值 *dir* 表示移動的方向。由於整個航路規劃過程屬動態即時規劃，於是加入時間觀念，於網格式圖中，針對每一時間點探討取決 *Single-Cell Ship* 應該前進的下一個最佳位置，直到 *Single-Cell Ship* 順利走到終點為止。

有關本文之其餘部分編排架構如下：第二章節將針對所提出演算法之內部資料結構一一做說明，並介紹本文所需之基礎理論。第三章節則詳細說明海象環境水流之航路規劃，提出含水流之網格式圖最佳路徑演算法，並對其時間與空

間複雜度做分析，以應用實例來驗證本演算法之正確性。最後，將在第四章節針對本文做結論。

## 貳、網格資料結構與參數定義

本文是建立於二維空間中的工作環境，以一個網格(Cell)為單位，並利用網格化電子海圖為基礎，因此，所使用的電子海圖可以利用掃描器掃描至電腦中形成圖形檔案後，再以像素(Pixel)為網格單位來建立所需要的資料結構，在此並不需要考慮電子海圖網格化後所產生的網格大小之最佳化問題，因所儲存的資料與圖形檔案的內容完全一致，當電子海圖完成網格化處理並記錄下來之後，就可利用 Microsoft Windows XP 界面任意輸入單組或多組起點和終點，藉由本文所提出的演算法完成最短路徑規劃。有關電子海圖網格化過程如圖 1 所示，首先，將工作環境進行網格化處理，即對電子海圖中之地理環境如圖 1(a)，藉電腦化處理將其加上邊框及格線確定電子海圖範圍如圖 1(b)，以確保在利用其進行計算時不會超出電子海圖範圍之外，再經過網格化處理之後得到如圖 1(c)所示的網格化電子海圖。在網格結構中，網格圖中的每個網格都儲存四個參數： $AT_{i,j}$ 、 $RW_{i,j}$ 、 $Vis_{i,j}$  與  $v_E(t, dir)$ ，利用這些參數資料可以便於記錄在網格圖所形成的陣列中，每一個節點(通常是規則的形狀)所需要的特殊資料。每個參數的定義與說明詳見表 1。



(a) 給定的海圖環境 (b) 加上邊框及格線 (c) 網格化後的電子海圖

資料來源：[4]

圖 1 電子海圖網格化過程

### 2.1 參數與變數

本文採用的資料結構型態為網格化圖形或稱其為蜂巢組織狀的資料結構，且以 *HGMR* 做為受海象環境水流影響之網格圖上最佳航路規劃的核心演算法。為解決船舶受海象環境水流影響所導致的偏航效應，本文發展出含水流之網格圖最佳路徑演算法來完成海上動態環境之船舶(*Single-Cell Ship*)航路規劃，針對相關的參數與變數需先做定義及說明，詳如表 1，以便對所提出的演

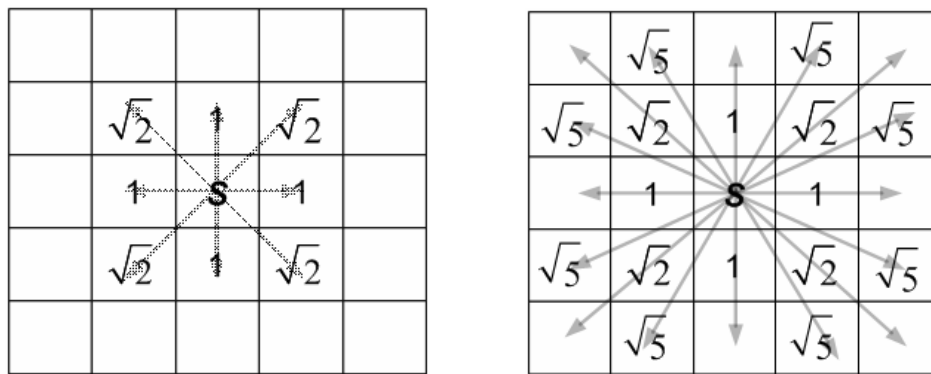
算法做詳盡介紹。

表 1 路徑規劃的參數與變數

變 數	說 明
$AT_{i,j}$	<i>Arriving Time</i> , 為儲存從起點至 $C_{i,j}$ 所需的時間。
$C_{i,j}$	<i>Cell</i> , 工作空間分割成 $I \times J$ 個網格, $(i, j)$ 為空間座標, 是為二維陣列的索引值, $0 \leq i < I, 0 \leq j < J$ 。
$C_{i(0),j(0)}^{Path}(t),$ $C_{i(1),j(1)}^{Path}(t), \dots$ $C_{i(h),j(h)}^{Path}(t), \dots$ $C_{i(H),j(H)}^{Path}(t)$	動態環境網格圖中 <i>Single-Cell Ship</i> 到移動起始點的路徑。 $t$ 表示時間點。
$D$	<i>Destination</i> , 表示網格圖中 <i>Single-Cell Ship</i> 移動之終點位置。
$h$	<i>Single-Cell Ship</i> 行進路徑的移動起始點, $0 \leq h < H$ 。
$H$	<i>Single-Cell Ship</i> 由起點到終點之總網格數目。
<i>index</i>	<i>LL</i> 串列指標陣列索引值, $0 < index < Max\_Cir(t)$
$Max\_Cir(t)$	<i>Circulate</i> , <i>LL</i> 串列指標陣列的 <i>Bucket</i> 數目, $t$ 表示時間點。
$LL_{index}$	表歸類排序後的相鄰網格串列。
$LL_{Path}^{Backtracking}$	紀錄回溯後所得路徑上網格的串列。
$RW_{i,j}$	<i>Regional Weight</i> , $RW_{i,j} = \infty$ , 表示 $C_{i,j}$ 為障礙物; $RW_{i,j} = 0$ , 表示可通行的自由空間區域。
$S$	<i>Source</i> , 表示網格圖中 <i>Single-Cell Ship</i> 之起始位置。
$Vis_{i,j}$	<i>Visit</i> , $Vis_{i,j} = TRUE$ , 表示 $C_{i,j}$ 為已被處理過的 <i>cell</i> , 即已被拜訪過的 <i>cell</i> , 反之, 表示尚未處理的 <i>cell</i> 。
$v_{head}(t, dir)$	<i>Heading</i> , 船艙向。其中 <i>dir</i> 為 <i>direction</i> , 表示移動方向。
$\bar{v}_{head}(t)$	$v_{head}(t, dir)$ 的向量, 代表船艙所朝的方向及速度。
$v_{cou}(t, dir)$	<i>Course</i> , 船舶實際航向。
$\bar{v}_{cou}(t)$	$v_{cou}(t, dir)$ 的向量, 代表船舶航行的方向及速度。
$v_E(t, dir)$	<i>Environment</i> , 環境水流。
$\bar{v}_E(t)$	$v_E(t, dir)$ 的向量, 代表環境水流的速度及方向。

## 2.2 Higher Geometry Maze Router, HGMR

網格狀結構雖具有許多優勢，但仍受到至少兩個重要的限制：首先，由於將電子海圖網格化的緣故，工作空間中的每一個位置都可以由許多細長交錯直線繪成之網格所表示，然而細長交錯直線的疏密會造成網格大小的變化，進而影響到工作空間中障礙物與移動物體的解析度，以及最短路徑的精確度，這種情形存在於任何網格狀的結構中，即使是非矩形的形狀，例如三角形或八邊形結構也無法避免；其次，未必所有的相鄰網格都具有相同間距，端視其與中心網格的相對位置。圖 2 說明 *HGMR* 網格連接方式及網格間相互的間距關係，圖 2(a)顯示 8 向連接相鄰網格情形，位在中心網格 *S* 的上下左右 4 個網格(一般鄰格)距離中心網格 *S* 為 1 個單位長度，但位於中心網格 *S* 的 4 個對角位置網格(對角鄰格)距離中心網格 *S* 為  $\sqrt{2}$  個單位長度。圖 2(b)顯示擴增了 8 個方向成為 16 向連接相鄰網格情形，除了一般鄰格與對角鄰格外，又增加了 8 個鄰格，稱其為  $\pi/8$  鄰格，距離中心網格 *S* 為  $\sqrt{5}$  個單位長度。透過 *HGMR* 可以再向外擴增為 32 向連接的相鄰網格，甚至更高維的連接鄰格，而結果僅需增加條件式陳述及考慮 *circular buckets* 數目即可達成，其效能分析與 8 向差異性不大，但整個計算量增加、執行時間較長。因此，一般均採用 8 向或 16 向迷宮式搜尋演算法完成路徑規劃即可達到最佳效果。故本文利用 *HGMR* 演算法完成船舶航路規劃問題，有關 *HGMR* 的理論，Jan 等人(2005)<sup>[22]</sup>曾提出證明，只要路徑存在，所求得的路徑即為最短路徑，且具有線性的時間與空間複雜度。



(a) 8 向連接的鄰格

(b) 16 向連接的鄰格

圖 2 網格連接方式及網格間相互的間距關係

## 2.3 向量解析

向量(Vector)又稱矢量，即既有大小又有方向的量就稱做向量。陳榮群(1996)<sup>[23]</sup>曾提及向量是被以具有方向和長度的箭頭來表示，而箭頭長度，是指位置的移動或力的強弱或速度的意思。而長度和方向是已決定的，所以在箭頭

中有起點也有終點。如圖 3 所描繪的向量  $\vec{v}_{cou}(t)$  代表  $v_{cou}(t, dir)$  的向量，即船舶航行的方向及速度， $S$  為起點， $D$  為終點。

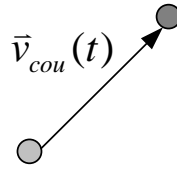


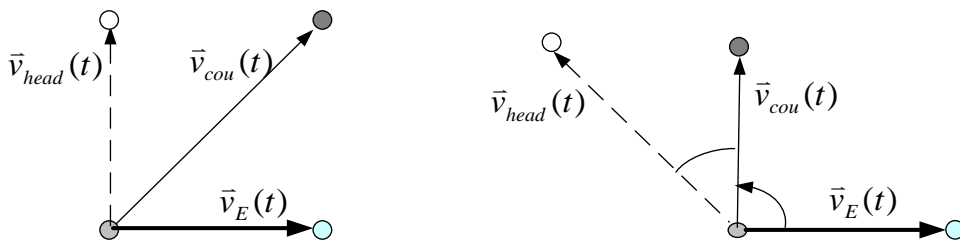
圖 3 向量解析船舶航行的方向及速度

向量表示事物的性質或狀態，不僅只有正的向量，而且也包含負或零的向量。如此一來，對向量而言，即可作加法和減法運算。以本文為例，考慮含環境水流之向量  $\vec{v}_E(t)$ 、船舶實際航向之向量  $\vec{v}_{cou}(t)$  及船艏向之向量  $\vec{v}_{head}(t)$  三者之關係，當受環境水流  $\vec{v}_E(t)$  影響情況下，欲使船舶仍能由  $S$  航行至  $D$ ，此時，即需加入修正量  $\vec{v}_{head}(t)$  來修正航向，藉使船舶保持最佳航路規劃。圖 4 表示船舶受環境水流影響下，以向量解析方式推導航路規劃結果，圖 4(a)說明當船艏向與水流成 90 度及圖 4(b)非 90 度情況，藉由向量運算可解析得到船舶航向向量，運算結果可整理成式(1)：

$$\vec{v}_{cou}(t) = \vec{v}_{head}(t) + \vec{v}_E(t) \quad (1)$$

其中，

- $\vec{v}_{cou}(t)$ :  $v_{cou}(t, dir)$  的向量
- $\vec{v}_{head}(t)$ :  $v_{head}(t, dir)$  的向量
- $\vec{v}_E(t)$ :  $v_E(t, dir)$  的向量



(a) 船艏向與水流成 90° 情況      (b) 船艏向與水流非 90° 情況

圖 4 向量解析船舶受環境水流影響航路規劃情形

S

## 參、具水流之網格圖航路規劃

### 3.1 環境水流之航路規劃

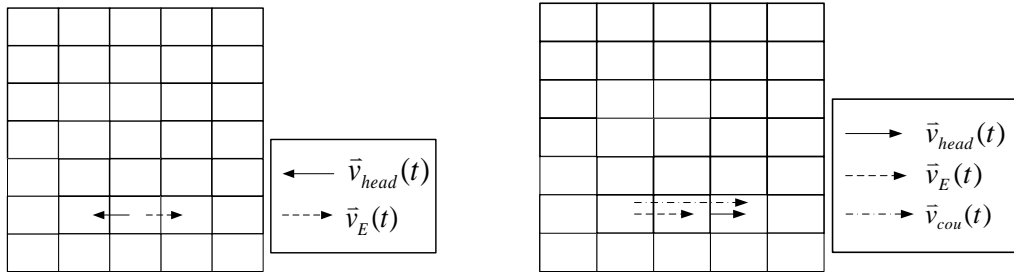
海上環境瞬息萬變，對航海人員而言，如何確保航行安全並確實將船舶引領至目的地，整個航程做好航路規劃係最重要的達成方法。由於船舶是個浮體，外力或海象環境因素常會影響航海人員的操船行為與決策，水面環境的未知及天候的詭譎多變，致使船舶在水面上航行時，航海人員對於船舶的掌控往往承受很大的壓力，針對船舶航向是否維持在原先規劃好的航路上更是需要特別注意，若有偏離航路則需隨時定位並修正航向，將船舶引導回原來航路。本文所探討之船舶(*Single-Cell Ship*)最佳航路規劃為一種即時的路徑規劃，以往在探討此類路徑規劃問題時，總以非即時的路徑規劃方式解決，但考慮船舶遭受海象環境因素影響下之航路規劃過程係屬動態規劃，為順利解決此問題遂加入時間觀念來探討，藉由每一時間點探討取決 *Single-Cell Ship* 應該前進的下一個最佳位置，並以 *HGMR* 為核心演算法。由於 *Single-Cell Ship* 最佳航路規劃會受自然環境因素之影響，如何克服自然環境因素影響，而仍能做好航路規劃，即為本文所欲探討主題。由於海象環境因素複雜多變，本文僅考慮受水流影響之自然環境因素，當 *Single-Cell Ship* 受水流影響而偏離原航向時，欲如何保持原先航路規劃且不受水流作用影響而改變航路，於是便加入船艏向(*Heading*)去修正水流所造成之偏航效應，俾能使 *Single-Cell Ship* 仍維持在原先規劃的路徑上。於網格圖中，將 *Single-Cell Ship* 視為船舶本體， $v_{head}(t, dir)$  代表船艏所朝的方向，另外，水流的參數值為  $v_E(t, dir)$  代表每個時間點受水流影響所產生之距離值，變數值  $dir$  表示移動的方向。因此，在考慮受水流影響下，當 *Single-Cell Ship* 由起始點  $S$  往終點  $D$  移動時，如何克服受水流影響所導致原先規劃路徑改變，便需要求出船艏所朝的方向及速度來加以修正。因為船舶真正移動的方向稱為航向(*Course*)，由於受水流影響會使船舶航向產生偏移，如何導正使船舶回歸真正航路，此時即需導入向量概念，藉由向量合成的解析，計算出船艏向的向量  $\vec{v}_{head}(t)$  來修正或克服受水流影響所產生的偏移量。透過整體理念，本文提出嶄新的具水流之網格圖最佳航路演算法來解決船舶航路規劃問題，完整的演算法將於下一章節做介紹。

### 3.2 具水流之網格圖最佳航路演算法

本文提出具水流之網格圖最佳航路演算法來完成 *Single-Cell Ship* 最佳航路規劃，本演算法係利用向量式來推導求得船艏向的向量，藉由式(1)，若  $\vec{v}_E(t)$  與  $\vec{v}_{cou}(t)$  為已知值，即可求出船艏向之向量  $\vec{v}_{head}(t)$ ，為便於計算，本文假設水流流速及 *Single-Cell Ship* 速度均為 1 個單位速度。當執行具水流之網格圖最佳航路演算法過程將會遭遇幾種情況，這些情況會影響到 *Single-Cell Ship* 應

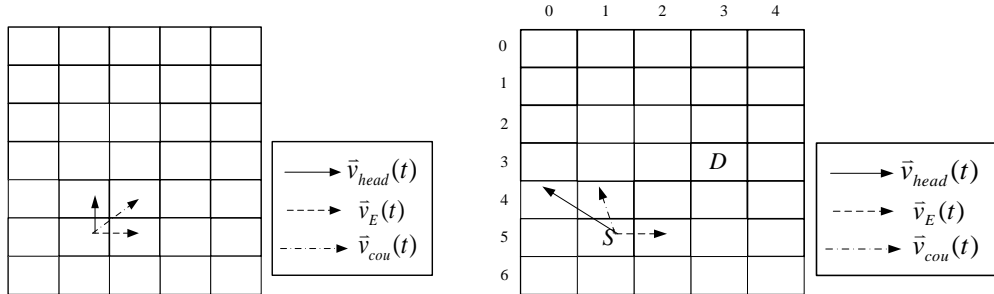


如何前進，茲將各種情況之向量解析說明如圖 5 所示。圖中  $S$  代表 *Single-Cell Ship* 於某單位時間所在位置， $D$  代表終點位置，藉由圖 5 說明可了解 *Single-Cell Ship* 下一個單位時間應如何取決前進，以利演算法順利執行。首先，判斷水流流向和船艙所朝的方向是否為同一方向，若藉由式(1)推導出  $\vec{v}_{cou}(t) = 0$ ，則表示水流流向和船艙所朝的方向為相反方向，速度相同，此時作用力為相互抵消之作用，於是將使 *Single-Cell Ship* 產生不前進的結果，如圖 5(a)所示；反之，若推導出  $\vec{v}_{cou}(t) = 2$  個網格單位，則視兩者為相同方向，結果如圖 5(b)所示，故此時期 *Single-Cell Ship* 前進路徑會加上受水流影響所產生之距離值而併同到下一個網格。假設不屬於上述兩種情況，則  $\vec{v}_{head}(t)$  可藉由式(1)推導求得，如圖 5(c)及 5(d)所示，*Single-Cell Ship* 的實際前進方向則藉由向量解析結果取決。



(a) 水流流向和船艙向為相反方向

(b) 水流流向和船艙向為相同方向



(c) 非(a)及(b)所示其餘情況一

(d) 非(a)及(b)所示其餘情況二

圖 5 含環境水流網格圖的向量解析

演算法：具水流之網格圖最佳航路規劃

BEGIN

STEP 1：初始化設定

STEP 1.1：設定 *Single-Cell Ship* 的起始點位置  $S$ ，如果起始點  $S$  之  $RW_{i,j} \neq \infty$ ，則設定起始點  $S$  之  $AT_{i,j} = 0$ 、 $h = 0$  且設  $C_{i(h),j(h)}^{Path}(t) = S$ ，否則回傳”

4

5  $D$       9       $S$

6

起始點設定錯誤在障礙物上”。

STEP 1.2：設定 *Single-Cell Ship* 的終點位置  $D$ ，如果終點  $D$  之  $RW_{i,j} = \infty$ ，則回傳”終點設定錯誤在障礙物上”。

STEP 2：設定  $\vec{v}_{cou}(t)$  及環境水流之向量  $\vec{v}_E(t)$ 。

STEP 3：以  $C_{i(h),j(h)}^{Path}(t)$  為起始點  $S$  到終點  $D$  做汎洪處理。

Call *Higher Geometry Maze Router*

STEP 4：回溯

STEP 4.1：若終點  $D$  之  $AT_{i,j} = \infty$ ，則傳回錯誤訊息：“There is no existing route.”。

STEP 4.2：搜尋  $LL_{Path}^{Backtracking}$  尾端的網格為  $C_{i,j}$  之所有相鄰網格。

從  $C_{i,j}$  所有相鄰網格中，取出  $AT_{i,j}$  最小的網格  $C_{i',j'}$  的座標。

STEP 4.3：將  $C_{i',j'}$  的座標存入  $LL_{Path}^{Backtracking}$  串列中。

STEP 4.4：重複 STEP 4.2 直到  $C_{i',j'} = C_{i(h),j(h)}^{Path}(t)$  表示路徑已找到。

STEP 5：計算船艙向之向量  $\vec{v}_{head}(t)$ 。

STEP 5.1：求取船艙的速度及方向

$$\vec{v}_{cou}(t) = \vec{v}_{head}(t) + \vec{v}_E(t)$$

STEP 5.2：  $C_{i(h),j(h)}^{Path}(t+1) = C_{i(h+1),j(h+1)}^{Path}(t)$

STEP 6：重複 STEP 3 直到  $C_{i(h),j(h)}^{Path}(t)$  行經到終點  $D$ 。

END {具水流之網格圖最佳航路演算法}

### 3.3 效能分析

#### 3.3.1 時間複雜度分析

有關環境水流(Environment Current, EC)航路規劃演算法的時間複雜度(Time Complexity)分析如下:STEP 1 及 2 為對於網格圖中之所有網格做初始化設定及取決  $\vec{v}_{cou}(t)$  和環境水流之向量  $\vec{v}_E(t)$ ，其所花費時間  $T_{init}^{EC}$  為  $O(N)$ 。STEP 3 利用 *HGMR* 計算路徑，故所需之時間  $T_{shortest}^{EC}$  為  $O(N)$ 。STEP 4 由終點  $D$  開始搜尋八個相鄰網格直到起始點  $S$  為止，然後決定下一個時間點的移動路徑，其總搜尋時間  $T_{search}^{EC}$  為  $O(N)$ 。STEP 5 計算船艙向之向量  $\vec{v}_{head}(t)$ ，只需藉由式(1)即可推導求得，故所需之時間  $T_{heading}^{EC}$  為  $O(1)$ 。最後，重複 STEPS 3~6 直到 *Single-Cell Ship* 到達終點  $D$  則中止，此動態路徑規劃演算法的執行時間  $T_{iterations}^{EC}$  為  $O(q)$ 。故整體時間複雜度  $T^{EC}$  如下：

$$\begin{aligned} T^{EC} &= T_{init}^{EC} + (T_{shortest}^{EC} + T_{search}^{EC} + T_{heading}^{EC}) \times T_{iterations}^{EC} \\ &= (N + 1) + (N + (N + 1) + 1) \times q \end{aligned}$$

$$= O(qN)$$

其中  $q$  為  $HGMR$  執行的次數，其平均值為  $O(\sqrt{N})$ ，最大值為  $O(N)$ 。

### 3.3.2 空間複雜度分析

具水流之網格圖最佳航路演算法是架構於  $HGMR$  而發展出來的演算法，因此，有關本演算法的空間複雜度分析，很明顯與  $HGMR$  相同均使用  $I \times J$  二維陣列  $C_{i,j}$  來儲存網格圖中各個節點的狀態，所需花費之空間  $SC_{shortest}^{EC}$  為  $O(N)$ ，其中，不同之處在於儲存網格圖中各個節點的狀態增加  $v_E(t, dir)$  一個參數值，所花費之空間  $SC_{add\_variable}^{EC}$  為  $O(N)$ ，故執行本演算法所需的空間複雜度 (Space Complexity)  $SC^{EC}$  分析如下：

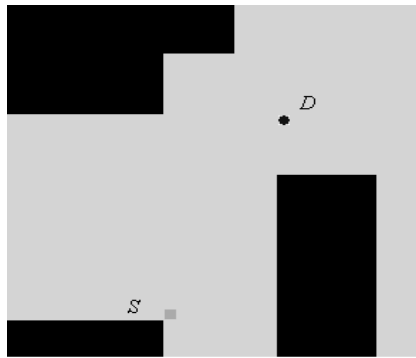
$$\begin{aligned} SC^{EC} &= SC_{shortest}^{EC} + SC_{add\_variable}^{EC} \\ &= N + N \\ &= O(N) \end{aligned}$$

### 3.4 模擬結果

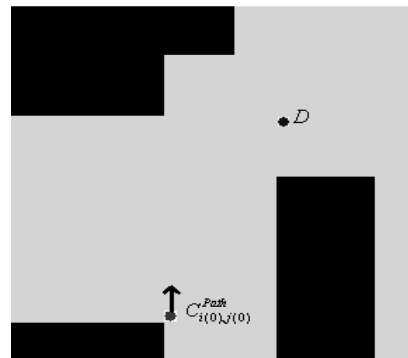
為驗證本文所提出具水流之網格圖最佳航路演算法之正確性，本章節將針對船舶受不同環境水流流向影響下，舉兩個應用實例說明演算法的執行結果，分別如圖 6 及圖 7 所示。圖 6 為環境水流從南向北流之應用實例，而圖 7 則是環境水流從西向東流之應用實例，其中  $S$  代表起始點， $D$  代表終點，並以  $C_{i(h),j(h)}^{Path}(t)$  表示船舶於每一時間點所在位置，細線箭頭為船艏向之向量，粗線箭頭為環境水流之向量，黑色區域代表障礙物無法通行。首先，針對網格圖做初始化設定起始點和終點位置並設環境水流流向(從南向北)，如圖 6(a)所示。圖 6(b)表示水流流向及船舶船艏向為相同方向情況，此時，船舶會前進 2 個網格單位(當  $t = 1$  時)，如圖 6(c)所示。圖 6(d)顯示結果係藉由向量式(1)推導求得船艏向之向量(當  $t = 4$  時)，俾便修正船舶航向。最後，船舶順利抵達終點，完成最佳航路規劃，所花時間  $t = 12$ ，如圖 6(e)所示。

接著，本文改變環境水流流向之設定，以不同環境水流流向來驗證本演算法之正確性，圖 7(a)為網格圖初始化設定(水流向從西向東流)。此應用實例中，水流流向和船舶船艏向並非相同或相反方向，藉由式(1)向量合成的解析，可推導求得船艏向之向量，如圖 7(b)所示。經加入船艏向的修正，船舶克服環境水流的影響，此時船舶航向將被修正朝終點位置繼續前進(當  $t = 1$  時)，如圖 7(c)所示，船舶會前進 1 個網格單位。圖 7(d)顯示結果係當  $t = 8$  時，船舶之路徑規劃情形。最後，船舶順利抵達終點，完成最佳航路規劃，所花時間  $t = 16$ ，

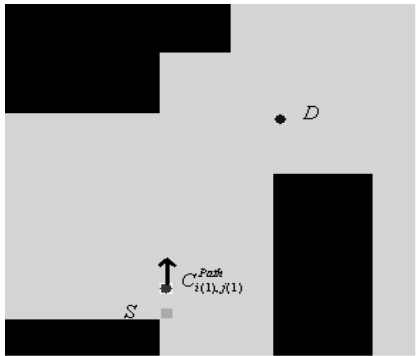
如圖 7(e)所示。



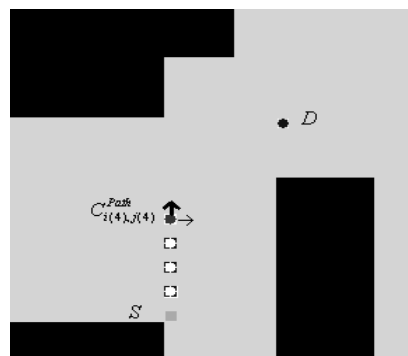
(a) 起始點和終點初始化設定，預設水流向為從南向北流



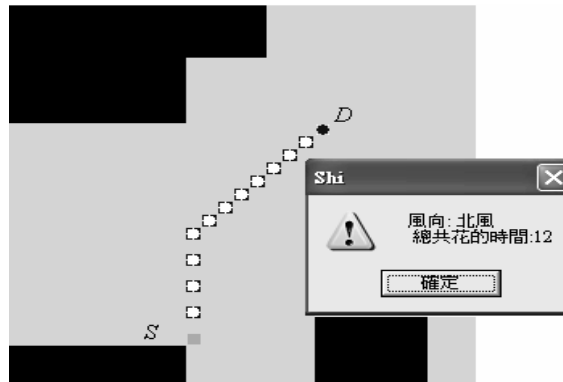
(b) 水流向和船舶的船艙向為相同方向情況



(c) 船舶前進 2 個網格單位， $t = 1$

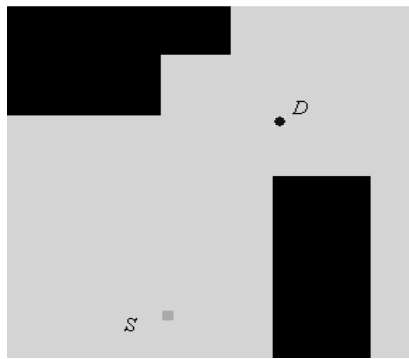


(d) 由向量式導出船艙向之向量(細線箭頭)， $t = 4$

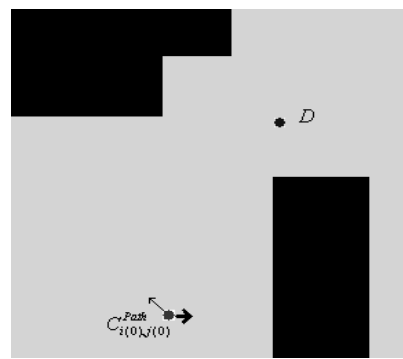


(e) 船舶抵達終點，所花時間  $t = 12$

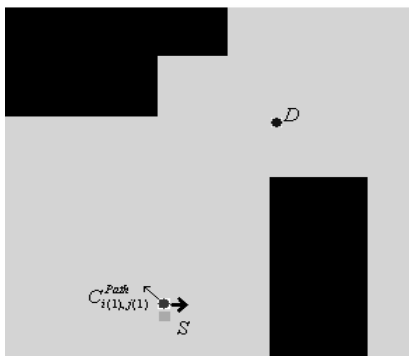
圖 6 環境水流從南向北流之應用實例(細線箭頭為船艙向之向量，粗線箭頭為環境水流之向量)



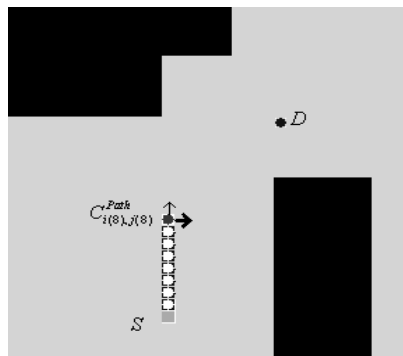
(a) 起始點和終點初始化設定，預設水流向為從西向東流



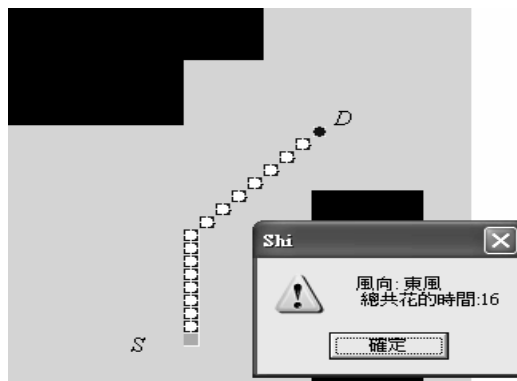
(b) 由向量式導出船艏向之向量(細線箭頭)



(c) 船舶前進 1 個網格單位， $t = 1$



(d) 由向量式導出船艏向之向量(細線箭頭)， $t = 8$



(e) 船舶抵達終點，所花時間  $t = 16$

圖 7 環境水流從西向東流之應用實例(細線箭頭為船艏向之向量，粗線箭頭為環境水流之向量)

### 參考文獻

1. Mikami, K. and Tabuchi, K., "A Computer Program for Optimal Routing of Printed Circuit Connections", *IFIPS Proceedings*, Vol. H-47, pp. 1475-1478, 1968.
2. Lin, Y. L., Hsu, Y. C., and Tsai, F. S., "Hybrid Routing", *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, Vol. 9, No. 2, pp. 151-157, 1990.
3. Beattie, J. H., "The Future of Electronic Charts in Merchant Ships", *The Journal of Navigation*, Vol. 48, No. 3, pp. 335-348, 1995.
4. Jan, G. E., Lin, M. B., and Chen, Y. Y., "Computerized Shortest Path Searching for Vessels", *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 5, No. 1, pp. 95-99, 1997.
5. Chang, K. Y., Jan, G. E., and Parberry, I., "A Method for Searching Optimal Routes with Collision Avoidance on Raster Charts", *The Journal of Navigation*, Vol. 56, No. 3, pp. 371-384, 2003.
6. Szlapczynski R., "A New Method of Ship Routing on Raster Grids, with Turn Penalties and Collision Avoidance", *The Journal of Navigation*, Vol. 59, No. 1, pp. 27-42, 2006.
7. Gewali, S. N. and Tollis, Ioannis G., "Path Planning in the Presence of Vertical Obstacles", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 6, No. 3, pp. 331-341, 1990.
8. Takahashi, O. and Schilling, R. J., "Motion Planning in a Plane Using Generalized Voronoi Diagrams", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 5, No. 2, pp.143-150, 1989.
9. 詹景裕、張啓隱、汪一帆，"網格圖上任意形狀機器人之最短路徑規劃"，九十一年度年會暨精密機械製造研討會，台灣，頁 120-130，2002。
10. 詹景裕、張啓隱、汪一帆，"網格圖上可旋轉的任意形狀機器人之最短路徑規劃"，九十一年度年會暨精密機械製造研討會，台灣，頁 131-140，2002。
11. Fawcett, J. and Robinson, P., "Adaptive Routing for Road Traffic", *IEEE Computer Graph*, Vol. 20, No. 3, pp. 46-53, 2000.
12. Aggarwal, N. and Fujimura, K., "Motion Planning amidst Planar Moving Obstacles", *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 2153-2158, 1994.
13. Fujimura, K., "Motion Planning Using Transient Pixel Representations", *Proceedings of the 1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 34-39, 1993.
14. Castro, D., Nunes, U., and Ruano, A., "Reactive Local Navigation", *Proceedings 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON' 02)*, Sevilla, Vol. 3, pp. 5-8, 2002.

15. F Xavier Martínez de Osés and Castells Marcel.la, “Heavy Weather in European Short Sea Shipping: Its Influence on Selected Routes”, *The Journal of Navigation*, Vol. 61, No. 1, pp. 165-176, 2008.
16. 施保旭, “地理資訊系統”, 初版, 儒林圖書有限公司, 台北, 1995。
17. Eastman, Charles M., “Vector Versus Raster: A Functional Comparison of Drawing Technologies”, *IEEE Computer Graphics & Applications*, Vol. 10, No. 5, pp. 68-80, 1990.
18. Chow, K. M. and Rad, A. B., “Enhancement of Probabilistic Grid-based Map for Mobile Robot Applications”, *Journal of Intelligent and Robotic System*, Vol. 34, No. 2, pp.155-174, 2002.
19. Moravec, H. and Elfes, A., “High Resolution Maps from Wide Angle Sonar”, *Proceedings of the 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 116-121, 1985.
20. Lee, C. Y., “An Algorithm for Path Connections and Its Applications”, *IRE Transactions on Electronic Computer*, Vol. EC-10, pp. 346-365, 1961.
21. Jan, G. E., Chang, K. Y., and Parberry, I., “A New Maze Routing Approach for Path Planning of a Mobile Robot”, *Proceedings of The IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Vol. 1, pp. 552-557, 2003.
22. Jan, G. E., Chang, K. Y., Guo, S., and Parberry, I., “A 4-geometry Maze Router and Its Application on Multiterminal Nets”, *ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems*, Vol. 10, No. 1, pp. 116-135, 2005.
23. 陳榮群, 向量分析, 初版, 美商麥格羅希爾國際股份有限公司, 1996。