

限制水域下自主航行的避碰問題研究

高子傑*¹ 翁維珠* 李浩善** 林傳富**

*國立臺灣海洋大學 系統工程暨造船學系
**財團法人船舶暨海洋產業研發中心

關鍵詞: 避碰、限制水域、緊急避碰、自主船

摘要

本文提出了一套用於自主船在限制水域的避碰系統，該系統具備避碰他船和岸邊的功能。當自主船在進入港口或準備進入河道時，都屬於限制性水域航行問題，此時，除了必須安全避碰他船，還須能安全避碰岸邊。如何讓自主船能同時做到安全避碰他船且安全避碰岸邊，就是本文發想的動機。對人類而言，可以從電子海圖或紙本海圖，以及船舶當下位置即可決策如何安全航行，但對電腦而言，是一項挑戰。因此，本文基於廖士盛碩士論文所研發的自主避碰系統，新增岸邊避碰功能，以提升航行安全。在航行靠近岸邊時，為確保船舶安全，首先需了解船舶與岸邊邊界的相對位置，並進行當下與岸邊的碰撞風險評估。若自主避碰系統判斷船舶與岸邊即將發生碰撞時，系統會立即決策，提供自主船一個岸邊的防碰點，以避免碰撞發生。為了驗證系統功能，本文設計多種情境測試船舶於限制水域的避碰功能，並應用船舶運動模擬軟體搭配本論文所研發的自主避碰系統來測試。

¹ 高子傑 (11151023@email.ntou.edu.tw)

前言

因應全世界各先進國家積極發展無人載具相關技術，為此我國鼓勵無人載具創新多元應用，發展產業技術及創新服務。因此本文將自主船(autonomous ship)作為主要的研究方向，無人載具能搭載相當多的功能，其中無人載具能自主執行任務，不須人為操作，透過自動化技術，提高完成任務的效率，無須人員直接參與操作，可以減少人力成本和相關風險，例如面臨惡劣或是危險的任務時，無人載具的存在尤其重要，其次無人載具能精準執行預先設定的任務，避免人為因素對任務執行的不確定性，最終無人載具可以結合更多的創新科技，包括人工智慧[1]、最佳化演算法、感知技術、控制系統等。

根據歐洲海事安全局(European Maritime Safety Agency, EMSA)對於海上傷亡及事故發生地點統計[9]，2014年至2021年，超過一半的海上傷亡和事件發生在內水(internal waters)，其次是領海(territorial sea)和外海(open sea)，並且發生在內水中的港口區發生的頻率最高，如圖1依照航行區域的海上傷亡及事故統計，2021年內水區域已通報的傷亡及事故占55%，其中港口區占事故的39.2%，外海及領海分別占已通報的海上傷亡及事件的17.9%和17.7%，與2020年相比，內水地區通報的海上傷亡及事故有所增加。

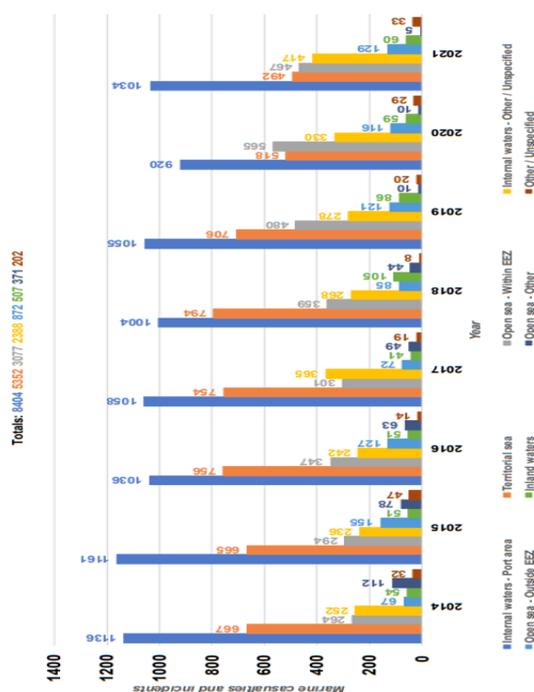


圖1 依照航行區域的海上傷亡及事故統計[9]

2021年3月，長賜輪擱淺於蘇伊士運河事件是引起全球關注的重要事件之一，該事件不僅突顯了運輸業面臨的挑戰，更突顯了船隻航行於限制水域的安全問題。關鍵的事故原因根據長榮海運表示是通過蘇伊士運河時遭遇強風及沙塵暴，導致船身嚴重偏航，觸底擱淺。不過也有專業人士認為是否是人為的操作失

誤或是技術故障，假如搭配本文開發的岸邊虛設船機制，或許長賜輪在遭遇強風的同時，判斷到與虛設船會有碰撞風險，立即給予船隻偽終點，碰撞可能就不會發生。

因此本文針對避碰方法進行研究及分析，2021年Zang等人探討了從1990年開始所使用的自主避碰方法，最早從數學模型開始，演變至人工智慧方法，並且針對現今的自主避碰系統趨勢整理出個別的優缺點，因此推論出較完整的自主避碰系統架構[2]。1984年Wu提出應用幾何分析[3]，建立數學模型，初步實現了對於開放水域的避碰決策，並且認為數學模型對於避碰問題是最基本的應用。2007年羅逢源等人提出對多目標船舶碰撞的解析演算法，主要提供兩種不同的數值解析，分別為經緯度座標法及岸基雷達座標法。本文主要使用岸基雷達座標法，利用兩船的基本資訊(距離、方位、航向、航速)，求得兩船之間的距離方程式，即為兩船最接近點間的距離(Distance Closest Point of Approach, DCPA)，再進行微分，求出距離方程式的極小值，順勢將最接近點時間(Time to Closest Point of Approach, TCPA)求得[4]。2021年周子宸使用AutoCAD雲行線偏移法將地圖偏移出一段安全距離，此安全距離依據模擬船的迴旋直徑1.2倍作為偏移的距離，並且搭配A*搜尋演算法，最終規劃出限制水域自主船的航線路徑。

研究方法

本研究主要開發港內及河道的即時自主避碰系統，使用林傳富等人所提出的偽終點法[5]以及廖士盛等人所提出的新自主避碰系統[6]，以及王富元提出橢圓形船舶領域的構想[7]，整合以上所提到的方法，最終開發出港外及港內皆能使用的自主避碰系統。以上所使用的方法及構想，皆透過財團法人船舶暨海洋產業研發中心(後續簡稱船舶中心)所提供之計算伺服器，驗證本研究開發之自主避碰系統的多種情境測試，從港內虛設船的設計至緊急情況偽終點選取改良，以及港內發生人駕船不遵守《國際海上避碰規則》(COLREGs)之特殊情境，以此確認本研究開發的自主避碰系統的航行安全及可靠性。

自主避碰系統

自主避碰系統主要是參考廖士盛論文中的自主避碰系統架構[6]，延續開發限制水域的自主避碰系統，其功能主要是讓船隻在限制水域能透過航點的方式到達終點，途中能應對岸邊及各種突如其來的情況都能合理應對，讓航行的效率、安全及穩定都能達到一定的可靠性，主要的功能分為以下幾點：

1. 原自主避碰系統

為了方便說明，本文將廖士盛的自主避碰系統(autonomous navigation system, 以下稱為ANSystem)[6]稱之為舊自主避碰系統，避碰流程如下：首先，程序計算本船與所有目標船隻之間的直線距離。所有距離小於安全圈半徑的船隻將被列入入侵船清單。接下來，對入侵船清單進行碰撞判定，移除不會

與本船發生碰撞的船隻，得到避碰清單。避碰清單中的每艘船隻都可能與本船十分接近，甚至可能發生碰撞。在確定避碰清單後，根據避碰優先順序對其進行排序。如果此時清單內沒有船隻，表示無需避碰，本船將繼續前往原本的目標點。但若清單內有船隻，則進行下一步的情境判斷，確定本船是權利船或義務船。若本船是權利船或避碰清單中無需進一步判斷的情況，將直接前往原定目標終點。若本船是義務船，將進入下一步的群聚判定。若屬於群聚船，將與其他船隻合體形成新的合體船舶領域。最後，程序進入避碰機制階段，使用偽終點法避免碰撞，調整航向前往新產生的偽終點。抵達偽終點後，通過復歸機制判斷，若轉向可能存在碰撞風險，則保持直行。待本船確定安全後返回原終點，最終於船隻抵達終點後停止航行。

2. 改良型自主避碰系統

在限制水域下，船隻會根據給定的航點航行，過程中會有與其他船隻相遇的可能，但未能確保其他船隻都會遵守《國際海上避碰規則》(COLREGs)，如果沒有進行相對應的措施，可能會發生碰撞的風險。因此，為了應對限制性水域的空間限制，改良型自主避碰系統(以下稱為 ANSystem1)需要了解當前船隻在岸邊的限制條件有哪些。為此設計了虛設船(dummy ship)作為岸邊距離的限制參考，當船隻駛近於岸邊時，透過本概念就能計算出當下的偽終點，使船隻能安全駛離岸邊，以下圖2是自主避碰系統的主要架構流程圖。

系統執行時，第一步會先取得所有船隻的座標，並且判斷目前模擬的環境在外海或是限制性水域，假設目前位於限制性水域，系統會新增虛設船至岸邊，使系統獲得岸邊資訊。第二步，透過兩點間距離公式計算出本船與所有目標船之間的距離，將距離小於安全圈半徑的船隻加入入侵船清單中。第三步會判斷本船與入侵船清單中的所有船隻是否有碰撞風險，透過CPA將不會與本船發生碰撞的船隻移除，將會碰撞的船隻留於入侵船清單中。第四步，將會碰撞的入侵船清單進行排序，排序是依據兩船最接近點間距離(Distance Closest Point of Approach, DCPA)的計算，將最小DCPA排於入侵船清單中的第一筆，如入侵船清單中沒有船隻，代表船隻之間的距離皆大於安全圈半徑，因此本船只需要往航點航行，若入侵船清單中有船隻，則進行第五步驟，計算日本船與目標船之間的夾角，並根據夾角判斷本船屬於權利或義務船，假設本船為權利船，接著需要持續監測目標船是否實施避讓行為。根據緊急避碰的設計，達最接近點時間(Time to Closest Point of Approach, TCPA)後目標船尚未實施避碰行動，緊急避碰功能就會自動啟動。另一方面，如果本船為義務船時，本船會進入避碰機制，計算出當下的偽終點進行避碰。最終如果到達航點清單中的最後航點，船隻會自動停俸。其中關於TCPA的計算方法如公式1[4]。

$$TCPA = \frac{-\left(U_X \times (S_A \times \sin_{H_A} - S_B \times \sin_{H_B}) + U_Y \times (S_A \times \cos_{H_A} - S_B \times \cos_{H_B})\right)}{\left((S_A \times \sin_{H_A} - S_B \times \sin_{H_B})^2 + (S_A \times \cos_{H_A} - S_B \times \cos_{H_B})^2\right)^{0.5}} \quad (1)$$

船舶基本資訊(距離、方位、船舶向、船速)，A船為(D_A, A_A, H_A, S_A)，B船為(D_B, A_B, H_B, S_B)，其中 U_X 等於 $D_A \times \sin_{A_A} - D_B \times \sin_{A_B}$ ， U_Y 等於 $D_A \times \cos_{A_A} - D_B \times \cos_{A_B}$ 。

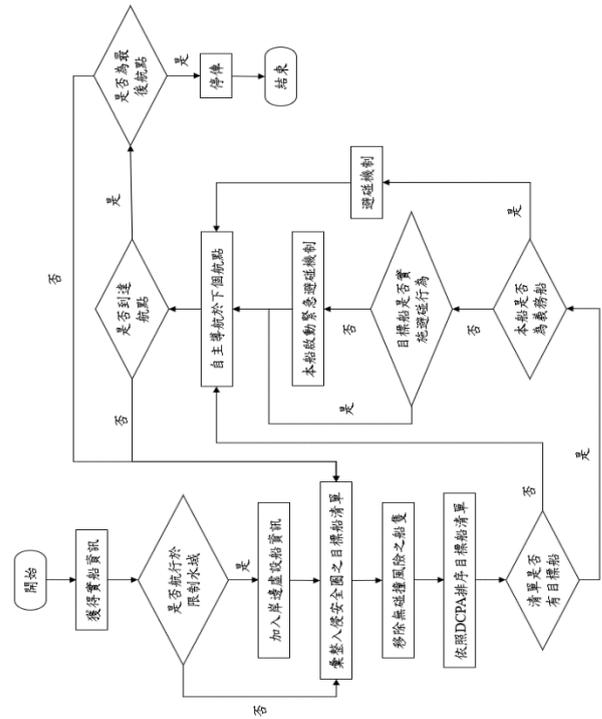


圖2 改良型自主避碰系統主架構流程圖

2.1. 岸邊虛設船設計

虛設船概念正申請專利中。本節主要介紹虛設船用意及初步的定義，其概念就是假想所有岸邊都是由一群船舶、船尾部分重疊的虛設船排列而成，這些虛設船之船速為零，位置固定，並且善用自主避碰系統已達到避碰岸邊的效果。如此一來，不管是航行於開闊水域或是限制水域，其中的差別是自主避碰系統需要判別更多的船隻，包括實體船及虛設船，虛設船的設計原則分別為以下三個：

- 1) 以橢圓形取代岸邊兩頂點之連結線，視為虛擬船之船舶領域，其長軸線與頂點間的連結線重合，短軸半長代表船舶與岸邊的安全距離。
- 2) 以圓形障礙物取代岸邊頂點，其半徑需與橢圓形的短軸半長一樣，以避免與橢圓形銜接時形成過大凹陷，造成船舶搖擺航行。
- 3) 虛擬船船速與圓形障礙物速度均為零，本船啟動避碰時無需遵守國際避碰法規。

圖3顯示某自主船正航行進入某河道口時，所內建的動態區域圖示意圖，河道兩側都有岸邊，這些岸邊都透過圓形和橢圓形取代頂點和連結線。當自主船(塗上方橘色橢圓形)航行河道口附近，如圖3所示，原

航向(橘色箭頭)因為河道口一側的障礙物(圓形、速度為零)進入本船安全圈, 啟動避碰機制根據防碰圈(白色虛線圓形)切點決定新航向(①方向), 當自主船逐步轉向航形接著發現某船(橘色橢圓形)入侵安全圈但船速為零, 則根據新防碰圈(深紫色虛線橢圓)取新切點再度更新航向(②方向), 於是導引本船進入河道。此時, 河道另一側的圓形障礙物和虛擬船由於不會與本船發生碰撞, 所以不理會。

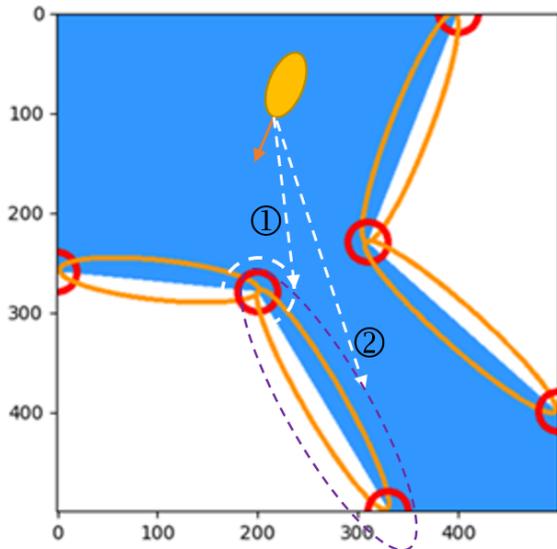


圖3 建立虛設船引導自主船進入港口

從圖3可看出, 虛設船及圓形障礙物之座標如果相當準確, 自主避碰系統只需要進行一般的避碰機制就能引導自主船在限制水域安全航行, 並且面對岸邊也能保持一定的安全距離。

情境測試

本節參考廖士盛開發的新自主避碰系統架構[6], 並且新增船舶於限制性水域中的各種限制及場景, 最終使用船舶中心研發的船舶運動模擬伺服器來模擬船舶於限制水域中的驗證。除了船舶運動模擬伺服器以外, 程式語言皆使用Java運行, 其終目的是要驗證本研究所提出之限制水域下的避碰問題是否能如預期達成安全、穩定、平穩且有效地成功避碰。本章節的情境測試可分為以下幾個部分:

- 1、所有情境圖中的縱橫軸座標都是經過WGS84(World Geodetic System)轉TWD97(Taiwan Datum 1997)所繪製而成, 並且以公尺為單位, 航向角零度為正北方向, 180度為正南方。
- 2、在模擬環境中, 假設無風浪影響。所有船隻均以等速度前進至各自的下一個航點, 並且避碰方法是透過操舵來避讓其他船隻。
- 3、自主船進入港口或準備進入河道時, 遭遇不遵守《國際海上避碰規則》之船隻, 緊急避碰功能是否能安全地完成避碰。

1. 船舶操縱性能試驗

本單元將藉由上述運動模型模擬A船之性能試驗, 分別為左迴旋、右迴旋及Z形試驗。其中藉由迴旋試驗紀錄該船前進距離(Advance distance)、迴旋橫距(Transfer distance)、戰術直徑(Tactical diameter)及穩定迴旋直徑(Turning circle diameter), 另外Z形試驗紀錄第一衝角(First overshoot angle)及第二衝角(Second overshoot angle)。

1.1. 迴旋試驗

迴旋測試的目的是測定船舶迴旋圈, 從而確定船舶迴旋要素, 評價船舶迴旋的迅速程度與所需水域的大小。迴旋試驗通常是在試驗速度下以最大舵角分別向左、右舷進行迴旋操縱, 艏向角變化達360°時測定其迴旋圈。其中試驗速度依國際海事組織(International Maritime Organization, IMO)之操縱性暫定標準規定, 至少為主機最大輸出功率85%時對應船速的90%。根據需要, 測定不同裝載情況(滿載、半載、壓載)、不同船速(全速、半速、低速)與不同舵角(10°、15°、20°、35°)之情況下的迴旋資料。

迴旋試驗操作步驟一般大致如下:

- (a) 調整好預定的航向和航速。
- (b) 發出操舵命令, 並應儘可能快速操舵至規定舵角。
- (c) 當航向角變化達到540°以後, 結束試驗。

1.2. Z形試驗

Z形操縱試驗是Kempf提出的測定船舶對操舵響應的一種很重要的操縱性試驗法。通過測定船舶左右來回操同樣舵角時作蛇航運動一週期所航進的距離來判斷操縱性。如果距離與船長L之比越大, 則操縱性越差, 反之則好, 因此Z形試驗又叫作標準操縱性試驗。

Z形試驗操作步驟一般大致如下:

- (a) 以規定航速保持均速直航。
- (b) 操右舵(10°、20°), 並保持之。船艏向右轉向, 當船艏向右迴轉達到(10°、20°), 即轉艏角與所操舵角相等時, 立即回舵並操左舵(10°、20°), 並保持之。
- (c) 使用(b)步驟至少完成三次蛇行運動(最好五次)後, 結束試驗。

1.2.1. A船

A船相關規格如表1。該船長為21.2公尺, 船寬為5.42公尺, 迴旋試驗的部分, 使用滿舵26度, Z形試驗使用舵角為20度, 以上兩項試驗速度皆為 $5.1444 \frac{m}{s}$, 約10節。

表1 A船基本規格

| 描述 | 值 |
|----------|-------|
| 船長(公尺) | 21.2 |
| 船寬(公尺) | 5.42 |
| 垂標間距(公尺) | 17.62 |

| | |
|---------|-------|
| 船深(公尺) | 3.525 |
| 吃水(公尺) | 1.65 |
| 最大船速(節) | 12 |

圖4為A船右迴旋試驗軌跡, 菱形紅標為航向角達90度的位置, 三角形紅標為航向角達180度的位置, 經過迴旋試驗的操作步驟得到前進距離(Advance)為44.9公尺, 迴旋橫距(Transfer)為27.7公尺, 戰術直徑(Tactical Diameter)為57.9公尺, 穩定迴旋直徑(Turning Circle Diameter)為56.3公尺。

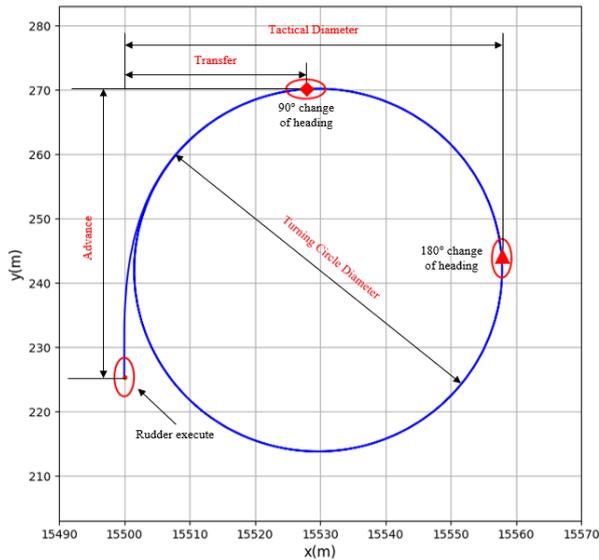


圖4右迴旋試驗軌跡圖

圖5為A船左迴旋試驗軌跡, 菱形紅標為航向角達90度的位置, 三角形紅標為航向角達180度的位置, 經過迴旋試驗的操作步驟得到前進距離(Advance)為44.9公尺, 迴旋橫距(Transfer)為27.6公尺, 戰術直徑(Tactical Diameter)為57.8公尺, 穩定迴旋直徑(Turning Circle Diameter)為56.2公尺。

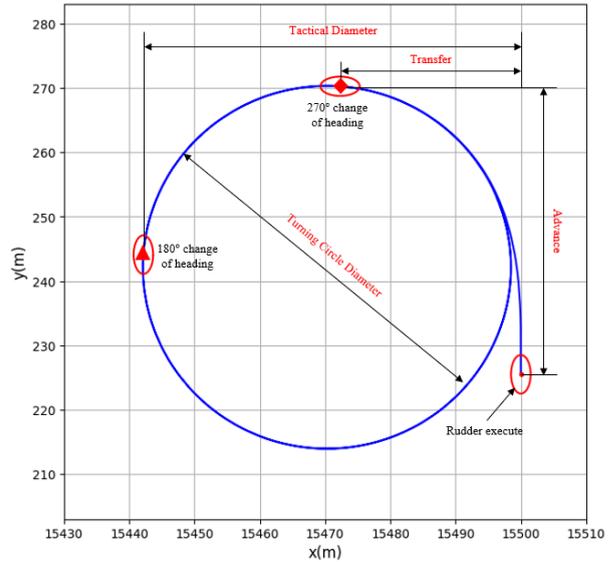


圖5左迴旋試驗軌跡圖

圖6 為A船Z形20度試驗, 紅色線條為航向角, 藍色線條為舵角度, 可以看到試驗中第一衝角(First Overshoot Angle)為24.6度, 第二衝角(Second Overshoot Angle)為20度, 完成一個週期約25秒。

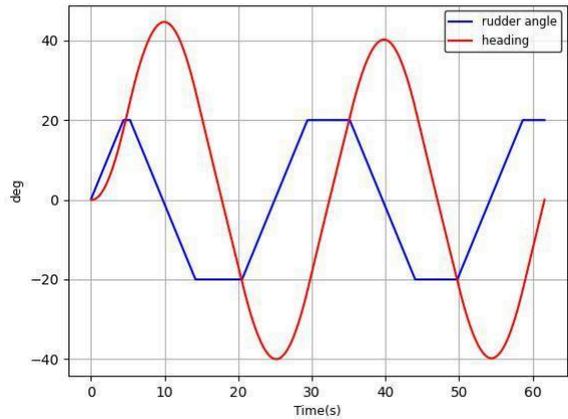


圖6 Z形20度試驗之航向角、舵令時間關係圖

2. 岸邊避碰測試

舊自主避碰系統主要是在開發開闊水域的避碰問題, 因此舊自主避碰系統並沒有搭載岸邊虛設船資訊, 透過本節測試希望使用虛設船概念, 成功引導自主船安全地航行於限制性水域, 如圖7為虛設船的擺放位置, 橢圓形的長短軸為虛設船的長寬, 端點的圓形為障礙物, 測試環境位於高雄一港內。

圖8為情境初始狀態, 綠船為自主船, 起點位於圖中(-1555,7108)處, 朝向下個航點(-160,5626)航行, 詳細的情境測試初始設置如表2所示。

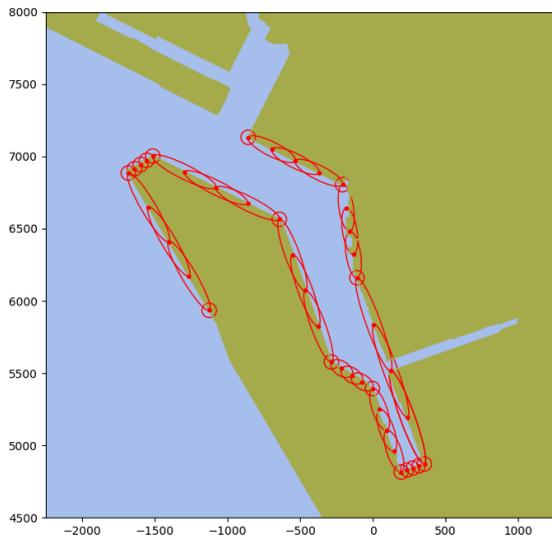


圖7 虛設船示意圖

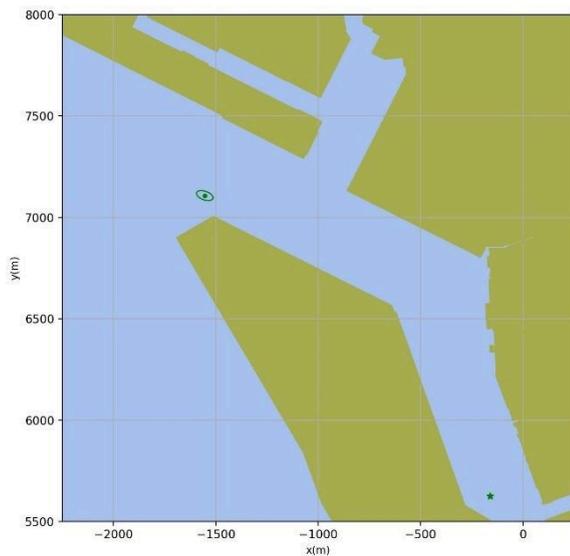


圖8 情境初始狀態

表2 情境測試初始設置

| 測試船 | 起點 | 航點(綠星) | 船速 | 船艏向(度) |
|--------|--------------|-------------|----|--------|
| 綠船(1號) | (-1555, 710) | (-160, 562) | 10 | 110 |

圖9時間為4.8秒，綠船因轉向至下個航點時，判斷與第一艘虛設船會有碰撞風險，因此綠船透過避碰機制機算出防碰圈切點，如圖中綠星的位置。接著圖10為22.2秒，綠船航行一段時間後判斷到會與第二艘虛設船會有碰撞風險，因此原先與第一個防碰圈所產生的偽終點被更新為第二個防碰圈偽終點。圖11為66.6秒，綠船航行一段時間後判斷到會與第三艘虛設

船會有碰撞風險，因此原先與第二個防碰圈所產生的偽終點被更新為第三個防碰圈偽終點。並在圖12為115.8秒，綠船航行一段時間後判斷到會與圓形障礙物會有碰撞風險，因此原先與第三個防碰圈所產生的偽終點被更新為第四個防碰圈偽終，圖中可觀察到偽終點較特別，這與當初設計圓形障礙物有關，將橢圓防碰圈理念改為圓形防碰圈，因此新的偽終點呈現出較往移的現象。

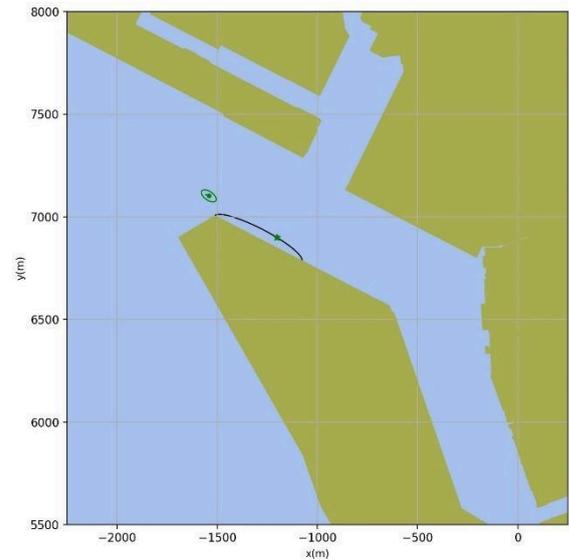


圖9 綠船避第一艘虛設船(4.8秒)

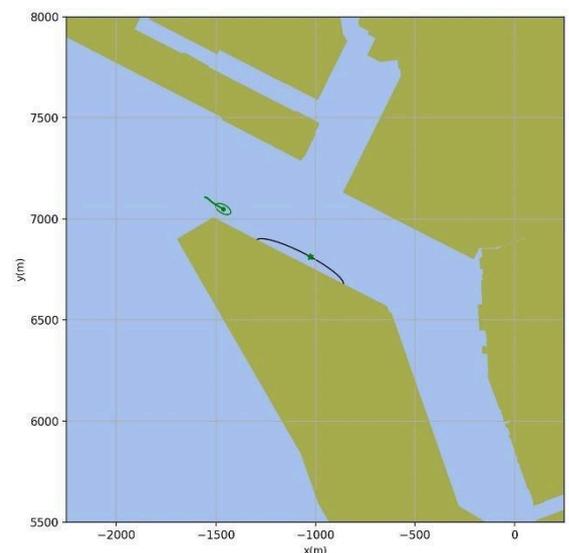


圖10 綠船避第二艘虛設船(22.2秒)

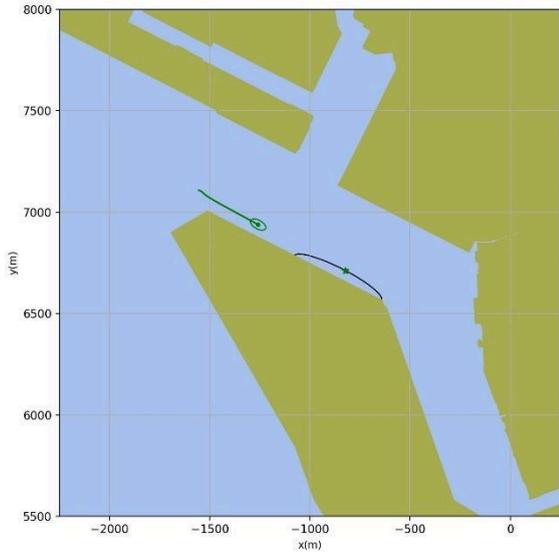


圖11 綠船避第三艘虛設船(66.6秒)

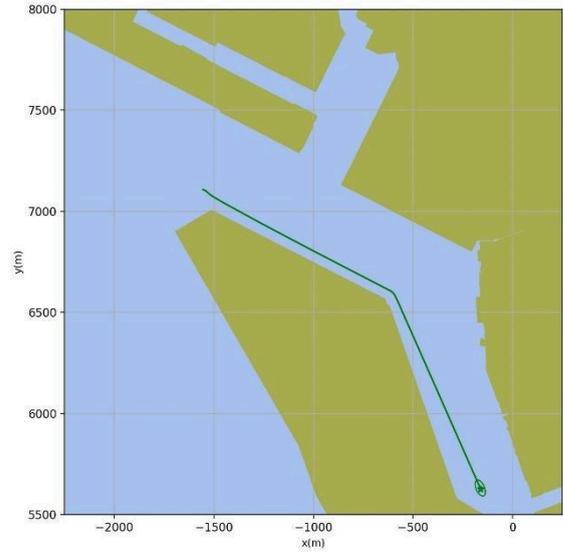


圖 13 綠船模擬結束時刻圖(411.6秒)

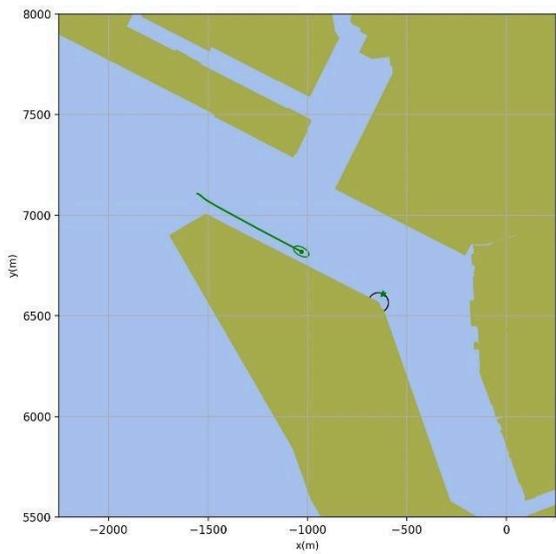


圖12 綠船避圓形障礙物(115.8秒)

最終如圖13為411.6秒綠船模擬結束時刻圖，綠船抵達圖14的偽終點後，直接轉向至下個航點，過程中不與任何的虛設船發生碰撞風險，因此綠船在圖15中保持穩定航行至下個航點。

3. 港內迎艙相遇測試

經過上一節的岸邊避碰測試，驗證了使用虛設船做邊岸邊的避碰依據是可行的，因此本節將設計港內迎艙相遇情境，主要測試情境發生時，是否會啟動一般避碰，並且在避碰的過程中不斷判斷與岸邊碰撞的風險。

圖14為情境初始狀態，綠船為自主船，紅船為人駕駛船，兩艘船隻都會根據航點清單行駛，但只有綠船搭載避碰機制。詳細的情境測試初始設置如表3所示，本測試模擬結束判斷為綠船抵達最後航點。

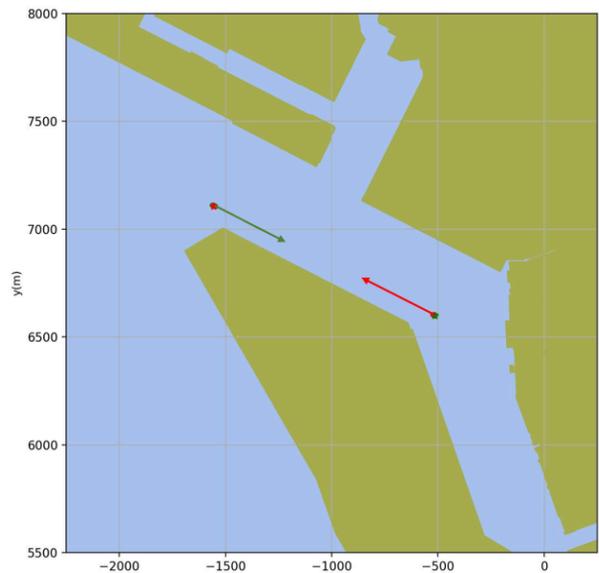


圖14 情境初始狀態

表3 情境測試初始設置

| 測試船 | 起點 | 最終航點 | 船速 | 船艏向(度) |
|-----|--------------|--------------|----|--------|
| 綠船 | (-1555,7108) | (-516,6600) | 10 | 110 |
| 紅船 | (-516,6600) | (-1555,7108) | 10 | 290 |

圖15時間為84秒，根據國際海上避碰規則認定該情境為迎船相遇，綠船及紅船皆為義務船，需要互相禮讓，但本節設計紅船為人駕船不做任何避碰行為，只有綠船有避碰行為。此時綠船透過安全圈範圍判定紅船已入侵，且有碰撞風險，綠船立即計算與防碰圈的切點，如圖15中可發現綠船計算出偽終點於右前方。

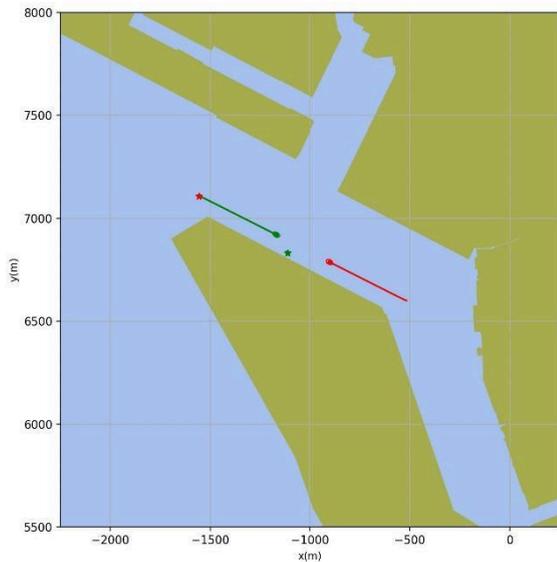


圖15 綠船啟動避碰時刻圖(84秒)

系統根據偽終點的位置更新，立即將綠船轉向至偽終點，經過5.4秒後，岸邊虛設船入侵至綠船安全圈內，且綠船的CPA也入侵到防碰圈，系統立即判斷綠船會與虛設船產生碰撞，因此計算出一個與虛設船的切點提供給綠船，如圖16可發現綠船開始避碰虛設船。當綠船開始向與第一艘虛設船產生的防碰點航行時，間接判斷到第二艘虛設船入侵到綠船的安全圈內，並且判斷到綠船與第二艘虛設船會有碰撞的風險，因此立即計算與第二艘虛設船的防碰圈切點，如圖17可觀察到綠船在避碰紅船的同時，也同時在避碰岸邊的虛設船。

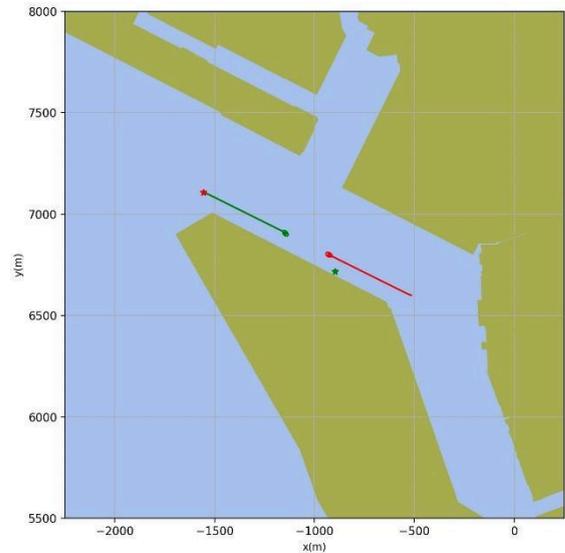


圖16 綠船避碰第一艘虛設船(89.4秒)

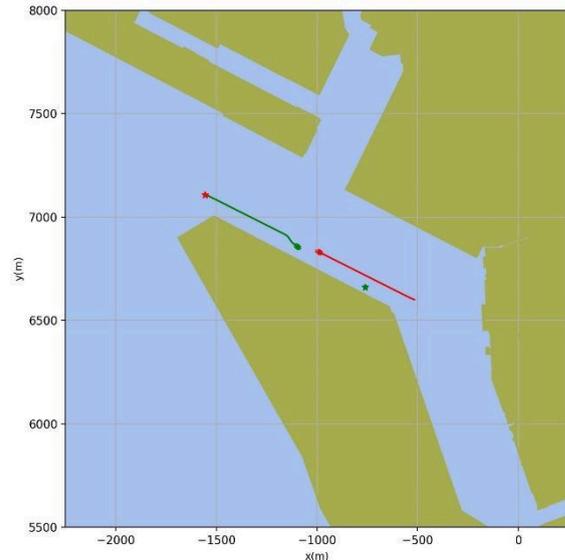


圖17 綠船避碰第二艘虛設船(112.6秒)

綠船航行36.2秒後，綠船的CPA入侵到端點圓形障礙物的防碰圈內部，因此系統判定綠船會與圓形障礙物會發生碰撞，藉由系統的避碰機制立即計算出防碰點提供給綠船，如圖18為避碰端點圓形障礙物示意圖。

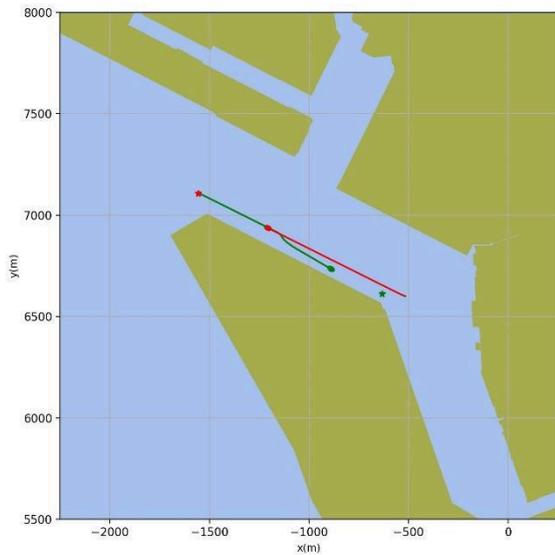


圖18 綠船避碰圓形障礙物(148.8秒)

最中圖19為該情境模擬結束示意圖，圖中可顯示出綠船搭配本文所開發的虛設船設計，成功避碰紅船及岸邊，並且符合國際海上避碰規則的規定。

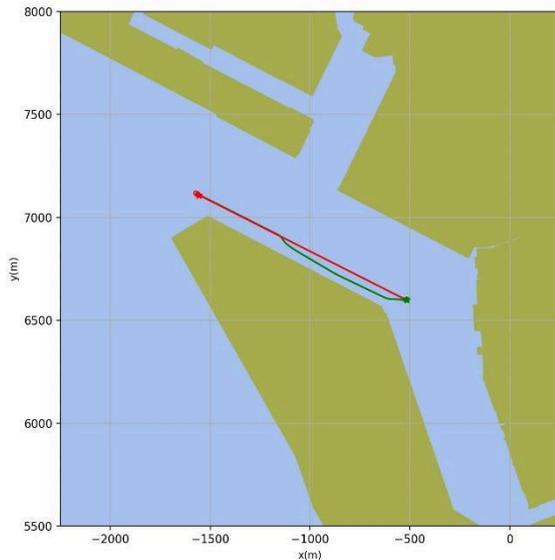


圖19 情境模擬結束時刻圖(225.6秒)

結論與未來工作

經過岸邊虛設船及港內迎船相遇情境測試後，得到以下幾點結論：

- 1) 每個情境開始前，都會先設計一系列的航點提供給自主船，系統根據航點座標引導船舶進港，航行過程中如發現航點位於船舶的其中一邊時，此時自主船開始轉向的過程中也會不斷地判斷是否有虛設船入侵至本船的安全圈內。經過

- 2) 岸邊避碰測試可以發現自主船轉向至航點時，不會發生直接開上岸邊，並且有執行避碰的動作，由此可證明出本文所提出的虛設船設計可以安全地避碰岸邊，並且引導自主船遠離岸邊。
- 2) 經過港內迎船相遇的測試結果可以發現，自主船在避碰一般船舶時，不但能滿足國際海上避碰規則從船艏右舷進行避碰，同時還能避碰右舷的岸邊障礙物，考驗自主避碰系統在有限的空間中不斷地計算出避碰點，由此可進一步驗證使用虛設船取代岸邊障礙物的可行性。

延續上述結論，未來將進行以下工作：

- 1) 虛設船的數量多寡最直接影響的就是自主避碰系統的計算量，如在點與點(邊界)之間存放過多的虛設船，在避碰過程中就會不斷地更新防碰點，這將會帶給自主船頻繁操舵的問題，因此未來必須設計最佳化算法，避免上述所提出的問題發生。
- 2) 現階段所設計的情境都屬於較簡單的避碰情境，未來可以設計更多複雜的情境，例如多船或是更緊急的情境，藉此挑戰目前自主避碰系統的能力。

參考文獻

1. Zhang, X., Wang, C., Liu, Y., & Chen, X. (2019). Decision-Making for the Autonomous Navigation of Maritime Autonomous Surface Ships Based on Scene Division and Deep Reinforcement Learning. *Sensors (Basel)*, 19(18).
2. Zhang, X., Wang, C., Jiang, L., An, L., & Yang, R. (2021). Collision-avoidance navigation systems for Maritime Autonomous Surface Ships: A state of the art survey. *Ocean Engineering*, 235.
3. Zhao-Lin, W. (1984). Quantification of Action to Avoid Collision. *Journal of Navigation*, 37(3), 420-430.
4. 羅逢源, 吳東明, 蘇東濤, Luo, F.-y., Wu, T.-m., & Su, D.-t. (2007). 多目標船舶碰撞資訊的演算解析法. *技術學刊*, 22卷(3期), 頁243-252.
5. 林傳富. (2021). 油輪與貨櫃船之自動操船系統模擬測試 [國立臺灣海洋大學]. 臺灣博碩士論文知識加值系統. 基隆市.
6. 翁維珠, 廖士盛, 林傳富, 王富元, Weng, W. C., Liao, S. S., Lin, C. F., & Wang, F. Y. (2022). 橢圓形船舶領域之多自主船避碰模擬測試. *中國造船暨輪機工程學刊*, 41卷(2期), 頁53-62.
7. 廖士盛. (2023). 可避碰群聚船之新自主避碰系統 [國立臺灣海洋大學]. 臺灣博碩士論文知識加值系統. 基隆市.
8. 羅逢源, 吳東明, 蘇東濤, Luo, F.-y., Wu, T.-m., & Su, D.-t. (2007). 多目標船舶碰撞資訊的演算解析法. *技術學刊*, 22卷(3期), 頁243-252.
9. 歐洲海事安全局(European Maritime Safety Agency, EMSA)對於海上傷亡及事故發生地點統計, https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2022/11/EMSA-Annual-Overview-of-Marine-Casualties-and-Incidents-2022-2022_11.pdf (瀏覽日期: 2023年12月13日)

Research on Collision Avoidance in Restricted Waters

Tzu-Jie Gao^{*1} *Wei-Chu Weng*^{*} *Hao-Shan Li*^{**} *Chuan-Fu Lin*^{**}

^{*}Department of Systems Engineering and Naval Architecture, National Taiwan Ocean University

^{**}Ship and Ocean Industries R&D Center

Keywords: Collision Avoidance, Restricted Waters, Emergency Collision Avoidance, Autonomous Ship

ABSTRACT

This paper presents a collision avoidance system designed for autonomous vessels navigating in restricted waters, equipped with capabilities to avoid collisions with other vessels as well as with shorelines. When autonomous vessels enter ports or prepare to navigate through waterways, they encounter navigational challenges due to the constraints of restricted waters. Ensuring safe passage involves not only avoiding other vessels but also navigating safely along shorelines. The motivation of this study stems from the necessity to enable autonomous vessels to simultaneously navigate safely amidst vessel traffic and along coastlines. While humans can rely on electronic or paper nautical charts along with real-time vessel positioning to make navigational decisions, the same task poses a challenge for computers. Therefore, building upon the autonomous collision avoidance system developed in Master's thesis by Liao, Shih-Sheng, this paper introduces additional functionalities for shoreline collision avoidance to enhance navigational safety. As vessels approach shorelines, ensuring their safety necessitates understanding the vessel's relative position to the shoreline boundary and conducting real-time collision risk assessments. If the autonomous collision avoidance system determines an imminent collision between the vessel and the shoreline, it promptly provides a collision avoidance point along the shoreline to prevent the collision. To validate the system's functionality, this paper designs various scenario tests to evaluate the collision avoidance capabilities of vessels in restricted waters, utilizing vessel motion simulation software in conjunction with the autonomous collision avoidance system developed in this study.