

應用 Fuzzy Floyd-Warshall 於近海水域一對多遇險對象最短搜救路徑之研究

A Study on Applying the Fuzzy Floyd-Warshall to Solve the Shortest Rescue Route for One Ship to Victims of a Marine Accident in Coastal Waters

劉中平 Chung-Ping Liu¹

陳冠吟 Guan-Yin Chen²

韓道昂 Dao-Ang Han³

摘要

基於遇險搜救黃金時期的立場上，構建 Fuzzy Floyd-Warshall 最短路徑模式，來找尋最佳搜救遇險者之最短路徑與方案。經模擬案例測試後，可藉以分析該搜救單位的海上救護資源是否充裕，並能探討該次海上遇險事故之最低派遣搜救艘數、搜救船舶是否該汰舊換新等資訊。最後建議於未來後續研究者可於船舶報告系統中融合該資訊功能，以增海上搜救之效能。

關鍵詞：最短路徑、搜救者、遇險者、近海水域。

Abstract

On the basis of the prime time for searching and rescuing from marine accidents, the Fuzzy Floyd-Warshall model of the shortest route was constructed to find the best answer for the shortest route and scheme while rescuing personnel in distress. By testing in the simulate case, it is analyzed if the aid resources of rescue authorities are enough. Furthermore, the least number of assigned rescue ships just for that marine accident and if rescue ships should be replaced are discussed in the meanwhile. It is suggested that the foregoing information should be integrated into the Ship Reporting System in the further research, in order to enhance the efficiency of searching and rescuing at sea.

Keywords: shortest-path, searcher, victims, coastal waters.

壹、前言

¹ 國立台灣海洋大學航運管理研究所博士；長榮大學航運管理學系暨育達商業技術學院行銷與流通管理系兼任助理教授(連絡地址：基隆郵政 7-286 號信箱，電話：0933143110，E-mail：; ntouimt@ms78.url.com.tw)。

² 國立台灣海洋大學海洋資源管理研究所碩士生。

³ 行政院海岸巡防署北部地區巡防局基隆機動查緝隊辦事員。

海上搜索與救助作業的成功，決定於搜救協調中心或附屬救難中心是否能收到所有可得與可利用的資訊，據此徹底評估狀況，以決定最好的搜救行動方針，並徵召或派遣可立即使用之搜救設施與資源，以便在最短時間內找到遇險標的，並對遇險人員與財貨施以救援。在此連貫的搜救程序中，任何一項環節的疏失及延誤，都可能導致寶貴人命的喪失，而使整個搜救作業邁向失敗。

根據陳彥宏^[1]於2000年時對有關學者們於此搜救議題的研究^[2-7]與訪談調查報告^{4,5}進行研討後，述及海運界對我國搜救系統的最主要抱怨在於整個搜救程序（從通報、計劃、搜索、救助到救援後的後續處理）的效率不佳。搜救程序的進行與搜救資訊的流通處理上，可說是同步並行、息息相關。搜救系統之研發宗旨即在於利用電腦輔助支援搜救資訊之管理、搜救資源之佈署、搜救決策與搜救作業之協調進行，使搜救相關資訊的蒐集、傳遞與運用迅速而確實，並使有限的搜救資源發揮最大效益，提昇整體搜救效率。

此外，國內歷年從事相關海事安全研究方面，大多均有粗略的涉及海上搜索與救助之議題，然其研究領域多著重於國內海上搜索與救助組織架構之比較分析與探討。學者陳彥宏^[8]認為我國對於如何以有限資源滿足現實之需求方面的研究，除了交通部運輸研究所委託國立台灣海洋大學之「台灣海域海上搜索與救助現況調查與模擬分析之研究」^[4]及國科會之「電腦輔助海上搜索與救助」^[9]等少數的研究計畫，以及學者陳坤宗^[10]探討有關國內搜救作業與訓練規劃之議題外，鮮少見到相關且深入之研究論著。

本研究之進行，旨在建立最佳海上搜救路徑的決策資訊系統，建立具體之最短搜救路徑及搜救任務作業模式。用以輔佐搜救人員研擬搜救計畫及掌握搜救現況。提供搜救決策人員，海上遇險之具體處理模式，以及實際現場救援人員航行資訊之參考，為海上航行安全，更增加一份保障。

貳、文獻回顧

在維護商港管轄水域之海事安全過程裡，不是僅靠提昇海員精湛的操船技能與應急能力、救護單位有效的海上搜救行動、相關單位或成員遵守相關國際公約及政府法令的強制性規範，還須隨時掌握船舶航行水域的安全資訊，並確實地調查分析各類海事事故，藉以獲取累積每次事件教訓的經驗，才能更有效的降低海事事故之發生。為此，本研究之探討範疇將著重於有關海上搜索與救助之水域最短搜救路徑議題。

對遇險者進行合適地搜救方式是非常重要的，稍有不當的抉擇將延誤搜救行動

⁴ 1996年台灣海域搜救研討會大會手冊及大會決議，1996。

⁵ 1997年台灣海域搜救研討會大會手冊及大會決議，1997。

的進行，甚而造成更大的生命或財貨的損失。故於燃眉之際，無法耗費太多時間去考慮所有相關因素之後才決定搜救方案與出動救援，因此若有一簡略快速模式來提供搜救者之最短或較佳搜救路徑，將有助於搜救效率及提升遇險對象之生存機會，亦可提昇搜救成功的機會。

2.1 國內外於海上搜索與救助之相關研究

海上遇險所造成的傷亡，常令人怵目驚心，人們長久以來集思克服它的發生，至今卻尚未有一定論。然因 1912 年 04 月 15 日發生鐵達尼號郵輪的重大傷亡海事事故後，更加喚起國際間對海事安全的重視，促使聯合國在 1915 年召開國際人命安全會議，通過海上人命安全救助公約(International Convention for Safety of Life at Sea, SOLAS)，而開啓國際海上救助相關規範之濫觴。聯合國又於 1948 年成立政府間海事協議組織(International Maritime Consultative Organization, IMCO)，後於 1983 年更名為現今的 IMO，並積極修訂 SOLAS 公約、國際海上搜索救助公約(International Convention on Maritime Search and Rescue, SAR)，且於 1996 年與國際民航組織共同草擬國際民航與海上搜救手冊(International Aeronautical and Maritime Search and Rescue Manual, IAMSAR Manual)，1997 年便由 IMO 正式刊行，藉以強化國際間的海上搜救體系與成效。

然本研究所探討的水域範圍因海峽兩岸特殊的關係，使得兩岸的搜救體制上，台灣以民間搜救單位來接觸中國官方搜救機構，並常透過兩方之民間交流團體海協會與海基會協調雙方搜救模式之往返時效性不佳，加上於 2002 年 05 月 02 日賴比瑞亞級的 25 萬噸油輪 FRCNTOBBAGO 號在日本外海發生機械故障，經英國船東僱請拖船托航請求停靠高雄港而遭台灣驅離，最後由大陸派出拖船拖回搶修的過程中，更反映出我國搜救能力無法匹敵中國下，致使許多小型的海上漁船發生海事事故在等待救援時，因而延遲救護的黃金時期，並引發許多海上無可挽回的悲劇。

爲此，研究該領域之各國相關海事安全專家學者們，無不努力探究改善海上遇險搜救模式與健全國內的海上搜救機制，以降低海事事故的遇險傷害，並冀希提升海上搜救的成效，辛勤鑽研所完成的重要成果，將分述於後之海上遇險搜救模式與海上搜救機制等兩大議題內。

2.1.1 海上遇險搜救模式

船舶在海上航行，易受船員、船舶及環境條件的影響下，可能會遇到海上遇險事故，或稱海事事故。對遇險船舶的救助，乃世界各國海上安全主管機關與所屬船舶的一項重要職責。然遇險船舶的遇險性質、船機設施因素、水域環境特徵、船上載貨情形及遇險船舶所發送的救助請求條件，會影響每個救助機構與施救船

船對遇險船舶的搜救方式，所以海事安全專家學者便嘗試研擬有效的搜救模式。

因此學者陳彥宏等^[4]與陳彥宏^[9]基於海上人命安全、海洋環境保護的考量下，為期善用當前所有可執行海上救護的有限資源，解決現行搜救組織的困境，利用 C++ 程式語言在電子海圖顯示與資訊系統(Electronic Chart Display and Information System, ECDIS)上建立電腦輔助海上搜救計畫模擬子模組，以調派最適搜索救助資材或船舶進行搜救任務。接著，陳彥宏等^[11]、陳彥宏^[12]也以 C++ 程式語言設計船舶海上遇險救援模擬平台，透過 NMEA 資料格式，連接全球定位系統，並以 DDE 動態聯結方式結合 ECDIS，來輔助搜救人員研擬搜救計畫及掌握搜救路徑現況。

劉士元^[13]引用地理資訊系統之概念，使用 GRASS 軟體(Geographic Resources Analysis Support System; GRASS)開發一本土性海上事故搜索救助系統，藉由電腦快速運算與精確功能，於數值海圖上顯示遇難船舶最可能出事區域與搜索模式，提供搜救人員決策支援輔助，以提高從事海上活動之人員生命財產的安全與保障。

Ross and Dawson^[14]介紹許多遇險船的漂流對搜救行動之影響因素，整理歸結出可增進海上搜救效率的主要方法有三：減少搜尋時間、精進救援技術、整合系統運作。因此，後續研究此領域的學者詹景裕等^[15]便以其為基礎，並假設遇險船漂流方向與平均船速資料固定已知下，利用 Jan *et al.*^[16]所創立的船舶最短路徑演算法予以適度改良成多組搜救模式，外加時間差的觀念，發展出所有搜救船至所有遇險船之最短路徑模式，該模式可獲得所有遇險船之總尋獲時間最短、所有遇險船之最後尋獲時間最短，以增加救援任務的時效，對於改善我國航安的諸類基礎性議題上，其重要性是不容否置的，亦也加深本文研議此主題的動機。

由於海上救助的對象是人命與財產（船舶、貨物），參與救助的船舶應對遇險形式、須提供的救助方式、當時的海況氣象條件等進行綜合考量，但基於人命救助與財產救助的實務考量上差異頗大，學者朱玉柱等^[17]因而利用模糊評估數學方法，在人命救助模糊評選救助船模式上，考量抵達遇險船所需時間、救助船噸位、救助船種類、船醫、救助船乾舷高度、救助船船速、救助船目的港等因素；另於財產救助模糊評選救助船模式上，則假設遇險船無即刻性危險、人命財產皆有一定保障的前提下，考量救助船種類、救助船至遇險船的時間、救助船噸位、救助船國籍與其主管單位、救助船的通信設備狀況、救助船船員數量、救助船是否需要繞航、救助船有無救助器材。這兩個模糊評選模式，經實證後確實可為海事主管機關在協調行動上有所助益，並有助於我國海事安全基礎性的研究。

此外，詹景裕等^[18]也依據 Jan *et al.*^[16]所創立的船舶最短路徑演算法為基礎，將目標船之漂流方向與速度設為已知，及融入詹景裕等^[15]的時間差觀念，制定出前置量搜尋法則，套用於電子海圖上之搜救與攔截系統內，於 WIN 98 視窗平台模

擬下，任務船可成功的將目標船與已施救或攔截。

2.1.2 海上搜救機制

對於處理海事事故之機制上，學者祁敏^[19]認為一般可分成三個層次，那就是首重預防，次而乃對海事事故的救助，最後為事件的善後與檢討。

郭福村^[20]蒐集我國所有國際商港搜救責任區內 1982 年至 1991 年的海事事故資料，自行認定刪除次要與不重要的海事案件後共 1335 件資料來進行案例統計，以分析我國海難搜救缺失所在，並提出設置海上安全專責機構、建立我國船位報告系統，及建請儘速成立區域性的救難站機制，據以配置適恰的搜救船隊與機隊。但其又發現海事事故報告中幾乎無記載事故發生當時的風向、風速、能見度、流速、流向，還些許報告對死亡、失蹤人數未有明確交代，故而建議我國對海難類別定義要有明確的劃分，以使未來學者研究海事安全結果上與實際情形更趨相符。

陳瑞豐^[21]收集 1981 年至 1993 年台灣搜救責任區水域之港外海事事故資料共 1094 筆，透過 C 語言程式，開發了一套海上搜救站選擇模式，此模式可計算出搜救責任區內各港口與事故點的最短路徑長度，然後經由距離的評比而挑出在可設置搜救站的港口中績效表現較佳的港口組合，最後並可依據選定的港口來劃分出屬於各搜救站之公平合理的責任區範圍。惟該模式中並未考慮海事事故的遇險類型，也未考慮遇難時的風、流環境情況，在假設所有事故視為同性質情況，雖能獲得尚可為人接受的試驗結果，但因此建議後續研究此議題上，各港務局應先對海事事故應有一套統計規則，以使該模式求算出的搜救資源部署，對海上搜救工作能有最佳的助益。

廖中山^[22]主張海難救撈是屬於商業行為，乃因對遇難船舶及其所載貨物的施救或打撈的措施，應先與船方協議或簽訂契約後所採取的行動。反觀，傅廷中^[23,24]則認為海難救助過程是一種法律行為，可分成僱傭救助、合約救助及強制救助等三類，該法律行為必須具有救助標的之存在，且人、船、貨正處於海上危險中，方可構成海上救助的基本要件，該篇文中並未探討如何進行海上搜救的相關事宜。所以，Wang *et al.*^[25]以海上施救者的立場，提出救援船舶對海上遇險船舶、救生艇、海面上之漂流人員及其他遇險者，提出一套快捷、有效、安全的施救方法。Chen^[26]則是透過遇險者的角度，去分析海上求生者的決策行為，而初步歸納構建出海上求生決策系統模型的雛型。

銀柳生^[27,28]則認為海難救助對象可分為對人與對物之救助，並主張只有對船舶或船舶上之財產救助，方能取得救助報酬請求權，即所謂的救助契約，他亦認為這是屬於商業行為的範疇，因此該文中建議海峽兩岸三地的救助力量，應對彼此相連水域的海上搜救資源簽立共享協定，以使其均可自由從事此種商業救助活

動，而遇險船舶可直接向兩岸三地任一方的救助單位請求救助，並提議台灣交通航港機關要求所有本國籍船舶安裝船舶報告系統，以增加遇險獲救的機會。

另外，Lee^[29]則從中國大陸搜救體制上去分析，認為該國海上專業搜救力量不足，必須培養訓練專業搜救人才、添購新式專業搜救的船機設施與配備，才能擴充完備搜救站據點，還有建立海空聯合救助體制，才能使東亞沿海的海事搜救行動更有成效。

然台灣政府五十餘年來因政治因素，導致搜救體制未能配合國際搜救公約之相關規定進行整合，形成目前台灣沒有專責的海上安全機構，多數救援行動上仍舊倚重軍方單位，所以台灣學者葉世燦^[30]提議在海事院校與職校教育上應編撰有關海事安全的書籍，並將此納入專業必修課程中；祁敏^[19]則提倡引進民間力量參與救難事業的投資與發展、研擬修訂海軍之海上救助契約、提升有關救助法源的位階、加強事故統計分析；洪添英^[31,32]便藉由探討國際相關規範及先進國家之搜救體制及經驗，來分析當前台灣海上救援體制的問題，發現我國無法應付大型海上災難事故的緣由，與學者葉世燦^[30]、銀柳生^[33]、郭壁奎等^[34]、祁敏^[19]等研究論述我國強化搜救工作方向大致相同，乃是救難機構組織體系與編制不夠嚴謹、搜救資源未能有效整合、搜救作業流程不當、搜救人員經驗不足、總體救護裝備的質與量仍有不足所致，因而提出成立專責搜救體系、相關法令修定、加強兩岸海難救助合作機制與資源整合並達共享的建議。

2.2 應用最短路徑於提昇作業效率之相關文獻

最短路徑（Shortest-path）問題的研究，最早是由軍事戰略所發跡，主要是在戰略物資的運送與戰術攔截的運用。而後，這些理論逐漸轉移至民間商業的物資配送問題，藉以降低企業的營運成本。一般來說，最短路徑問題的研究，大多將問題點予以節點化，以簡化問題的複雜度，易於使用電腦程式來進行快速搜尋。

找出所有點中，任意兩點間的最短距離，此演算法的典型代表為Floyd-Warshall。其方法是使用標註修正法（Label Correcting），例如：在一對一最短路徑範例中，只是將每一次所找到的最短路徑設成暫時標註（Temporary Label），而無每一回合贏者的狀態就會被標註為永久，反而是在最後終點被找到，才將整個暫時標註改設為正式的永久標註。

現實世界的路徑問題，大多為多對多的網路，因此，Floyd-Warshall 被廣泛地應用於各種最短繞路途程之研究。奧地利維也納大學（University of Vienna），Ferscha *et al.*^[35]則利用 Floyd-Warshall 的最短路徑演算法，解決在平行工作站所常發生的不平均工作單元的流程，使平行工作站上的在製品流程繞過瓶頸站，加速加工流程的順暢。

美國明尼蘇達州立大學 (University of Minnesota), Anshul *et al.* [36]也運用 Floyd-Warshall 來解決平行電腦作業系統資料處理途程的順序決定, 使用平行作業可使時間縮短, 工作效率提昇。另外, 其他研究如 Gill *et al.* [37]以及 Crawford *et al.* [38]等學者, 應用此概念於電腦網路資訊多重播送途程 (Multicast Routing) 最適化的問題, 也有顯著不錯的成效。

國內學者陳德政 [39]則運用 Floyd-Warshall 的最短路徑演算法, 對 50 節點路網與台中路網進行數值實驗, 針對 2 種實驗路網設定不同的情境及透過不同的需求點個數與即時資訊提供的頻率作為設計因子, 以設計不同因子條件下之實驗, 比較在不同情況下, 物流配送即時資訊所帶來的路線效益, 發現可縮短運具旅行時間與節省運輸成本。

此外, 將最短路徑應用於救援議題方面, Okada and Soper [40]則發展一套演算法, 用來解決路網中路段模糊長度之最短路徑問題。其演算法可以將所指定之特定點至其他點之路線全部導出, 再依據模糊數之間的順序 (大小) 關係來找尋最合適之路線。但在大規模路網中, 所求解之路線將會過多, 而使得決策者無法從中挑選最合適之路線。有鑑於此, 該文獻再將演算法所導出之路線做某一程度之挑選, 藉由挑選機制, 將可控制求解路線之數量, 亦可考慮將所獲得之路線, 依據路線之共享路段作一分類區隔, 如此將會幫助決策者挑選最合適之路線。

賴冠宏 [41]探討如何於具有走道及出入口的多部門廠房空間, 有效地安排消防裝置及增加消防設備使用的效能, 便於火災發生時, 能將人員傷亡及財產損失降到最低。其結合類神經網路模型中的自我組織映射, 及圖學演算法中的最短路徑的概念, 來建議人員逃生的最適模式, 以及消防設備配置的最佳位置, 並使用 Floyd-Warshall Algorithm 求解人員避難逃生的路徑, 最後以人員傷亡、及財物損失為評估函數, 探討自我組織映射學習的結果。

賴宇軒 [42]則認為大規模災害發生時, 如何使救援人員及救災物資於第一時間到達災區, 以降低災情衝擊, 實為一重要課題。因此, 模擬透過 50 節點與 85 條節線之假設路網, 建立一個不確定環境下之多目標救災路徑與交通管制整合模式, 求解 Floyd-Warshall 最短之救災路徑, 並提出最適當因應救災環境即時之救災路徑與交通管制之應變計畫。

歸結上述文獻得知 Floyd-Warshall 為一簡便有效求解最短路徑的演算法, 可以應用的範疇很多, 但應用於海上搜救的議題卻無人嘗試研議, 故本文基於最短路徑的概念就是「節省時間資源」, 除了可使作業流程更加有效率, 也可使救援者之縮短搜救時間, 以增加遇險者之生存機會, 遂而首次轉換套用於海上遇險搜救的觀點視之, 如何在救援黃金時間內, 使遇險人員、財貨與船舶能快速安全地離開遇險水域地帶, 為整體救災是否順利的重要因子。所以, 有效率的救援路徑設計

在海事事故搜救領域裡，實為重要而不容輕忽的水域安全性課題之一，而於後將以該最短路徑演算法求解最佳搜救方式。

叁、最短搜救路徑模式之構建

無論在陸地或海上搜救過程中，皆講求救援的時效與技巧，因此本文乃著眼於掌握海上搜救時效快速之議題，進行進海水域內一艘搜救船舶對多個遇險標的最短路徑問題，以便快速評估是否加派船隊搜救，或未來儘速增加搜救船舶船速或改善其他功能之目的，以提昇人、船、貨的安全獲救機率。

因本研究中所涉及的最短路徑問題是一對多型態，故採用演算簡易且不受有重複解影響之 Floyd-Warshall 最短路徑演算法 (Floyd-Warshall Shortest Path Algorithm) 來解決此階段的問題。因遇險標的在等候救援到來前，易受海況與氣候之影響，而與實際遇險點產生位移飄移問題，可透過中央氣象局所發布的風速及海流資訊，來推估遇險標的於搜救船舶抵達時之可能位置，恰好具有模糊數學的特性，故本文將以三角模糊數學演算法來解算 Floyd-Warshall 之距離矩陣數值的變化與否，也就是將距離成本轉換成 Fuzzy 距離成本，用以表示搜救目標會於海上實際飄移的特性，乃為本文的其一創新，其以用最簡易又較符合實務作業的模式，來迅速提供搜救者提增獲取成功海上救護的機會。

3.1 Floyd-Warshall 最短路徑演算法

Floyd-Warshall 最短路徑演算法是解決任意兩點間的最短路徑的一種演算法，可以正確處理有向圖 (Directed Graph) 或負數的代價(Negative-cost)的最短路徑問題。

該法是討論 n 個節點的路網模型，使用 $n \times n$ 矩陣表示每兩點間的距離，其中設橫列 $i = 1, 2, \dots, n$ ；直行 $j = 1, 2, \dots, n$ ；繞點 $k = 1, 2, \dots, n$ ； $k \neq i, j$ ，並以 d_{ij} 表示節點 i 到節點 j 的距離。其最短路徑的運作方式，主要是依據距離矩陣⁶ (D_k) 的變化，來調整節點順序矩陣⁷ (S_k)，直至 D_n 所有距離值最小為止。將其演算法概念簡述如下：

- (1) 定義起始距離矩陣的概念，調整距離矩陣 D_{k-1} 及順序矩陣 S_{k-1} ，產生新的矩陣 D_k 及順序矩陣 S_k 。

⁶ 起始之距離矩陣 (D_0)：記錄點與點間直接連線的距離，每一回合加入一個新的點 k ，任意兩點 i, j 間存在有已知的路徑，但如果繞道 k ，使得點 i 與點 j 的路徑比原有已知路徑距離來得較短，則修正點 i 點 j 路徑為繞道 k 。

⁷ 順序矩陣 (S_k)：乃記錄點 i 到點 j 間所經路徑到達 j 的前一個節點，起始時，若 i, j 有直接的連接，則路徑矩陣記錄的節點是 j 。

(2) 距離矩陣 D_k 的產生

對於任意兩點 i 及 j ，如果 i, j 在距離矩陣 D_{k-1} 中的距離總和大於繞道 k 的距離，即 $d_{ik} + d_{kj} < d_{ij}$ ($i \neq k, j \neq k, i \neq j$)，則於 D_k 中元素 i, j 的內容為 $d_{ik} + d_{kj}$ ，否則沿用 D_{k-1} 距離矩陣中相對應的值 d_{ij} 。

(3) 節點順序矩陣 S_k 的產生

對於任意兩點 i 及 j ，如果 i, j 在距離矩陣 D_{k-1} 中的距離總和大於繞道 k 的距離，即 $d_{ik} + d_{kj} < d_{ij}$ ($i \neq k, j \neq k, i \neq j$)，則於 S_k 中元素 i, j 的內容為 k ，否則沿用 S_{k-1} 距離矩陣中相對應的值。

(4) 然後設定 $k = k + 1$ ，重複 Step k ，直到 $k = n$ (節點總數) 為止， D_k 距離矩陣最後是記錄著任兩點間的最短距離， S_k 順序矩陣則記錄任兩點間最短路徑可能經過的節點訊息。(若 $S_{ik} = k, S_{kj} = j$ ，則 S_k 矩陣已表示了點 i 與點 j 最短路徑所經的節點；否則可再透過 Floyd-Warshall 最短路徑演算法，分別計算點 i 到點 k ，及點 k 到點 j 間的最短距離)

根據前述此法之數學運算概念，便可獲知在 $n \times n$ 之距離矩陣中，記錄點與點間的原始直接連接距離 $d^{(0)}(i, j)$ ，若下圖 1 兩點間 (i 及 j) 無直接的連接，則起始距離為 $d^{(0)}(i, j) = \infty$ 。然後，每一回合多加入一個節點 k 來考量，如原來兩點間的距離 $d^{(0)}(i, j)$ ，中途因繞經 k 點所需的距離反而較小，即 $d^{(k)}(i, j) < d^{(0)}(i, j)$ ，則 i 及 j 間的距離矩陣值 $w(i, j) = d^{(k-1)}(i, j)$ ，即被此較短的距離值所取代，即 $w(i, j) = d^{(k-1)}(i, k) + d^{(k-1)}(k, j)$ ，使得 i 到 j 的最短路徑也將變成 $i \rightarrow k \rightarrow j$ ，而不再是 $i \rightarrow j$ 。將其轉成數學演算通式如下式 (1)：

$$\begin{cases} d^{(0)}(i, j) = \begin{cases} 0 & , i = j \\ w(i, j) & , i \neq j \end{cases} & i, j = 1, 2, \dots, n \\ d^{(k)}(i, j) = \min \{d^{(k-1)}(i, j), d^{(k-1)}(i, k) + d^{(k-1)}(k, j)\} & k = 1, 2, \dots, n; k \neq i, j \end{cases} \quad (1)$$

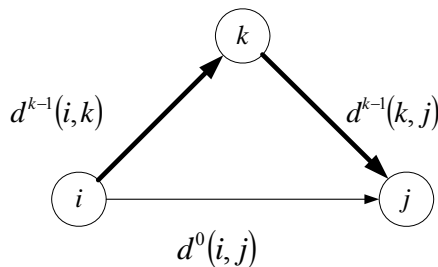


圖 1 三個節點路線與距離的關係圖

3.2 模糊 Floyd-Warshall 最短路徑演算法之構建

3.2.1 三角模糊數運算法則

設一個屬於 R 的三角形模糊數 $\tilde{A} = (c, a, b)$ ，其隸屬度函數定義如下：

$$u_A(x) = \begin{cases} (x-c)/(a-c), & c \leq x \leq a \\ (x-b)/(a-b), & a \leq x \leq b \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

上式中 $c < a < b$ ，其中參數 a 表示 $u_A(x)$ 之最大隸屬度， c 與 b 分別表示評估資料之上界與下界，在此之最大隸屬度為 1；區間 $[c, b]$ 越小，表示該筆資料的精確性越高，模糊性越低。

依據 Zadeh^[43] 的擴展原則 (Extension Principle) 以及三角模糊數的性質，假設有兩個三角形模糊數 $A1$ 與 $A2$ ， $A1 = (c1, a1, b1)$ $A2 = (c2, a2, b2)$ 其代數運算可表示如下：

1. 模糊數的加法：

$$A1 \oplus A2 = (c1 + c2, a1 + a2, b1 + b2) \quad (3)$$

2. 模糊數的減法：

$$A1 \ominus A2 = (c1 - b2, a1 - a2, b1 - c2) \quad (4)$$

3. 模糊數的乘法： $(c1 \geq 0, c2 \geq 0)$

$$A1 \otimes A2 \cong (c1 * c2, a1 * a2, b1 * b2) \quad (5)$$

4. 模糊數的除法： $(c1 \geq 0, c2 > 0)$

$$A1 \oslash A2 \cong (c1/b2, a1/a2, b1/c2) \quad (6)$$

3.2.2 模糊數之排序

當模糊運送成本運算得出後，為瞭解其大小優先順序，本文所採用陳山火與謝志勳^[44]所開發的隸屬度化平均積分值代表法之排序方法為依據，乃該法經其驗證在處於模糊、不明確的決策分析環境下相當有用。此外，於多個遇險點在海上等候

救援而位置飄移下所產生的模糊距離時，便可利用此法更加簡易求得個案之模糊最短路徑的搜救方式，亦也經由求解後可真實反映出不同遇險距離之搜救路徑。設 $f_A(x)$ 是模糊數 A 的隸屬度函數：

$$f_A(x) = \begin{cases} w \left(\frac{x-c}{a-c} \right), & c \leq x \leq a \\ w, & a \leq x \leq b \\ w \left(\frac{x-d}{b-d} \right), & b \leq x \leq d \\ 0, & otherwise. \end{cases} \quad (7)$$

另設 $L(x)$ 是模糊數的 L 函數、 $R(x)$ 是模糊數的 R 函數、 $L^{-1}(h)$ 是模糊數的 L 函數之反函數、 $R^{-1}(h)$ 是模糊數的 R 函數之反函數

$$\text{因爲： } L(x) = w \left(\frac{x-c}{a-c} \right), c \leq x \leq a, \quad R(x) = w \left(\frac{x-d}{b-d} \right), b \leq x \leq d,$$

$$\text{然後 } L^{-1}(h) = c + (a-c)h/w, \quad 0 \leq h \leq w \quad ; \quad R^{-1}(h) = d - (d-b)h/w, \quad 0 \leq h \leq w$$

$$\text{由上可推得： } \frac{L^{-1}(h) + R^{-1}(h)}{2} = \frac{c + d + (a-c-d+b)h/w}{2} \quad (8)$$

依據公式 (8) 可求解出梯形模糊數之排序值 $P(A)$ 如下 (9) 式：

$$P(A) = \int_0^w h \left(\frac{c + d + (a-c-d+b)h/w}{2} \right) dh \Big/ \int_0^w h dh = \frac{c + 2a + 2b + d}{6} \quad (9)$$

當 $b=a$ 時，則為三角形模糊數，其排序值可從 (9) 式推得如下：

$$P(A) = \frac{c + 4a + d}{6} \quad (10)$$

上列公式 (10) 式中之 A 是三角形模糊數， $P(A)$ 是 A 的代表值。

3.2.3 Fuzzy Floyd-Warshall 最短路徑模式

因爲海水並非屬於一靜止的環境，而且遇險標的會受海況與氣候之影響而產

生位置飄移的現象，加上等候搜救者的時間下，對搜救者而言，其依據 GPS、VTS、AIS 或其他方式所得之初始遇險位置，僅能較為精確地縮小搜救範圍，而在此區域內預推可能的最小與最大之搜救路徑，故而具有模糊數值的特性，遂透過搜救者出發點及遇險標的點間所得之兩點座標距離值，轉成三角形模糊數。

因此，若在不考慮遇險標的位置移動情況下，假設已知上頁圖 1 之原始距離 $d^0(i, j)=15.86$ ，將其轉換成三角形模糊數時，則可利用已知海流流速及風速作用力考量下，並透過航海學之大圈航法來估算遇險標的船體或人員距離岸際搜救艇出發點之距離，遂使圖 2 之 $\tilde{d}^0(i, j)=(13.75, 15.86, 16.79)$ ，同時亦將圖 1 之 $d^{k-1}(i, k)$ 及 $d^{k-1}(k, j)$ 分別拓展成 $\tilde{d}^{k-1}(i, k)=(3.42, 4.03, 4.79)$ 、 $\tilde{d}^{k-1}(k, j)=(7.29, 8.33, 9.11)$ ，並可將公式 (1) 改寫成公式 (10)，即 Fuzzy Floyd-Warshall 最短路徑模式。

$$\begin{cases} \tilde{d}^{(0)}(i, j) = \begin{cases} 0 & , i = j \\ \tilde{w}(i, j) & , i \neq j \end{cases} \\ \tilde{d}^{(k)}(i, j) = \min\{\tilde{d}^{(k-1)}(i, j), \tilde{d}^{(k-1)}(i, k) \oplus \tilde{d}^{(k-1)}(k, j)\} & k=1, 2, \dots, n; k \neq i, j \end{cases} \quad (11)$$

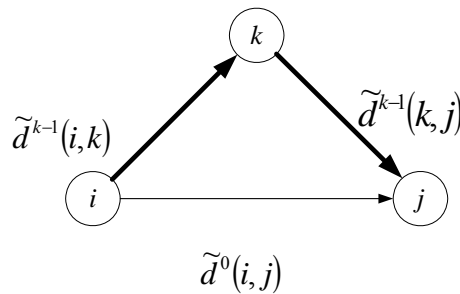


圖 2 三個節點路線與 Fuzzy 距離的關係圖

Fuzzy Floyd-Warshall 最短路徑模式之運算過程裡，乃先依據前述公式 (3) 至公式 (6) 的模糊數學運算法則，求解前述公式 (11) 之 $\tilde{d}^{(k-1)}(i, k) \oplus \tilde{d}^{(k-1)}(k, j) = (3.42, 4.03, 4.79) \oplus (7.29, 8.33, 9.11) = (10.71, 12.36, 13.9)$ ，然後再利用公式 (10) 運算得知 $P(\tilde{d}^0(i, j)) = \frac{13.75 + 4 \times 15.86 + 16.79}{6} = 15.6633$ 、 $P(\tilde{d}^{(k-1)}(i, k) \oplus \tilde{d}^{(k-1)}(k, j)) = \frac{10.71 + 4 \times 12.36 + 13.9}{6} = 12.3417$ ，則可得知：

$\tilde{d}^{(k)}(i, j) = \min\{\tilde{d}^{(k-1)}(i, j), \tilde{d}^{(k-1)}(i, k) \oplus \tilde{d}^{(k-1)}(k, j)\} = \min\{15.6633, 12.3417\} = 12.3417$ ，即表示由 i 至 j 的最短路徑將換成 $i \rightarrow k \rightarrow j$ ，而不再是 $i \rightarrow j$ 。

肆、模擬案例分析

通常發生海事事故地點離岸越近，越能快速獲得搜救單位的援助，而增加人員生還與船貨安全的機會。故本文乃以近海水域之遇險對象為情境，來模擬測試前述所構建最短搜救路徑模式之成效，乃假設某一艘船舶海上遇險，同時又有四人不幸落海的情況下，並已知搜救船舶與遇險標的間的距離、搜救船舶之平均船速為每小時 25 海浬，並考量風速、海流的變化與搜救船舶預計抵達時間影響因素下進行模擬測試之，來探討救援時最可能的最短搜救路徑，並藉以了解一艘搜救船是否足以因應海上救援工作，即意指該是否增援調派其他船舶支援。

首先，定義表 1 之節點 1 為搜救船舶位置，節點 2、4、5、6 表示落海人員的位置，節點 3 則表示遇險船舶位置，若該等遇險標的於海上事故發生時之地點方位已知下，難保其在等候搜救船舶抵達時不會發生位置飄移現象，故適合將其遇險位置縮小鎖定於某一範圍內，而具有模糊數值的特性，又因救援行動最在意的是善用搜救黃金之時效性，遂採用本文所構建之 Fuzzy Floyd-Warshall 最短路徑模式解算處理。

首先，將各遇險標的間所構成的原始距離矩陣值 D_0 ，轉換成三角模糊數之 \tilde{D}_0 ，詳如表 1 之 Step 1° 的 \tilde{D}_0 ，先透過公式 (3) 至公式 (6) 的模糊數學運算法則，將其運用於 Floyd-Warshall 最短路徑模式之計算求解過程，再反覆運算公式 (11) 之結果直至節點 6 為止，以找尋出最短搜救路徑方式，亦即最具時效性的搜救航程。

以表 1 之 Step 2° 來說，他是固定節點 2 上橫向及縱向的數值，藉以找尋是否繞經第三點的搜救路徑會較短。若已知 $\tilde{d}^1(1,3) = (15.33, 16.86, 17.14)$ ， $\tilde{d}^1(1,2) = (14.25, 14.88, 15.13)$ 、 $\tilde{d}^1(2,3) = (0.46, 0.55, 0.61)$ ，續而利用公式 (6) 運算出： $\tilde{d}^1(1,2) \oplus \tilde{d}^1(2,3) = (14.25, 14.88, 15.13) \oplus (0.46, 0.55, 0.61) = (14.71, 15.43, 15.74)$ ，然後再利用公式 (10) 計算出 $P(\tilde{d}^1(1,3)) = \frac{15.33 + 4 \times 16.86 + 17.14}{6} = 16.6517$ 、 $P(\tilde{d}^1(1,2) \oplus \tilde{d}^1(2,3)) = \frac{14.71 + 4 \times 16.86 + 17.14}{6} = 15.3617$ ，再將此兩模糊排序值作一比較後，則可得知：

$\tilde{d}^1(1,3) = \min\{\tilde{d}^1(1,3), \tilde{d}^1(1,2) \oplus \tilde{d}^1(2,3)\} = \min\{16.6517, 15.3617\} = 15.3617$ ；即表示由節點 1 至節點 3 的最短路徑將換成 1→2→3，而不再是 1→3。

根據上述運算法，將試測案例之表 1 與表 2 的結果彙整於表 3，可發現若該航港機關僅派遣單艘搜救船舶執行此次勤務，將無法完善達到「省時」與降低救援

成功的機會。另外，藉由表 3 可得知至少需要 3 艘搜救船舶，其三艘搜救船舶（假設船名為 A、B、C）之最短搜救航程方式依序為下：

- (1) 該三艘船舶一起出發先至節點 2。
- (2) A 船再從節點 2 救援完後至節點 4，然後直接返航；B、C 船再從節點 2 救援完後一起至節點 3。
- (3) B、C 船協力完成節點 3 救援工作時，B 船轉向節點 5 救援後然後直接返航，而 C 船則朝向節點 6 救援後，亦直接折返岸邊。

表 1 Fuzzy Floyd-Warshall 最短路徑解算結果歷程表

Step 1° : \tilde{D}_0 單位：海浬 S_0

	1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6												
1	0	0	0	14.25	14.88	15.13	16.33	17.86	18.14	15.92	16.07	16.18	16.89	16.94	17.05	16.22	16.38	16.47	1	1	2	3	4	5	6
2	14.25	14.88	15.13	0	0	0	0.46	0.55	0.61	0.76	0.81	0.84	0.83	0.89	0.94	0.77	0.82	0.86	2	1	2	3	4	5	6
3	16.33	17.86	18.14	0.46	0.55	0.61	0	0	0	0.24	0.31	0.36	0.16	0.22	0.27	0.19	0.25	0.32	3	1	2	3	4	5	6
4	15.92	16.07	16.18	0.76	0.81	0.84	0.24	0.31	0.36	0	0	0	0.08	0.13	0.19	0.05	0.09	0.14	4	1	2	3	4	5	6
5	16.89	16.94	17.05	0.83	0.89	0.94	0.16	0.22	0.27	0.08	0.13	0.19	0	0	0	0.03	0.05	0.08	5	1	2	3	4	5	6
6	16.22	16.38	16.47	0.77	0.82	0.86	0.19	0.25	0.32	0.05	0.09	0.14	0.03	0.05	0.08	0	0	0	6	1	2	3	4	5	6

Step 2° : \tilde{D}_1 單位：海浬 S_1

	1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6												
1	0	0	0	14.25	14.88	15.13	16.33	17.86	18.14	15.92	16.07	16.18	16.89	16.94	17.05	16.22	16.38	16.47	1	1	2	3	4	5	6
2	14.25	14.88	15.13	0	0	0	0.46	0.55	0.61	0.76	0.81	0.84	0.83	0.89	0.94	0.77	0.82	0.86	2	1	2	3	4	5	6
3	16.33	17.86	18.14	0.46	0.55	0.61	0	0	0	0.24	0.31	0.36	0.16	0.22	0.27	0.19	0.25	0.32	3	1	2	3	4	5	6
4	15.92	16.07	16.18	0.76	0.81	0.84	0.24	0.31	0.36	0	0	0	0.08	0.13	0.19	0.05	0.09	0.14	4	1	2	3	4	5	6
5	16.89	16.94	17.05	0.83	0.89	0.94	0.16	0.22	0.27	0.08	0.13	0.19	0	0	0	0.03	0.05	0.08	5	1	2	3	4	5	6
6	16.22	16.38	16.47	0.77	0.82	0.86	0.19	0.25	0.32	0.05	0.09	0.14	0.03	0.05	0.08	0	0	0	6	1	2	3	4	5	6

Step 3° : \tilde{D}_2 單位：海浬 S_2

	1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6												
1	0	0	0	14.25	14.88	15.13	14.71	15.43	15.74	15.01	15.69	15.97	15.08	15.77	15.99	15.02	15.7	15.99	1	1	2	2	2	2	2
2	14.25	14.88	15.13	0	0	0	0.46	0.55	0.61	0.76	0.81	0.84	0.83	0.89	0.94	0.77	0.82	0.86	2	1	2	3	4	5	6
3	14.71	15.43	15.74	0.46	0.55	0.61	0	0	0	0.24	0.31	0.36	0.16	0.22	0.27	0.19	0.25	0.32	3	2	2	3	4	5	6
4	15.01	15.69	15.97	0.76	0.81	0.84	0.24	0.31	0.36	0	0	0	0.08	0.13	0.19	0.05	0.09	0.14	4	2	2	3	4	5	6
5	15.08	15.77	16.07	0.83	0.89	0.94	0.16	0.22	0.27	0.08	0.13	0.19	0	0	0	0.03	0.05	0.08	5	2	2	3	4	5	6
6	15.02	15.7	15.99	0.77	0.82	0.86	0.19	0.25	0.32	0.05	0.09	0.14	0.03	0.05	0.08	0	0	0	6	2	2	3	4	5	6

Step 4° :

\tilde{D}_4

單位：海浬

S_3

	1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6												
1	0	0	0	14.25	14.88	15.13	14.71	15.43	15.74	15.01	15.69	15.97	14.87	15.65	16.01	14.9	15.68	16.06	1	2	2	2	3	3	
2	14.25	14.88	15.13	0	0	0	0.46	0.55	0.61	0.76	0.81	0.84	0.62	0.77	0.87	0.65	0.8	0.93	2	1	2	3	4	3	3
3	14.71	15.43	15.74	0.46	0.55	0.61	0	0	0	0.24	0.31	0.36	0.16	0.22	0.27	0.19	0.25	0.32	3	2	2	3	4	5	6
4	15.01	15.69	15.97	0.76	0.81	0.84	0.24	0.31	0.36	0	0	0	0.08	0.13	0.19	0.05	0.09	0.14	4	2	2	3	4	5	6
5	14.87	15.65	16.01	0.62	0.77	0.88	0.16	0.22	0.27	0.08	0.13	0.19	0	0	0	0.03	0.05	0.08	5	3	3	3	4	5	6
6	14.9	15.68	16.06	0.65	0.8	0.93	0.19	0.25	0.32	0.05	0.09	0.14	0.03	0.05	0.08	0	0	0	6	3	3	3	4	5	6

Step 5° :

\tilde{D}_4

單位：海浬

S_4

	1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6												
1	0	0	0	14.25	14.88	15.13	14.71	15.43	15.74	15.01	15.69	15.97	14.87	15.65	16.01	14.9	15.68	16.06	1	1	2	2	2	3	3
2	14.25	14.88	15.13	0	0	0	0.46	0.55	0.61	0.76	0.81	0.84	0.62	0.77	0.87	0.65	0.8	0.93	2	1	2	3	4	3	3
3	14.71	15.43	15.74	0.46	0.55	0.61	0	0	0	0.24	0.31	0.36	0.16	0.22	0.27	0.19	0.25	0.32	3	2	2	3	4	5	6
4	15.01	15.69	15.97	0.76	0.81	0.84	0.24	0.31	0.36	0	0	0	0.08	0.13	0.19	0.05	0.09	0.14	4	2	2	3	4	5	6
5	14.87	15.65	16.01	0.62	0.77	0.88	0.16	0.22	0.27	0.08	0.13	0.19	0	0	0	0.03	0.05	0.08	5	3	3	3	4	5	6
6	14.9	15.68	16.06	0.65	0.8	0.93	0.19	0.25	0.32	0.05	0.09	0.14	0.03	0.05	0.08	0	0	0	6	3	3	3	4	5	6

Step 6° :

\tilde{D}_5

單位：海浬

S_5

	1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6												
1	0	0	0	14.25	14.88	15.13	14.71	15.43	15.74	15.01	15.69	15.97	14.87	15.65	16.01	14.9	15.68	16.06	1	1	2	2	2	3	3
2	14.25	14.88	15.13	0	0	0	0.46	0.55	0.61	0.76	0.81	0.84	0.62	0.77	0.87	0.65	0.8	0.93	2	1	2	3	4	3	3
3	14.71	15.43	15.74	0.46	0.55	0.61	0	0	0	0.24	0.31	0.36	0.16	0.22	0.27	0.19	0.25	0.32	3	2	2	3	4	5	6
4	15.01	15.69	15.97	0.76	0.81	0.84	0.24	0.31	0.36	0	0	0	0.08	0.13	0.19	0.05	0.09	0.14	4	2	2	3	4	5	6
5	14.87	15.65	16.01	0.62	0.77	0.88	0.16	0.22	0.27	0.08	0.13	0.19	0	0	0	0.03	0.05	0.08	5	3	3	3	4	5	6
6	14.9	15.68	16.06	0.65	0.8	0.93	0.19	0.25	0.32	0.05	0.09	0.14	0.03	0.05	0.08	0	0	0	6	3	3	3	4	5	6

Step 7° :

\tilde{D}_6

單位：海浬

S_6

	1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6												
1	0	0	0	14.25	14.88	15.13	14.71	15.43	15.74	15.01	15.69	15.97	14.87	15.65	16.01	14.9	15.68	16.06	1	1	2	2	2	3	3
2	14.25	14.88	15.13	0	0	0	0.46	0.55	0.61	0.76	0.81	0.84	0.62	0.77	0.87	0.65	0.8	0.93	2	1	2	3	4	3	3
3	14.71	15.43	15.74	0.46	0.55	0.61	0	0	0	0.24	0.31	0.36	0.16	0.22	0.27	0.19	0.25	0.32	3	2	2	3	4	5	6
4	15.01	15.69	15.97	0.76	0.81	0.84	0.24	0.31	0.36	0	0	0	0.08	0.13	0.19	0.05	0.09	0.14	4	2	2	3	4	5	6
5	14.87	15.65	16.01	0.62	0.77	0.88	0.16	0.22	0.27	0.08	0.13	0.19	0	0	0	0.03	0.05	0.08	5	3	3	3	4	5	6
6	14.9	15.68	16.06	0.65	0.8	0.93	0.19	0.25	0.32	0.05	0.09	0.14	0.03	0.05	0.08	0	0	0	6	3	3	3	4	5	6

資料來源：本研究整理

表 2 最短路徑結果之 Fuzzy Floyd-Warshall 時間表 單位：分鐘

	1	2	3	4	5	6												
1	0	0	0	34.2	35.71	36.31	35.3	37.03	37.78	36.02	37.66	38.33	35.69	37.56	38.42	35.76	37.63	38.54
2	34.2	35.71	36.31	0	0	0	1.104	1.32	1.464	1.824	1.944	2.016	1.488	1.848	1.92	1.56	1.92	2.232
3	35.3	37.03	37.78	1.104	1.32	1.464	0	0	0	0.576	0.744	0.864	0.384	0.528	0.648	0.456	0.6	0.768
4	36.02	37.66	38.33	1.824	1.944	2.016	0.576	0.744	0.864	0	0	0	0.192	0.312	0.456	0.12	0.216	0.336
5	35.69	37.56	38.42	1.488	1.848	2.112	0.384	0.528	0.648	0.192	0.312	0.456	0	0	0	0.072	0.12	0.192
6	35.76	37.63	38.54	1.56	1.92	2.232	0.456	0.6	0.768	0.12	0.216	0.336	0.072	0.12	0.192	0	0	0

資料來源：本研究整理

表 3 Fuzzy Floyd-Warshall 最短救援路徑及時間一覽表

搜 救 路 徑	模糊排序值 (單位：分鐘)
1→2	35.56
1→2→3	36.868
1→2→4 A	37.496*
1→2→3→5 B	37.392*
1→2→3→6 C	37.472*
2→3	1.308
2→4	1.936
3→5	0.524
3→6	0.604

註：1. 「*」表示該次海上事故必須出勤之最短路徑。

2. 「A」表示該搜救路徑由 A 船執行救援勤務，依此類推「B」、「C」。

若此時港區可用之搜救船舶總數低於三艘時，便需呼叫其他設有海上搜救資源的港區援助之，就可發現支援船隊之設置點是否足以及時因應，而可利用本文所構建之 Fuzzy Floyd-Warshall 最短路徑模式，來尋找較佳的海上搜救船隊站之設置與部署方式，並且有助於規劃各港管轄水域之海上勤務範圍的界定，著實展現出本文基礎性研究的貢獻所在。

伍、結論與建議

基於海上人命安全、海洋環境保護之雙重考量下，並期能符合國際公約之相關要求，建立台灣海域完善之搜索與救助系統，應為我國政府部門相關單位所應積極處理之問題，而如何透過量化的基礎性研究，來掌握黃金搜救時期，即探討最短搜救路徑的方式，來適時增派海上搜救資源，並可了解目前該水域之搜救船隊資源是否充裕。

爲此，本文乃依據時效立場去建構 Fuzzy Floyd-Warshall 最短救援路徑模式，在經過模擬測試檢視後，除可獲得搜救點至各遇險點之最短路徑組合外，亦可得知該水域之搜救船隊資源是否充裕，還能藉此於後續研究裡，可利用更多的實例訊息，透過本模式的求算後，可歸納結果來規劃該水域之海上搜救站位置、數量及各站的海上搜救範圍。另外，若能於 VTS 與船舶報告系統中融入 Fuzzy Floyd-Warshall 最短救援路徑之資訊模組，可減少人力、時間去估算派遣搜救船舶艘數與最短路徑的問題。

最後，因初次將 Floyd-Warshall 演算法應用於此議題，並利用 Fuzzy 距離成本概念，表現搜救目標於海上浮動的真實特性，進行一對多目標的最佳搜救課題，故對未來後續研究此領域上，本文建議應開發簡易之多對多最短搜救路徑模式，並可在搜救船舶救援航程上融入障礙物的概念，甚而加入實務性遇險標的待援程度之權重觀念。以冀希善用所有可執行海上搜索與救助之有限資源，並對未來政府朝向整合資源、靈活調度上能有較佳的科學依據，例如善用保七總隊船艇、海關緝私艦船、海上航行船舶、海上搜索救助資料等資源，以彌補現行軍艦搜救兵力、物力及搜救技能專業性之不足等。

參考文獻

1. 陳彥宏，**海上遇險事故鑑定技術之初步研究**，行政院國科會專題研究計畫報告書，計畫編號：NSC-89-2211-E-019-006，民國八十九年。
2. 陳彥宏，**船舶海上交通遇險事故之調查研究**，行政院國科會專題研究計畫報告書，計畫編號：NSC-88-2211-E-019-010，民國八十八年。
3. 洪掙論，「**海難事故搜救處理與證據調查之分析研究**」，中央警察大學水上警察研究所碩士論文，民國八十九年。
4. 陳彥宏、李台生、郭璧奎，「**台灣地區海上交通安全體系之研究(三)--台灣海域海上搜索與救助現況調查與模擬分析之研究**」，交通部運輸研究所委託海洋大學航海技術系之研究計劃報告書，民國八十四年。
5. 社團法人中華搜救會，「**建立國家搜救中心之規劃研究**」，中華航空發展基金會專題研究計劃成果報告，民國八十六年。
6. 中華海運研究協會，「**海峽兩岸海上安全技術之研究**」，交通部科技顧問室委託計劃報告書，民國八十五年。
7. 中華海運研究協會，「**兩岸交流與海上安全問題之研究**」，行政院大陸委員會委託計劃報告書，民國八十三年。
8. 陳彥宏，「**台灣海難搜救體系之分析與檢討**」，**運輸計劃季刊**，第三十一卷，第三期，頁 635-662，民國九十一年。
9. 陳彥宏，**電腦輔助海上搜索與救助之研究**，行政院國科會專題研究計畫報告書，計畫編號：NSC-85-2611-E-019-022，民國八十五年。

10. 陳坤宗，「我國海上搜救作業與訓練規畫之研究」，中央警察大學水上警察研究所碩士論文，民國九十一年。
11. 陳彥宏、趙榆生、紀嘉毅，船舶海上遇險救援模擬之研究，行政院國科會專題研究計畫報告書，計畫編號：NSC-86-2211-E-019-002，民國八十六年。
12. 陳彥宏，海上搜索與救助資訊整合之實證研究，行政院國科會專題研究計畫報告書，計畫編號：NSC-87-2611-E-019-029，民國八十七年。
13. 劉士元，「海上事故搜索救助系統雛形之研究」，國立台灣海洋大學航運技術研究所碩士論文，民國八十四年。
14. Ross, M. and Dawson, R., "Drift Errors in Search and Rescue," *The Journal of Navigation*, Vol. 47(3), pp. 369-382, 1994.
15. 詹景裕、楊立豪、張啓隱，「電腦化搜救系統之最佳化」，中華民國第六屆運輸安全研討會論文集，頁 397-406，民國八十八年。
16. Jan, G. E., M. B. Lin and Y. Y. Chen, "Computerized Shortest Path Searching for Vessels," *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 5(1), pp. 95-99, 1997.
17. 朱玉柱、越德鵬、黃曉麗，「海上救助工作中救助船舶的優選原則與方法」，大連海事大學學報，第二十五卷第十期，頁 48-51，民國八十八年。
18. 詹景裕、許俊彥、張啓隱，「電子海圖上一對一搜救與攔截系統」，運輸學刊，第十二卷，第一期，頁 17-28 頁，民國八十九年。
19. 祁敏，「我國海難救助制度之研究」，國立台灣海洋大學航運管理研究所碩士論文，民國九十一年。
20. 郭福村，「我國搜救責任區內海難分析與搜救效率之研究」，國立台灣海洋大學航運技術研究所碩士論文，民國八十二年。
21. 陳瑞豐，「海上搜救站選擇模式雛型建立之研究」，國立台灣海洋大學航運技術研究所碩士論文，民國八十五年。
22. 廖中山，「對我國海上安全體系有關問題之探討」，警學叢刊，第二十六卷，第四期，頁 1-19，民國八十五年。
23. 傅廷中，「海難救助及其立法」，世界海運，第二十五卷，第一期，頁 48-49，民國九十一年。
24. 傅廷中，「海難救助行為的構成要件」，世界海運，第二十五卷，第二期，頁 49-51，民國九十一年。
25. Wang, Z., L. Lee, and S. M. Bao, "Salvage for Vessels and Survivors in Distress," *World Shipping*, Vol. 25, No. 2, pp. 16-17, 2002.
26. Chen J. H., "On the Model of Decision System for Survival at Sea," *World Shipping*, Vol. 26(1), pp. 12-13, 2002.
27. 銀柳生，「建立兩岸三地海難搜救合作之研究」，國立台灣海洋大學航運管理研究所碩士論文，民國九十二年。
28. 銀柳生，「建立兩岸三地海難搜救合作之研究」，航運季刊，第二十卷，第四期，頁 59-79，民國九十二年。
29. Lee, M., "Analysis on Capability of Salvage and Rescue at Sea in China," *World Shipping*, Vol. 26(3), pp. 15-16, 2003.

30. 葉世燦，「我國當前海上助航與搜救實質問題之研究」，**警學叢刊**，第二十六卷，第四期，頁 51-72，民國八十五年。
31. 洪添英，「**我國海上救助體制之研究**」，國立台灣海洋大學環境生物與漁業科學研究所碩士論文，民國九十二年。
32. 洪添英，「台灣海上搜救體系之探討」，**漁友**，第三百零八期，頁 28-31，民國九十二年。
33. 銀柳生，「**我國海難搜救系統成效分析**」，中華民國第三屆運輸安全研討會論文集，頁 341-351，民國八十五年。
34. 郭璧奎、楊仲箴、朱于益，「**促進兩岸海難救助合作之研究**」，中國海運研究協會委託計畫報告書，民國八十七年。
35. Ferscha, A., B. Gruber, and R. Tschopp, **Workload Model Generator**, Institut für Angewandte Informatik und Informationssysteme, University of Vienna, Version: 1.0, 1995.
36. Anshul, G. and K. Vipin, "Performance Properties of Large Scale Parallel Systems," **The 26th Hawaii International Conference on System Sciences**, 1993.
37. Gill, A., W. John, and S. Crawford, **Low-cost ATM Multicast Routing with Constrained Delays**, NEC Research Institute, 1996.
38. Crawford, J. and G. Waters, **Heuristics for ATM Multicast Routing**, NEC Research Institute, 1998.
39. 陳德政，「**即時資訊下物流配送問題之研究**」，逢甲交通工程與管理研究所碩士論文，民國九十四年。
40. Okada, S. and T. Soper (1998), "A shortest path problem on a network with fuzzy arc lengths," **Fuzzy Sets and Systems**, Vol.109, pp. 129-140, 1998.
41. 賴冠宏，「**多部門廠房最適消防裝置配置系統之研究**」，華梵大學工業管理研究所碩士論文，民國九十一年。
42. 賴宇軒，「**不確定環境下多目標救災路徑與交通管制整合模式**」，逢甲交通工程與管理研究所碩士論文，民國九十四年。
43. Zadeh, L. A., "Fuzzy sets," **Information Control**, Vol. 8, pp. 338-353, 1965.
44. 陳山火、謝志勳，「**一般化模糊數之隸屬度化平均積分值代表法**」，**模糊系統學刊**，第五卷，第二期，頁 1-7，民國八十八年。