

逼近情勢臨界點時間之回顧與分析^{*}

A Review of Critical Time for Preventing Close-Quarters Situations

蔡奇呈^{*}、張建仁^{**}、陳志立^{***}

摘要

本文係以直航船之觀點，回顧逼近情勢臨界點時間相關文獻。首先探討碰撞危機之定義，並分析其與船舶領域模型之關係；繼而，討論碰撞的四個階段，並歸納逼近情勢之定義；進而，依據經驗法則、描述性模式與規範性模式等分類分析逼近情勢臨界點模式；最後，則歸納逼近情勢臨界點時間計算模式之概念。期能作為後續研究之參考，增進航行安全。

關鍵詞：逼近情勢、碰撞危機、避碰規則。

ABSTRACT

This paper aims to review the literature of critical time for preventing close-quarters situations (CQS) based on the viewpoint of the stand-on vessels. The definition of risk of collision and its relationship with ship domains are first discussed. The four stages in a collision situation are then described. The definition of a close-quarters situation is subsequently derived from the discussion. Three types of models to determine critical distance or time, namely rules of thumb, described models and prescribed models, are reviewed and analyzed. Finally, the concept of the model for determining the critical time to prevent a CQS can be established based on these

^{*} 本文是行政院科技部專題研究計畫(NSC 100-2221-E-019-053-)之部分成果，承蒙經費補助，謹此致謝。

^{*} 蔡奇呈 Chi-Cheng Tsai，國立臺灣海洋大學系統工程暨造船學系博士班學生。

^{**} 張建仁 Jiang-Ren Chang，國立臺灣海洋大學系統工程暨造船學系教授，國立臺灣海洋大學工學博士。

^{***} 陳志立 Chih-Li Chen，國立臺灣海洋大學商船學系副教授，國立臺灣大學工學博士。

E-mail: clchen@mail.ntou.edu.tw

discussions. It is hoped that this paper may provide a foundation for future works on this topic to enhance the navigation safety.

Keywords: Close-Quarters Situation, Risk of Collision, COLREGS.

壹、緒論

船舶避碰係航行安全之主要課題。近年來，海上交通工程領域之趨勢已逐漸朝向自動避碰系統[1,2]。雖然自動避碰系統係以降低人為因素干擾、計算最佳路徑為主要目的；然而，其判斷準則是否具有一致性？則是需要深入探討的問題。

無論人為操縱或者自動避碰系統 均必須遵守 1972 年國際海上避碰規則(*Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea, 1972, COLREGS*)。其不僅作為船舶航行與避碰的指導原則；亦為碰撞事故發生後，分攤碰撞責任之參考依據[3]。自從 1972 年通過並公布，1977 年開始生效，截至目前為止，陸續經過 1981 年、1987 年、1989 年、1993 年、2001 年、2007 年以及 2013 年之修正，主要有關分道通航制(traffic separation scheme, TSS)之通行方式、號燈位置、飛翼船(wing-in-ground-effect craft, WIG craft)、遇險信號(distress signals)以及遵守公約規定之確認(verification of compliance with the provisions of the Convention)等修正與新增[4,5,6]。然而，第二章—操舵與航行規則(*Part B. Steering and Sailing Rules*)中，模稜兩可的質性描述(qualitative prescription)仍未明確定義[3,7-9]。例如：第七條—碰撞危機(*Rule 7. Risk of Collision*)中，何時開始研判駛近船舶之羅經方位無明顯改變？第八條—避碰措施(*Rule 8. Action to Avoid Collision*)及早明確以及逼近情勢(close-quarters situation)之定義為何？分離清楚的安全距離為何？此等問題，則須仰賴航行員的經驗；亦造成不確定性之發生。是否能透過方法論，建立判斷準則之參考值？即引發本研究之初始動機。

審視 COLREGS 的規定，船舶避碰概可定義為及早採取明確的避碰措施，使兩船以安全距離分離清楚。換言之，避碰即是轉向時機、轉向方式、轉向角度與安全距離的函數。及早，即是轉向時機的問題。依照兩船讓路與直航的避碰責任，在互見(in sight of one another)的情況下，碰撞過程概可分為四個時間階段[5]：自由行動(free manoeuvre)、讓路船採取行動(action required by give-way vessel)、直航船採取行動(action required by stand-on vessel)以及逼近情勢(close-quarters situation)等。讓路船在第二階段必須依據碰撞的空間情勢，如追越、迎艏正遇與交叉相遇等，採取避碰措施；然而，由於讓路船之疏忽，迫使時間進入第三階段，直航船則必須獨力採取行動避免逼近情勢之發生。此過程中，讓路船與直航船採取行動的兩個臨界點時間為何？其不僅是為人為操縱與自動避碰系統之關鍵變數，亦為海事法庭分攤避碰責任之重要關鍵準則；此即加強本文之研究動機。

本文以逼近情勢臨界點時間為探討對象；為建構計算方法論，後續章節依序蒐集、歸納與分析相關概念及其計算模式。由於碰撞危機為採取避碰措施之要件，首先於第二章探討；第三章討論碰撞之時間階段與逼近情勢之定義；第四章分析逼近情勢說明逼近情勢臨界點之量化模式；最後，則於第五章提出結論與建議。

貳、碰撞危險之定義及其量化模式

依據 COLREGS 第七條—碰撞危機(*Rule 7. Risk of Collision*)第四項第一款：如駛近船舶之羅經方位無顯著改變時，碰撞危機視為存在(*such risk shall be deemed to exist if the compass bearing of an approaching vessel does not appreciably change.*)。此外，第八條—避碰措施(*R.8 Action to Avoid Collision*)第四項(d)：採取避免與他船碰撞之措施時，應以安全距離相互通過(*Action taken to avoid collision with another vessel shall be such as to result in passing at a safe distance...*)。由此兩條款可知，判斷碰撞危機是否存在的準則有二，其一是相對方位是否明顯改變；其二是兩船是否以安全距離通過。

以相對運動分析，如圖 1 所示。其中，本船為直航船，另一則為讓路船。情境 1 即是第七條所言羅經方位無顯著改變的情況；情境 2 則是羅經方位已明顯改變，但兩船係以很小的至最近點距離(*distance to closest point of approach, DCPA*)通過。綜言之，若考慮船舶尺度、碰撞的空間情勢等因素，以安全距離作為判斷準則較能確保安全。然而，其引發兩個問題：其一，何謂安全的距離？其次，則是何時必須開始判斷？

事實上，船舶領域(*ship domain*)模型即可作為安全距離的判斷準則[10]。船舶領域，係指航行員欲與他船或障礙物保持的有效範圍(*The effective area around a ship which a navigator would like to keep free with respect to other ships and stationary objects.*)[11]。影響船舶領域的因素包括人為因素、船舶尺度、能見度、水域等[10-12]。船舶領域之代表模型包括 Fujii[13]、Goodwin[11]以及 Coldwell[14]等三人，均由模擬機實驗或者海上調查獲得資料，進而透過統計方法歸納。其中，Fujii 與 Coldwell 兩人係建構在狹窄水道，其模型為橢圓，適用於追越與迎艏正遇等空間情勢；Goodwin 則是在北海(*North Sea*)進行海上調查，另進行多佛海峽、直布羅陀海峽以及開闊水域等多種水域的模擬機實驗，其模型係依據 COLREGS 之分界，由三個區塊圍成不連續的圓形，適用於開闊水域。後續有 Zhu 等人[15]透過問卷調查蒐集數據，採用類神經網路(*neural network*)學習航行員之知識，建構以 45° 為區間的多邊形模型；Wang[16,17]則採用數學分析，建構以前後左右等四個方向為界限的領域模型；Hansen 等人[18]則利用岸上的自動辨識系統(*automatic*

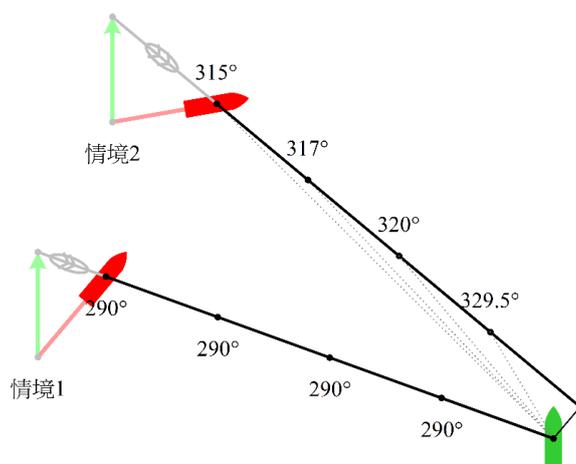


圖 1. 碰撞危機示意圖

identification system, AIS)所蒐集的資料，建構狹窄水道的領域模型，其領域邊界及形狀與 Fujii 之結果相同，均為與船長相關的橢圓形。

上述模型概可依照其建構方式分為描述性與規範性兩種。描述性係依照航行員之實際操船行為進行統計分析，建立不同水域的領域模型；規範性則是以影響船舶領域的因素，透過數學模式、演算法等，建構模型。探討開闊水域中，直航船之臨界點時間，採用確保安全的極限值，則以 Goodwin 的模型作為判斷準則較為合適。

參、碰撞之時間階段與逼近情勢之定義

當兩船在開闊水域相遇，且兩船之 DCPA 小於安全距離，即含有碰撞危機時，依據時間的緊迫性，概可分為四個時間階段[5]，包括自由行動(free manoeuvring)、讓路船行動(action required by give-way vessel)、直航船行動(action required by stand-on vessel)、逼近情勢等。站在直航船的觀點，根據兩船的空間情勢，以相對運動繪製如圖 2，並依序說明如下：

- **自由行動階段：**此階段 COLREGS 尚未開始適用；兩船應依據第五條—瞭望(R.5 Look-out)、第六條—安全速度(R.6 Safe Speed)與第七條—碰撞危機(R.7 Risk of Collision)，持續對當下環境保持警戒。
- **讓路船採取行動階段：**時間已逐漸逼近，COLREGS 開始適用，讓路船應依據 COLREGS 之第八條—避碰措施(R.8 Action to Avoid Collisions)、第十三條—追越(R.13 Overtaking)、第十五條—交叉相遇(R.15 Crossing)與第十六條—讓路船之措施

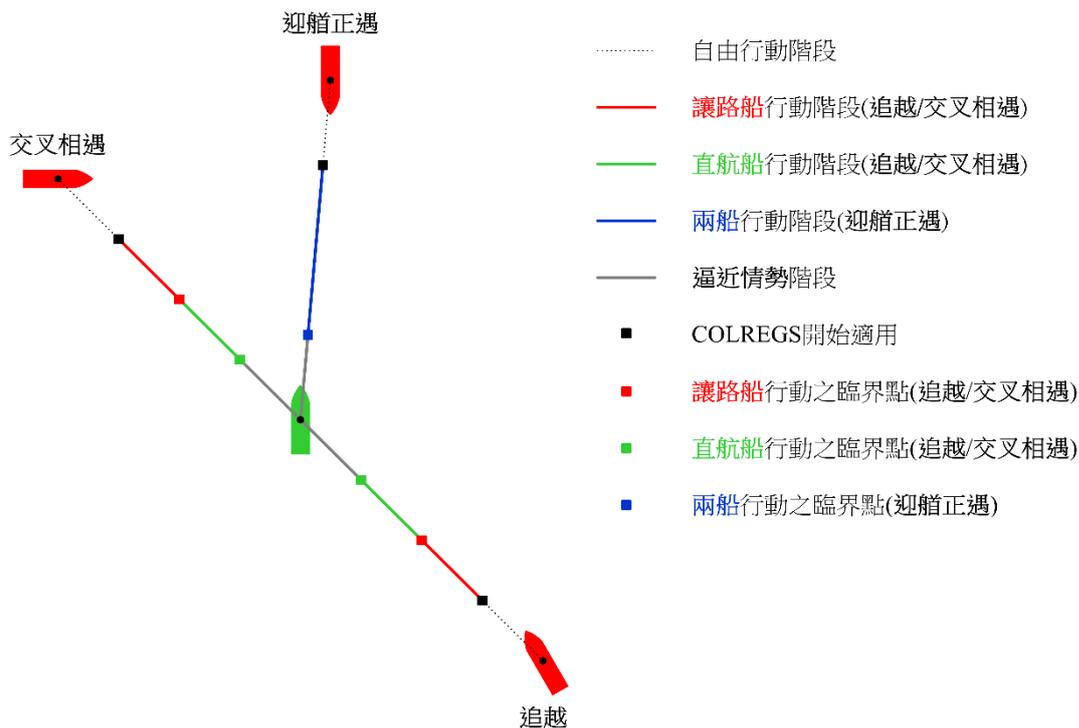


圖 2. 碰撞的四個階段

(*R.16 Action by Give-way Vessel*), 採取及早且明確的避碰措施, 切勿採取連續且微小的轉向; 直航船則應依據第十七條—直航船之措施(*R.17 Action by Stand-on Vessel*)之第一項第一款, 保持航向航速, 並持續觀察讓路船之意圖。

- **直航船採取行動階段**: 直航船在觀察一段時間後, 發現讓路船未採取避碰措施, 應依據第十七條第一項第二款, 獨力操船, 避免碰撞發生; 若兩船為交叉相遇情勢, 則另應依照第十七條第三項, 不應朝左轉向。
- **逼近情勢階段**: 一旦兩船均未採取明確的避碰措施, 則 TCPA 進入逼近情勢階段, 此時, 若僅依靠一船的大角度轉向已無法避免碰撞之發生[21]; 即第十七條第二項, 若直航船發現單靠讓路船之獨力操船不能避免碰撞發生時, 則直航船亦應採取最有效的避碰措施。

三種碰撞的空間情勢中, 由於第十四條—迎艏正遇情勢(*R.14 Head-on Situation*)規定兩船應各自朝右轉向; 亦即, 兩船無讓路與直航的關係[4]。因此, 該情勢僅有三個時間階段; 其中第二個階段為兩船均採取行動階段。此外, 四個時間階段之臨界點, 依序分別為 COLREGS 開始適用、讓路船採取行動以及直航船採取行動的臨界點。此等臨界點在避碰過程均有其重要性; 然而, 承如前述, 避碰問題係轉向時機、轉向方式、轉向角

度與安全距離之函數，根據此定義，前兩個臨界點在轉向角度尚無合理的參考值可加以計算。而後者則可以逼近情勢的概念推算之。

依據 COLREGS，在追越與交叉相遇情勢中，讓路船必須承擔讓路的責任；然而，常有情況係因讓路船之疏忽，迫使直航船必須放棄保持航向航速，獨力操船避免逼近情勢的發生[20]。有關逼近情勢，Willmer 法官[5]在 1961 年的 *Grepa/Verena* 案例曾提到：*逼近情勢的定義是充滿爭議的，但我認為其必須考量船舶尺度、特性以及航速等因素(It is open to argument what is meant by the phrase 'close-quarters situation'. That, I think, must depend upon the size, characteristics and speed of the ships concerned.)*；而 Mankababy[21]則將其定義為：*逼近情勢的發生係指單靠一船的大角度轉向，無法避開他船的情況(A close-quarters situation may arise when it becomes no longer possible for one ship, acting alone, to avoid the other ship by making a substantial alteration of course.)*。

據此，在推算直航船採取行動的臨界時間時，以 Mankababy[21]之定義，輔以相對安全為原則，則可將其定義為：在考慮船舶尺度與操縱性能的情況下，單靠一船的大角度轉向，無法確保兩船在安全距離上通過。其中，以迴轉圈運動為基礎，考量縱距最大的轉向角度，則可將大角度轉向視為 90° 。

肆、逼近情勢臨界點之量化模式

為計算逼近情勢臨界點時間之計算模式，歸納與分析相關量化模式有其必要。其概分為三類，包括：經驗法則(rules of thumb)、描述性模式(descriptive models)與規範性模式(prescriptive models)，分述如下。

4.1 經驗法則

Cockcroft 與 Lameijer[5]在其專書中建議，開闊水域而能見度受限制的情況，為了確保霧號之可及性，建議在正橫前保持約 2 海里的範圍作為逼近情勢的界線；若考量雷達的誤差，則可延伸其範圍至 3 海里。若是互見的情況，則建議為 1 海里。然而，此等經驗法則未考量其引用 Willmer 法官在判決上提及的變數，包括船舶尺度、操縱性能等。

4.2 描述性模式

描述性模式係指透過海上調查、模擬機實驗或者問卷等方式蒐集數據，進而以統計方法分析，稱之。Davis 等人[22]透過問卷調查，探討航行員首次採取行動避免逼近情勢的臨界距離，提出 arena 的概念。分為兩個部分，其一為他船由右舷駛近，本船為讓

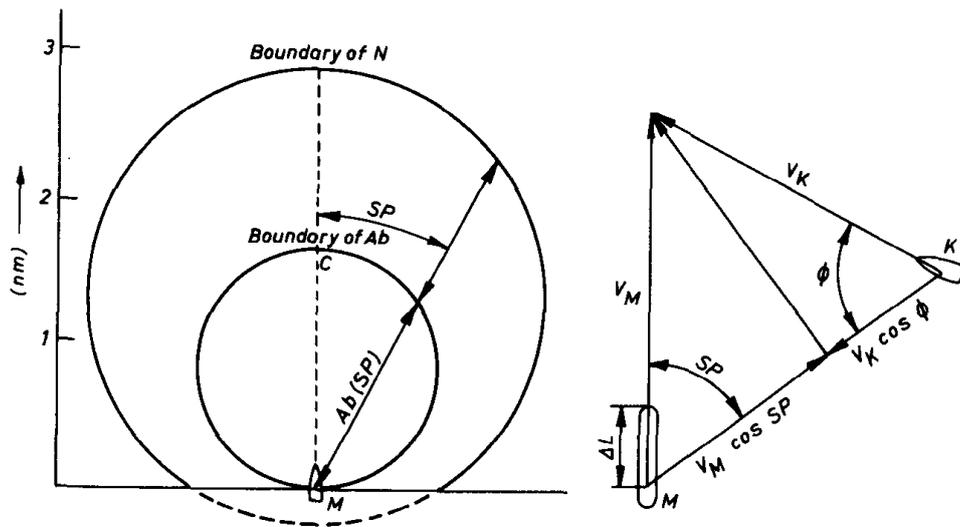


圖 3. Hilgert[27]逼近情勢臨界點模式

路船；另一則為他船由左舷駛近，本船為直航船。結果顯示，本船為讓路船時，平均距離為 4.3 海里；為直航船時則為 2.6 海里。Habberly 與 Taylor[23]以模擬機實驗，碰撞情勢係以迎艏正遇、右舷 17.5° 與 35° 輔以兩組航速差，分成 6 種實驗情境，分析採取行動的距離(when the alteration was initiated)、轉向角度(the angle of this course alteration, ACA) 以及最終的 DCPA(the eventual closest point of approach, CPA)；其結果顯示，轉向的最大距離為 9.7 海里、最小距離為 2.0 海里，平均則為 4.6 海里。隨後，Taylor[24]與 James[25] 分別採用 Habberly 與 Taylor 之數據進行分析。Taylor 係採用機率密度函數(probability density function)，建構分析模型；James 則採用對數分布模型(lognormal distribution model) 與乘冪律模型(power law model)等建構，其主要目的均在探討不確定性的臨界點。

雖然描述性模式可用以分析航行員實際作為，然而，未考慮船舶尺度與操縱性能的缺點仍未改善。

4.3 規範性模式

規範性模式則是以數學公式建構模式。Cahill[26]將逼近情勢定義為一圍繞本船周圍，而當他船採取突然且非預期的大角度轉向，無法避免碰撞發生的領域。此定義與船舶領域之概念非常相似，差別在於其納入船舶尺度與船舶操縱特性；但不能稱之為逼近情勢。Hilgert[27]曾以衝止距(crash stop)的概念，透過停俾(stopping engines)與倒俾(reversing engines)之攻勢，推算逼近情勢臨界距離，如圖 3。然而，該模式隨後被 George[28]證明，若僅有一船採取緊急避讓的措施，即停俾與倒俾，該模式將失效；亦即，該模式不符合逼近情勢之定義。

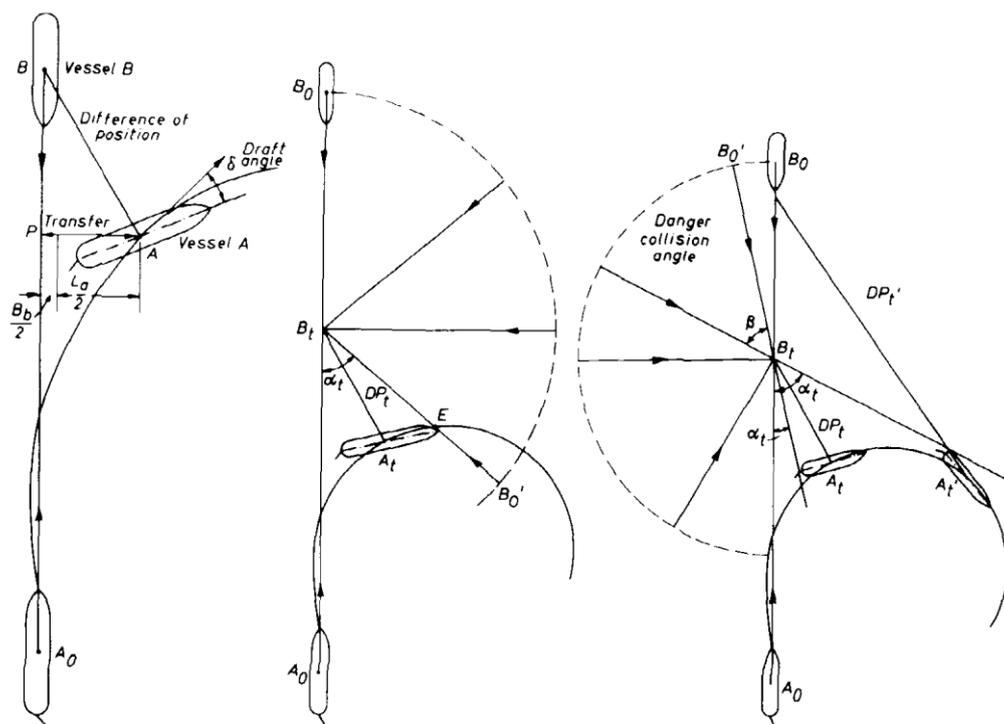


圖 4. Wu[20]最晚用舵點距離模式

Colley 等人[29]建構最後用舵安全距離(the safety distance for last-minutes action)推算公式，如下：

$$R_s = \frac{(U+V)}{60} * \frac{90}{\psi}$$

其中， U 與 V 分別代表兩船航速； ψ 代表迴轉率(rate of turn)。以相對運動而言，兩船的相對速度係與兩船的航向差有關，審視該公式發現，兩船航速之相加，即是迎艏正遇情勢，若用於追越情勢則過於保守。

Wu[20]建構另一最晚用舵距離(LMA)計算公式，如下：

$$D_{LMA} = Vt\sqrt{1+k^2-2\cos C/k}$$

其中， V 為本船航速、 t 為縱距到達預定距離的時間、 k 為速率比、 C 則為兩船的航向差。縱距到達預定距離，該距離與他船船寬與本船船長有關，如圖 4。然而，該計算公式係假設兩船處於完全碰撞航向，且最後通過之距離恰為 0；其適用性小，且過於冒險。

綜言之，規範性模式有其優點：納入船舶尺度與操縱性能等要素；然而，其適用性問題，導致此等公式無法滿足碰撞的空間情勢。

伍、結論與建議

直航船採取行動的臨界時間點，即是避免逼近情勢發生之關鍵。本文係以直航船之觀點，歸納與分析碰撞危機、碰撞的時間階段以及逼近情勢臨界點等相關研究，期能勾勒出計算方法論之輪廓。避碰問題係可歸納為轉向時機、轉向方式、轉向角度與安全距離之函數。本文依此定義，將結論歸納如下：

1. 安全距離係判斷碰撞危機是否存在的準則；而船舶領域之分析結果即可作為安全距離之參考值；其中，Goodwin 之海上調查結果可作為確保安全之極限值。
2. 歸納相關學者之定義，逼近情勢可視為：在考慮船舶尺度與操縱性能的情況下，單靠一船的大角度轉向，無法確保兩船在安全距離上通過。以迴轉圈運動為基礎，考量縱距最大的轉向角度，則可將大角度轉向視為 90° 。
3. 逼近情勢之臨界點相關研究，經驗法則與描述性模式均未能考量船舶操縱性能；規範性模式則無法同時滿足碰撞的空間情勢。

事實上，由於避碰問題係兩船依據其位置、航向與航速之幾何問題，採用解析幾何輔以運動向量即可推算其轉向時間；其次，則是考量船舶操縱性能之影響，即下達舵令至達到預設轉向角度的操舵延遲時間，其應可透過船舶操縱標準進行概估，予以修正轉向時間。據此，若能建構完整方法論，俾能彌補 COLREGS 缺乏明確判斷準則之缺憾，並確保航行安全。

參考文獻

1. Statheros, T., Howells, G. and McDonald-Maier, K., 2008, "Autonomous Ship Collision Avoidance Navigation Concepts, Technologies and Techniques," *The Journal of Navigation*, 61(1): 129-142.
2. Tam, C.K., Bucknall, R. and Greig, A., 2009, "Review of Collision Avoidance and Path Planning Methods for Ships in Close Range Encounters," *The Journal of Navigation*, 62(2): 455-476.
3. Stitt, I.P.A., 2002, "The COLREGS – Time for a Rewrite?" *The Journal of Navigation*, 55(3): 419-430.

4. 吳兆麟, 2001, *海上避碰與交通安全研究*, 初版, 大連海事大學出版社。
5. Cockcroft, A. N. and Lameijer, J. N. F., 1996, *A guide to the collision avoidance rules: International Regulations for Preventing Collisions at Sea*, fifth edition, Oxford: Butterworth-Heinemann.
6. International Maritime Organization (IMO), *Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea, 1972 (COLREGs)*, Retrieved Mar. 4th, 2016 from <http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/COLREG.aspx>
7. Perkins, C. and Redfern, T., 1996, "Requirements for Coordination and the Application of an Automatic Collision Avoidance System," *The Journal of Navigation*, 49(2): 129-135.
8. Taylor, D.H., 1998, "Rules and Regulations in Maritime Collision Avoidance: New Directions for Bridge Team Training," *The Journal of Navigation*, 51(1): 67-72.
9. Weber, H., 1995, "Clarification of the Steering and Sailing Rules of the COLREGS," *The Journal of Navigation*, 48(2): 289-292.
10. Zhao, J., Wu, Z. and Wang, F., 1993, "Comments on Ship Domains," *The Journal of Navigation*, 46(3): 422-436.
11. Goodwin, E. M., 1975, "A Statistical Study of Ship Domains," *The Journal of Navigation*, 28(3): 328-344.
12. Wang, N., Meng, X., Xu, Q. and Wang, Z., 2009, "A Unified Analytical Framework for Ship Domains," *The Journal of Navigation*, 62(4): 643-655.
13. Fujii, Y. and Tanaka, K., 1971, "Traffic Capacity," *The Journal of Navigation*, 24(4): 543-552.
14. Coldwell, T. G., 1983, "Marine Traffic Behaviour in Restricted Waters," *The Journal of Navigation*, 36(3): 430-444.
15. Zhu, X., Xu, H. and Lin, J., 2001, "Domain and Its Model Based on Neural Network," *The Journal of Navigation*, 54(1): 97-103.
16. Wang, N., 2010, "An Intelligent Spatial Collision Risk Based on the Quaternion Ship Domain," *The Journal of Navigation*, 63(4): 733-749.
17. Wang, N., 2013, "A Novel Analytical Framework for Dynamic Quaternion Ship Domains," *The Journal of Navigation*, 66(2): 265-281.
18. Hansen, M. G. et al., 2013, "Empirical Ship Domain based on AIS Data," *The Journal of Navigation*, 66(6): 931-940.
19. Zhao, J., 2008, "When Do Collision Regulations Begin to Apply?" *The Journal of Navigation*, 61(3): 515-528.
20. Wu, Z.-L., 1984, "Quantification of Action to Avoid Collision," *The Journal of Navigation*, 37(3): 420-430.
21. Mankababy, S., 1987, *The Law of Collision at Sea*. Elsevier Science Publishers B.V.
22. Davis, P. V., Dove, M. J. and Stockel, C. T., 1980, "A Computer Simulation of Marine Traffic Using Domains and Arenas," *The Journal of Navigation*, 33(2): 215-222.
23. Habberly, J. S. and Taylor, D. H., 1989, "Simulated Collision Avoidance Manoeuvres: a Parametric Study," *The Journal of Navigation*, 42(2): 248-254.
24. Taylor, D. H., 1990, "Uncertainty in Collision Avoidance Manoeuvring," *The Journal of Navigation*, 43(2): 238-245.

25. James, M. K., 1994, "The Timing of Collision Avoidance Manoeuvres: Descriptive Mathematical Models," *The Journal of Navigation*, 47(2): 259-272.
26. Cahill, R. A., 1982, "The Avoidance of Close Quarters in Clear Weather," *The Journal of Navigation*, 35(1): 151-159.
27. Hilgert, H., 1983, "Defining the Close-Quarters Situation at Sea," *The Journal of Navigation*, 36(3): 454-461.
28. George, B. D., 1984, "Forum: A Graphical Assessment of the Close-Quarters Situation," *The Journal of Navigation*, 37(2): 292-296.
29. Colley, B. A., Curtis, R. G. and Stockel, C. T., 1983, "Manoeuvring Times, Domains and Arenas," *The Journal of Navigation*, 36(2): 324-328.