

讓路船避碰措施之回顧與分析[※]

A Review of Actions to Avoid Collisions by Give-way Vessels

蔡奇呈*、張建仁**、陳志立***

摘要

本文係以讓路船為觀點，回顧讓路船避碰措施相關論文，包括轉向時機與轉向角度。首先透過碰撞的四個階段與 *Sitarem/Spirit* 碰撞案例，討論讓路船之轉向時機；繼而，由操縱圖、危險區間與分析模式等相關論文，歸納與分析讓路船之轉向角度；最後，則以解析幾何與運動向量等歸納計算程序之概念。期能減少船舶避碰之不確定性，並作為後續研究之參考。

關鍵詞：讓路船、避碰措施、避碰規則。

ABSTRACT

The paper attempts to review the literature of actions to avoid collision by the give-way vessels. The timing for manoeuvring is first to discuss by adopting the concept of four stages in a collision and through the collision case of *Sitarem/Spirit*. Three types of researches for magnitude of alteration, namely manoeuvre diagrams, danger sectors and analysis models, are then analysed and deduced. The concept to determine the magnitude of alteration is subsequently derived from analytic geometry with relative motion. It is hoped that this

[※] 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

research may play the role of a preliminary study for future works to eliminate the uncertainty of collision avoidance.

Key words: Give-way vessel, Action to avoid collision, COLREGS.

壹、緒論

船舶避碰係指航行員依據 1972 年國際海上避碰規則(*International Regulations for Preventing Collisions at Sea, 1972, COLREGS*)，當兩船含有碰撞危機時，及早採取有效的避碰措施，使兩船得以安全距離通過。雖然避碰措施強調的是協調(coordination)[1]，然因 COLREGS 的質性描述，缺乏明確準則，航行員多以個人經驗作為判斷依據，而決策制定則產生不確定性[2-6]。據此，建構避碰決策所需的參考值，有其必要。

開闊水域且互見的情況，依據兩船含有碰撞危機時的相對位置，分為追越、迎艏正遇與交叉相遇等三種碰撞的空間情勢。其中，追越與交叉相遇分別規定追越船以及見他船在其右船艏者為讓路船。兩船除應分別遵守第十三條—追越(*Rule 13. Overtaking*)與第十五條—交叉相遇(*Rule 15. Crossing Situation*)外，另須遵守第八條—避碰措施(*Rule 8. Action to Avoid Collision*)與第十六條—讓路船之措施(*Rule 16. Action by Give-way Vessel*)等，在讓路船採取行動階段及早採取明確措施，確保直航船得以行使其直航權利，避免兩船進入逼近情勢階段。然而，審視各條款發現，包括**及早、有效的措施**等質性描述，不僅未明確定義，亦無判斷準則[3]。簡言之，對讓路船而言，其主要的問題為：**轉向時機與轉向角度**等。此即引發本研究之強烈動機，以建構讓路船避碰措施之判斷準則為目的，蒐集與分析有關讓路船避碰措施之相關論文。

目前船舶避碰領域係以最佳化之研究為主要趨勢[7,8]，透過演算法建構自動避碰系統[9-20]，其主要目的為效率。然而，避碰的效率是否能夠確保安全？尤其當會遇的兩船因船舶尺寸與操縱性能差異明顯時，例如：沿岸航行的小船 *Sitarem* 與超大型油輪(very large crude carrier, VLCC) *Spirit* 之碰撞案例[21]。事實上，演算法之構成要素：目標式、限制式為其關鍵的判斷準則，其本質即是透過幾何特性推算。據此，本文係以船舶碰撞幾何相關論文為主要蒐集對象，作為後續建構讓路船避碰措施計算方法論之參考。

據此，本文在後須章節將首先由碰撞的四個階段與 *Sitarem/Spirit* 案例，討論讓路船之**轉向時機**；繼而，蒐集與分析有關讓路船**轉向角度**的相關論文，以船舶碰撞幾何為主；進而，歸納計算模式之輪廓；最後，則提出結論與建議。

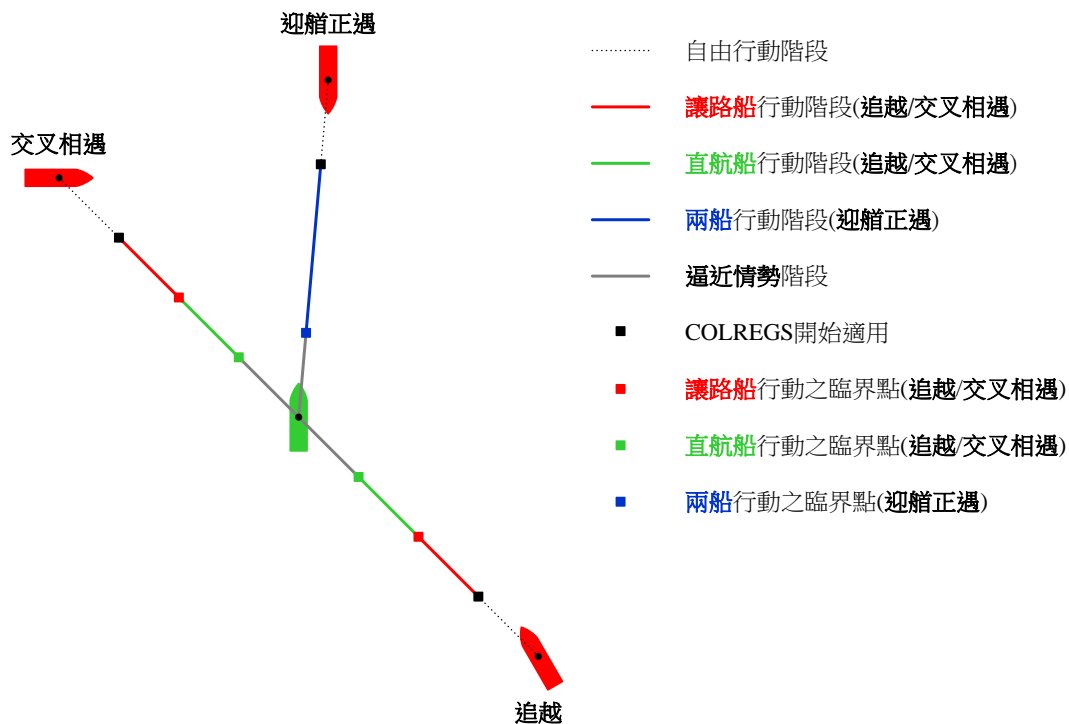


圖 1. 碰撞的四個階段

貳、讓路船之轉向時機

讓路船之關鍵問題有二：轉向時機與轉向角度；本節討論轉向時機。透過碰撞的四個時間階段[22]以及 *Sitarem/Spirit* 碰撞案例，說明如下。

碰撞的四個階段：包括自由行動階段、讓路船行動階段、直航船行動階段以及逼近情勢階段。如圖 1，一旦碰撞危機存在，讓路船應在 COLREGS 開始適用點至讓路船行動臨界點之間，即讓路船行動階段，及早採取明確的避碰措施，確保直航船得以行使其直航權利，並避免兩船進入逼近情勢。然而，讓路船行動臨界點為何，才能確保時間階段不至於進入直航船行動時間，造成直航船亦採取避碰措施，而導致另一個碰撞危機？以 *Sitarem/Spirit* 案例[21]說明如下。

Sitarem 與 *Spirit* 係以交叉相遇情勢相互接近，其中，讓路船 *Sitarem* 為沿岸航行的小船，直航船 *Spirit* 則是超大型油輪(very large crude carrier, VLCC)；兩者之船舶尺寸與操縱性能參數如表 1 與圖 2。根據英國海事事故調查局(Maritime Accident Investigation Bureau, MAIB)之調查，若直航船為操縱性能較好的船舶，其較能嚴格遵守第十七條一直航船之措施(Rule 17. Action by Stand-on Vessel)第二項(b)之規定；但若為操縱性能較差的船舶，將可能造成更多的事故(The watchkeeper on highly manoeuvrable stand-on vessel

表 1. *Sitarem/Spirit* 船舶尺寸與操縱性能彙整表[3, 23]

		<i>Sitarem</i>	<i>Spirit</i>
船長(公尺)		88.0	253.0
船寬(公尺)		13.7	38.9
總噸位		2250	57517
衝止距(公尺)		183	3400
迴轉圈	縱距(公尺)	165-183	615-650
	橫距(公尺)	37-45	380

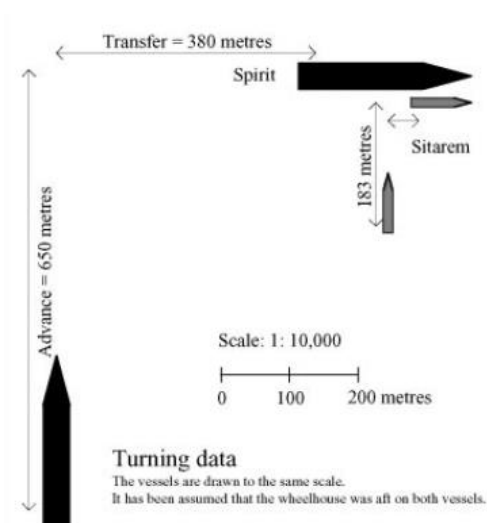


圖 2. *Sitarem/Spirit* 操縱性能比較圖[3]

could avoid collision by complying strictly with Rule 17(b), but, if the stand-on vessel is the larger and less manoeuvrable, then adhering to Rule 17(b) could lead to collision in many cases.)；因此，其將此種狀況是為第二條—責任(*Rule 2. Responsibility*)所稱的特殊情況 (*special circumstances*)，而直航船應依據其本身狀況，提早採取避碰措施[23]。Stitt 提到，雖然操縱性能的差異可能構成特殊情況，但並非規則所稱的「船舶因受限制(*the limitations of vessels involved*)」[3]。

顯然，造成直航船是否提早採取避碰措施的關鍵在於其操縱性能；然而，Holmes[24]、Habberley 與 Taylor[4]、Taylor[5]以及 James[6]透過描述性模式(*descriptive models*)歸納讓路船初次採取行動的時機(*timing*)或距離(*distance*)之平均值，無論讓路船或者直航船之操縱性能均未納入其變數考量。事實上，直航船行動之臨界點係可作為計算讓路船行動臨界點之參考點[25]，其由逼近情勢之定義為基準，係直航船轉向 90°，並輔以其操縱性能之修正，使兩船得以安全距離通過的臨界時間點；若讓路船以此為轉向時間，即可推算其轉向角度，並修正由舵令下達至艏向實際改變的慣性延遲時間，即可獲得讓路船行動之臨界點。其不僅可確保兩船在安全距離上通過，亦可確保時間到達直航船行動之臨

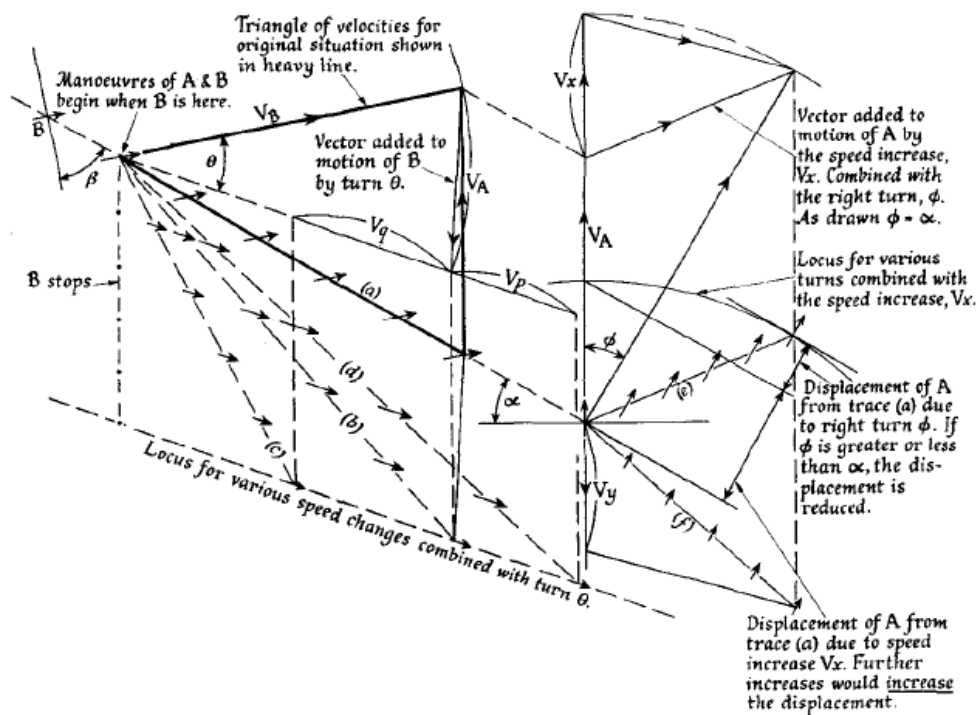


圖 3. Calvert 操縱圖之計算概念[26]

界點前已完成轉向，而減少不確定性。據此，讓路船之另一問題即為**轉向角度**，將在後續章節討論。

參、讓路船之轉向角度

探討讓路船轉向角度之相關論文，依據其結果，分為三類：操縱圖、危險區間以及分析模式等。後續將分析與歸納，作為建構方法論之參考。

3.1 操縱圖

Calvert[26,27]由其經驗，以真運動圖解的方式，繪製轉向與減速等避碰措施之比較圖，進而歸納成經驗法則與操縱圖(manoevre diagram)，即最佳的避碰措施係使視線(line of sight)呈現逆時針轉向，如圖 3；Jones[28]亦採用真運動顯示，並以單位時間，本船轉向或減速可到達的範圍，作為危險區間，據以繪製成操縱圖，如圖 4。此外，Hollingdale[29]則以相對運動之概念，將相對運動航向為固定值 $\alpha = 30^\circ$ ，並限制兩船之最大轉向為 60° ，預設安全距離為當時距離 $\frac{1}{2}$ 等，繪製操縱圖。

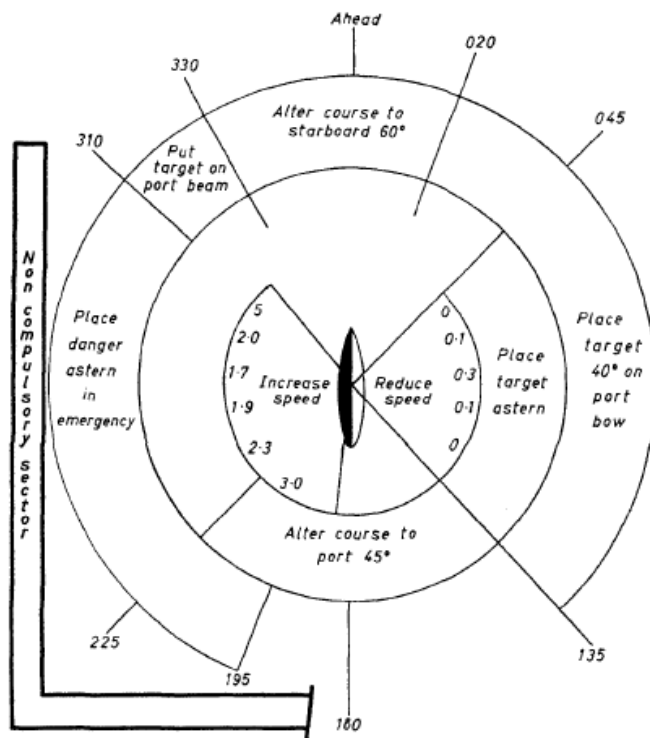


圖 4. Jones 之操縱圖[28]

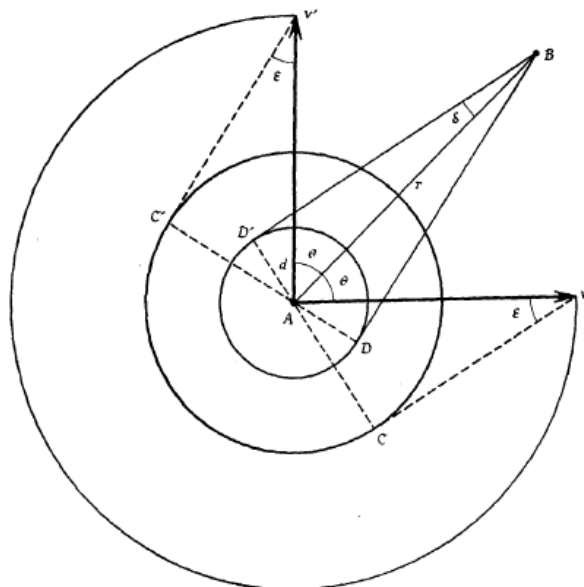


圖 5. Garcia-Frias 可行轉向區示意圖[30]

3.2 危險區間

Garcia-Frias[30,31]與 Mitrofanov[32,33]均預設一圓形安全距離圈，尋找兩條與此安全距離圈相切的相對運動線(relative motion line, RML)，以初始 RML 與兩條安全 RML 之夾角為基準，前者獲得可行轉向區間，後者獲得危險轉向區間，如圖 5 與 6。

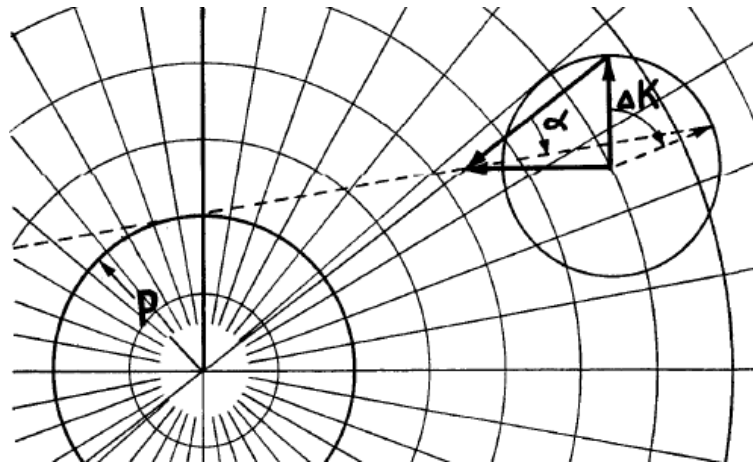


圖 6. Mitrofanov 危險區間示意圖[33]

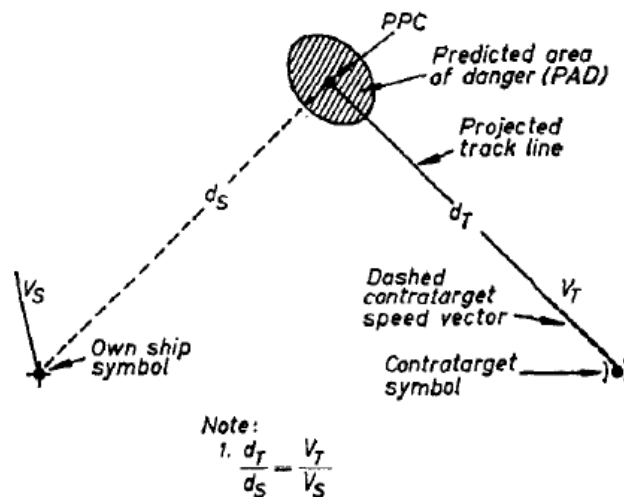


圖 7. PPC 與 PAD 示意圖[34]

Riggs[34]提出可能碰撞點(point of possible collision, PPC)的概念，即兩船之航向航速在真運動顯示情況下之交點；繼而，以預設安全距離為半徑畫圓，獲得預測危險區間(predicted area of danger, PAD)，如圖 7。其後，Riggs 與 O'Sullivan[35]將其 PAD 改良為六角形(hexagons)；Wu[36,37]則加入兩船之航速比修正 PAD 的形狀，並以航速比與兩船之航向分析 PPC 在圖形上分布的狀況。

Lenart[38]延續 Riggs 的概念，將 PAD 之參考點移至他船位置，並透過切線的概念，繪製出危險區間(Collision Threat Parameters Area, CTPA)，其建議碰措施即是避免使本船向量進入該區間，如圖 8。後續有 Szlapczynski[39]加入模糊理論，判斷多船會遇的碰撞危險，構成 Fuzzy Collision Threat Parameters Area (FCTPA)；Szlapczynski 與 Smierzchalski[40]，再加入至最近點距離與至最近點時間等兩個準則，形成 Two-Parameter

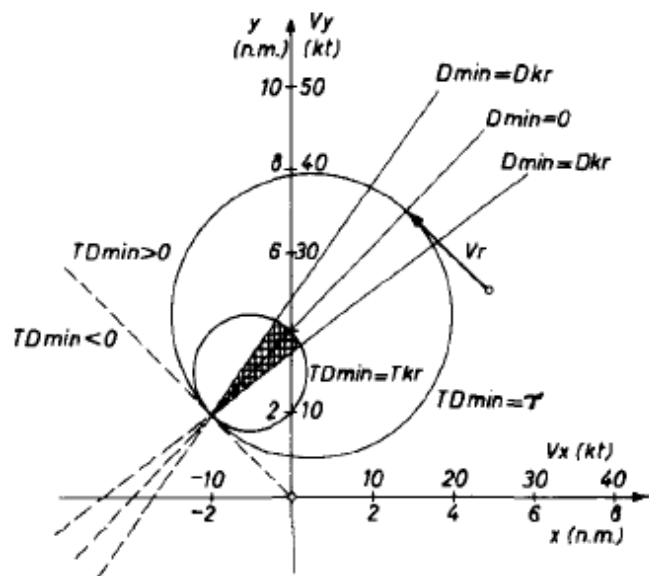


圖 8. CTPA 概念示意圖[38]

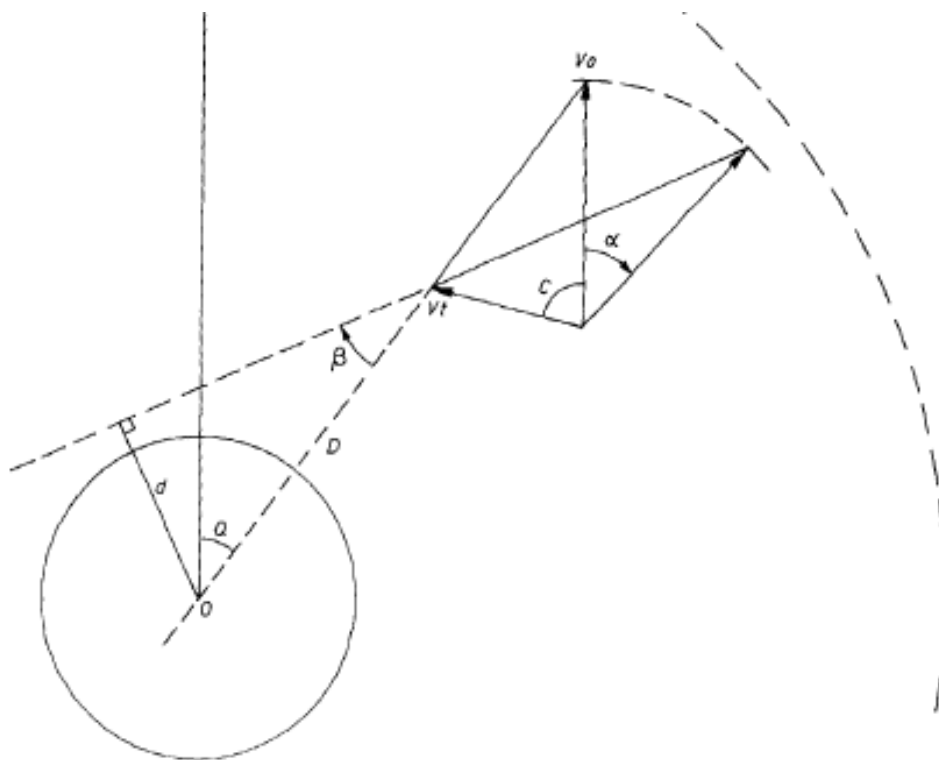


圖 9. Wu 分析模式示意圖[45]

Collision Threat Area(TPCTA) ;Szlapczynski 與 Joanna Szlapczynska[41]則加入 COLREGS 的規定。此外，Pedersen 與 Inoue[42]進行模擬實驗，比較使用 CTPA 與 ARPA 之差異；而 Degre 與 Lefevre[43]則以 CTPA 為概念，其轉向措施除在轉向以外，加入航速變化之考量，建構避碰系統。

3.3 分析模式

Hasegawa 等人[44]以兩船同時轉向，並固定兩船之轉向角度，分析航速比、他船位置以及 RML 變化量之關係；Wu[45]則以本船轉向，分析兩船航速比、他船相對方位、本船轉向角度以及 RML 變化角度之關係，如圖 9。

3.4 小結

綜言之，上述論文主要在探討航向、航速等對於轉向角度之影響。然而，由第二節的討論發現，考量兩船操縱性能而決定的轉向時機，才是減少不確定性的關鍵；惟計算程序必須尋找到一個可供參考的操縱性能指標。此外，轉向角度之計算，實為解析幾何與運動向量之結合，採用其概念與公式，即可建構其計算模式；其中，轉向角度之計算則可以切線概念推算之。

肆、讓路船轉向角度計算概念

以本船作為相對運動之參考點 $O_S(0,0)$ 、航向 C_{OS} 、航速 V_{OS} ，預設安全距離以本船位置為圓心，預設安全距離為半徑；他船座標為 $T_S(x_T, y_T)$ 、航向 C_{TS} 、航速 V_{TS} ；直航船行動臨界點為 $T_Q(x_Q, y_Q)$ ，此亦為讓路船應轉向完成的時間點，待透過操縱特性之修正，即可獲得讓路船行動臨界點 T_M ；兩船運動向量分別為 $\overline{V_{OS}}$ 與 $\overline{V_{TS}}$ ，相對運動向量為 $\overline{V_R}$ ，相對運動向量自 T_S 延長，即為相對運動線(RML)；如圖 10。

讓路船須在 T_Q 完成轉向，即是由此點做切線與預設安全距離圈相切，獲得兩個切點 G_1 與 G_2 。令切線方程式之斜率為 m ；該切線方程式為，

$$y - y_Q = m(x - x_Q) \quad (1a)$$

將其整理為，

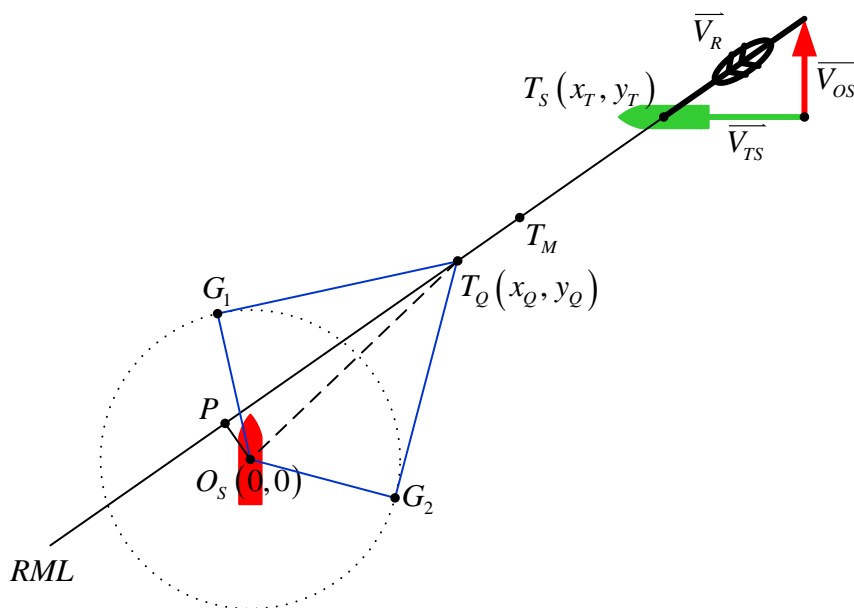


圖 10. 讓路船轉向角度計算示意圖

$$mx - y + (-mx_Q + y_Q) = 0 \quad (1b)$$

由 T_Q 欲獲得轉向相對運動線，使其恰巧通過安全距離圈，兩個切點 G_1 與 G_2 至中心之距離為安全距離，則可由點至直線距離獲得，

$$D_s = \frac{|mx_Q - y_Q|}{\sqrt{m^2 + 1}} \quad (2a)$$

將其整理為，

$$(x_Q^2 - D_s^2)m^2 + (-2x_Q y_Q)m + (y_Q^2 - D_s^2) = 0 \quad (2b)$$

令 $a = x_Q^2 - D_s^2$ 、 $b = -2x_Q y_Q$ 以及 $c = y_Q^2 - D_s^2$ ，經由公式解獲得其斜率 m ，

$$m = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (2c)$$

由 T_Q 尋找與預設安全距離圈相切的相對運動線，應有兩條，而獲得兩個斜率；惟當該切線平於 y 軸，即無解；據此，則應由判斷式進行判斷。此外，透過兩相對運動線之斜率，則可與讓路船之初始運動向量進行比較，即可獲得**轉向角度**；另應考量 COLREGS 之規定，例如：追越情勢可朝左或朝右轉向；交叉相遇則應朝右轉向等[46]，據以獲得最佳**轉向角度**。簡言之，**轉向角度**應以**轉向時機**為基準，即可透過幾何特性進行推算，經由**轉向時機**與**轉向角度**之計算，除可確保安全，亦可降低船舶避碰之不確定性。

伍、結論

為彌補 COLREGS 缺少明確準則之缺點，確保航行安全，本文以讓路船之避碰措施為主要目的，透過案例、相關論文之回顧，歸納**轉向時機**與**轉向角度**之概念。結論歸納如下：

1. 由調查結果發現，操縱性能較差的船舶為直航船時，其可能提早採取避碰措施。據此，讓路船在決定**轉向時機**時，應以直航船行動之臨界點為基準推算，其中，兩船之操縱性能即為主要變數。事實上，若可由自動識別系統(automatic identification system, AIS)所獲得之他船資訊，輔以操縱性能標準，即可概估其操縱性能。
2. 由操縱圖、危險區間與分析模式等相關研究發現，**轉向角度**即是幾何問題，其可經由解析幾何與運動向量解算之。
3. 雖然自動雷達測繪裝置(automatic radar plotting aid, ARPA)可提供部分資訊，但判斷準則仍仰賴航行員之經驗。據此，本文歸納之概念，應可供實務或後續建構自動避碰系統，作為判斷準則之參考，除可確保安全，亦可降低船舶避碰之不確定性。

參考文獻

1. 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.
2. Belcher, P., 2002, "A Sociological Interpretation of the COLREGS," *The Journal of Navigation*, 55(2): 213-224.
3. Stitt, I.P.A., 2002, "The COLREGS – Time for a Rewrite?" *The Journal of Navigation*, 55(3): 419-430.
4. Habberley, J. S. and Taylor, D. H., 1989, "Simulated Collision Avoidance Manoeuvres: a

- Parametric Study,” *The Journal of Navigation*, 42(2): 248-254.
5. Taylor, D. H., 1990, “Uncertainty in Collision Avoidance Manoeuvring,” *The Journal of Navigation*, 43(2): 238-245.
 6. James, M. K., 1994, “The Timing of Collision Avoidance Manoeuvres: Descriptive Mathematical Models,” *The Journal of Navigation*, 47(2): 259-272.
 7. 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.
 8. 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.
 9. Change, C.-Y. and Jan, G. E., 2003, “A Method for Searching Optimal Routes with Collision Avoidance on Raster Charts,” *The Journal of Navigation*, 56(3): 371-384.
 10. Szlapczynski, R., 2005, “A new method for searching optimal path on a raster plane including cost of direction changes,” *Polish Maritime Research*, 12(3): 27-31.
 11. 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.
 12. Tsou, M.-C. and Hsueh, C.-K., 2010, “The Study of Ship Collision Avoidance Route Planning by Ant Colony Algorithm,” *Journal of Marine Science and Technology*, 18(5): 746-756.
 13. Tsou, M.-C., Kao, S.-L. and Su, C.-M., 2010, “Decision Support from Genetic Algorithms for Ship Collision Avoidance Route Planning and Alerts,” *The Journal of Navigation*, 63(1): 167-182.
 14. Szlapczynski, R., 2011, “Evolutionary Sets of Safe Ship Trajectories: A New Approach to Collision Avoidance,” *The Journal of Navigation*, 64(1): 169-181.
 15. Lazarowska, A., 2012, “Decision support system for collision avoidance at sea,” *Polish Maritime Research*, 19(S1): 19-24.
 16. Lisowski, J., 2012, “Game control methods in avoidance of ships collisions,” *Polish Maritime Research*, 19(S1): 3-10.
 17. Mohamed-Seghir, M., 2012, “The branch-and-bound method and genetic algorithm in avoidance of ships collisions in fuzzy environment,” *Polish Maritime Research*, 19(S1): 45-49.
 18. Rak, A. and Gierusz, W., 2012, “Reinforcement Learning in Discrete and Continuous Domains Applied to Ship Trajectory Generation,” *Polish Maritime Research*, 19(S1): 31-36.
 19. Tsou, M.-C. and Cheng, H.-C., 2013, “An Ant Colony Algorithm for efficient ship routing,” *Polish Maritime Research*, 20(3): 28-38.

20. Lazarowska, A., 2015, "Ship's Trajectory Planning for Collision Avoidance at Sea Based on Ant Colony Optimisation," *The Journal of Navigation*, 68(2): 291-307.
21. *The Sitarem and Spirit*. [2001] 2 Lloyd's Rep. 107. ADMIRALTY COURT.
22. 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.
23. Maritime Accident Investigation Branch (MAIB), 2005, *Report on the Investigation of a Collision between the Bahamian cargo ship Union Arbo and the United Kingdom fishing vessel Philomena about 10 miles south of Newlyn in Cornwall on 2 September 1999*, No.19/ 2000.
24. Holmes, J. D., 1980, "A Statistical Study of Factors Affecting Navigation Decision-making," *The Journal of Navigation*, 33(2): 206-214.
25. 蔡奇呈、張建仁、陳志立，2016，「逼近情勢臨界點時間之回顧與分析」，*台灣海事安全與保全研究學刊*，7(2)：1-11。
26. Calvert, E. S., 1960, "Manoeuvres to Ensure the Avoidance of Collision," *The Journal of Navigation*, 13(2): 127-137.
27. Calvert, E. S. 1961, "A Comparison of Two Systems for Avoiding Collision," *The Journal of Navigation*, 14(4): 379-401.
28. Jones, K. D., 1974, "Application of a Manoeuvring Diagram to Multi-ship Encounters," *The Journal of Navigation*, 27(1), 19-27.
29. Hollingdale, S. H., 1961, *The Mathematics of Collision Avoidance in Two Dimensions*, *The Journal of Navigation*, 14, 3, 243-261.
30. Garcia-Frias, J., 1960, "Anti-collision Radar Sectors," *The Journal of Navigation*, 13(3), 316-323.
31. Garcia-Frias, J., 1965, "The Sector Rule and the Collision Problem," *The Journal of Navigation*, 18(2), 141-162.
32. Mitrofanov, O., 1968, "An Anti-collision Indicator," *The Journal of Navigation*, 21(2), 163-170.
33. Mitrofanov, O., 1976, "Manoeuvres in Fog Compatible with Collision Regulations," *The Journal of Navigation*, 29(1), 39-48.
34. Riggs, R. F., 1975, "A Modern Collision Avoidance Display Technique," *The Journal of Navigation*, 28(2), 143-155.
35. Riggs, R. F. and O'Sullivan, J. P., 1980, "An Analysis of the Point of Possible Collision," *The Journal of Navigation*, 33(2), 259-283.
36. Wu Zhao-Lin, 1984, "An Alternative System of Collision Avoidance," *The Journal of Navigation*, 37(1), 83-89.
37. Wu Zhao-Lin, 1988, "Analysis of Radar PAD Information and a Suggestion to Reshape

- the PAD,” *The Journal of Navigation*, 41(1), 124-129.
38. Lenart, A. S., 1983, “Collision Threat Parameters for a new Radar Display and Plot Technique,” *The Journal of Navigation*, 36(3), 404-410.
 39. Szlapczynski, R., 2008, “Fuzzy Collision Threat Parameters Area (FCTPA) – A New Display Proposal,” *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2(4), 359-362.
 40. Szlapczynski, R. and Smierzchalsk, R., 2009, “Supporting navigator’s decisions by visualizing ship collision risk,” *Polish Maritime Research*, 16(1), 83-88.
 41. Szlapczynski, R. and Szlapczynska, J., 2015. “A Target Information Display for Visualising Collision Avoidance Manoeuvres in Various Visibility Conditions,” *The Journal of Navigation*, 68(6), 1041-1055.
 42. Pedersen, E. and Inoue, K., 2003, “Simulator Studies on a Collision Avoidance Display that Facilitates Efficient and Precise Assessment of Evasive Manoeuvres in Congested Waterways,” *The Journal of Navigation*, 56(3), 411-427.
 43. Degre, T. and Lefevre, X., 1981, “A Collision Avoidance System,” *The Journal of Navigation*, 34(2), 294-302.
 44. Hasegawa, K., Kasahara, K., Yamazaki, Y. and Kai, Y., 1973, “A Quantitative Analysis of Avoiding Action,” *The Journal of Navigation*, 26(3), 274-281.
 45. Wu, Z.-L., 1984, “Quantification of Action to Avoid Collision,” *The Journal of Navigation*, 37(3), 420-430.
 46. 蔡奇呈、張建仁、陳志立，2014，「開闊水域的船舶避碰措施」，*台灣海事安全與保安研究學刊*，5(3)：1-17。