

基於臨界多邊形之船廠板材自動組配系統研發

翁維珠*¹ 李岩洋**

*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

¹Email: pw@email.ntou.edu.tw

關鍵詞：排版問題, 不規則切割問題, 雙板材組配, 臨界多邊形演算法, 造船

國科會計畫編號：NSTC 111-2221-E-019-034

摘要

造船4.0的主軸是善用資訊技術以提升造船效率，而造船的排版工作正是電腦可接手的任務之一。排版問題探討如何使用最少的母材片數以切割出所有需要的板材來建構船殼。工程師常用一些策略來提升排版成果，配對板材就是其一。所謂，配對板材就是將適合的板材緊密組合以形成類矩形(近似矩形)，因為類矩形更容易緊密排版。本報告開發雙板材自動組配系統可從一堆形狀各異的板材中，分類出U型板材和L型板材兩大類，並將同類型板材兩兩緊密組配形成一大板材，再與其他板材一起排版以實現此人工排版經驗，進而節省材料。此雙板材自動組配系統以NFP演算法為基礎，搭配特別提出的量化指標『配對指數』，先嘗試讓所有板材彼此配對，且以最高的配對指數進行配對組合。『配對指數』是矩形相似度和飽滿度的綜合指數，包含兩個係數，這兩個係數決定配對板材的組合方式，這與板材外形有關係。案例測試前，需要先進多次的係數調整和測試方能找到最佳係數組。根據船廠實際案例，本計畫所研發的雙板材自動組配系統不僅可準確分類出兩大類板材，而且最佳組配的結果，可讓最終排版結果節省6%~8%不等的材料。

前言

所謂排版問題，指的是如何在一大片鋼板材料上緊密布置各種二維形狀板材，以便切割後減少廢料。這是一個二維圖形問題，因此需要適當的圖形定義方能進一步計算。Bennell 與 Oliveira [1,2]，歸納出許多圖形表示方法，其中最常用的是柵格法(raster method)與臨界多邊形法(no-fit polygon, NFP)。柵格法的缺點是圖形描述不夠精準，因此本文採用臨界多邊形法來描述圖形。

臨界多邊形法則是以向量作為圖形的基礎資料格式，該概念是由 Art 在 1966 年提出，當初稱之為「包絡形狀」[3]。Adamowicz 於 1976 年首次提出“no-fit polygon”這個名詞[4]，用於計算兩多邊形間所有相接且不重疊位置的幾何工具，而該兩多邊形則被稱為「固定多邊形」與「繞行多邊形」。Ghosh 在 1993 年使用以數學家赫爾曼·閔可夫斯基命名的方法:閔可夫斯基和(Minkowski sum)[5] Bennell 等人於 2001 年將繞行多邊形經過凸殼處理轉換為凸多邊形進行改良成可處理不規則多邊形[6,7]。

郭學豪於 2021 年提出四分之三包裝法[8]，以 Bennell 的方法為基礎，提升了臨界多邊形生成的穩健度，並透過平行計算加速了運算時間。

Mahadevan 在 1984 年提出繞行滑動法(orbital sliding method)[9]。Burke 在 2007 年針對 Mahadeva 的方法提出了改善的流程[10]，這正是本研究所使用的方法。

在排版規則上，Kendall 在 2000 年將各種元啟發式的算法應用在排版上並進行比較[11]，發現禁忌搜尋法與基因演算法因較適合逃脫局部最優解所以產生較好的成果。2014 年 Boschetti 提出了基於柵格法的方法進行排版[12]，因為柵格法對於形狀凹凸的容忍度較高。Burke 等人在 2006 年提出新的 BLF(bottom-left-fill algorithm)排版法[13]，使用登山法與禁忌搜尋法進行排版順序的最佳化。王清義於 2007 年提出 SNEST 排版法[14]，核心方法即為 BLF 排版法，並結合基因演算法進行探討。徐勁逸使用 SNEST 針對七個船廠排版案例進行探討，針對排版順序提出了兩階段排版法[15]，一開始先排列大型板材，第二階段材排列小型材，因小板材通常用於

縫隙填補，而大板材對於排版結果才有較大的影響，因此本文也將僅針對大板材進行組配。翁維珠在 2016 年提出了基於臨界多邊形法的開放式臨界多邊形(open nesting based on NFP, ONFP)排版法[16]，用於排列大型材，再使用基於 BLF 的排版法的 SNEST 排版程式排版小型材，經實驗有獲得較佳的排版結果。翁維珠與黃群傑開發 SHIPNEST 排版系統[17]，以柵格法作為幾何工具，排版規則使用 BLF 演算法，具有非常完整的排版功能，也是本文實驗所採用的排版程式。杜國維於 2017 年開發 OPTNEST 最佳化排版系統[18]，使用禁忌搜尋法最佳化板材的排版順序，並提出單一插入法用以產生鄰域，讓最佳化計算更有效率。郭學豪於 2021 年開發 NFP_NEST 簡易排版系統[8]，設計一種定位評估值作為排版策略，用於進行臨界多邊形的定位，使排版以佔滿母材高度為優先。

Shigeki Yamauchi 在 1995 研究基因演算法應於排版系統時[19]，發現若是將三角形組成矩形可大大提高排版效率。Lee Cheol-Soo 等人於 2013 年討論了組配與排版之間的關係[20]，先將形狀劃分成幾個區間，再由該區間最高點為起點畫一條垂直射線並將終點設置於與該形狀最高點相同之水平位置，透過射線間彼此的關係將形狀分類出三角形、U 形與 L 形等等形狀，接著透過人工設計的組配規則，排版結果如圖 1。其中，有事先板材組配的排版結果(圖 1b)優於沒經過組配的排版結果(圖 1a)。

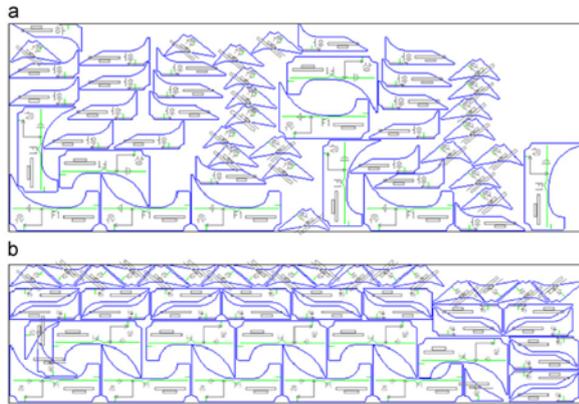


圖 1 有無進行組配的比较(上無、下有)

綜觀以上各文獻回顧的結果，可預期若將板材預先組配再排版可提升排版緊密度，因此本研究將研發板材雙板最佳組配系統。以下會先說明我們如何定義板材的雙組配問題，再介紹此系統的運作流程，接下來進行相關測試，最後總結成果和未來工作。

板材組配問題

船廠大板材形狀最需要組配的有兩種：L 型和 U 型，因為它們都外形深凹，很難緊密排版。本論文特別針對這兩種板材個別進行組配。

1. L 形板材

已知兩板材 s_a 與 s_b ，均屬於 L 型板材集合 S_L 。因此，L 形板材最佳雙組配問題可定義如下：

$$\begin{aligned} \max Z(S_a, S_b) &= c_1 \times L_1 + c_2 \times L_2 + c_3 \times L_3 \\ \text{s. t.} & \\ |(A_a - A_b) / A_b| &\leq 0.2 \\ \sum_{i=1}^3 c_i &= 1 \\ c_1, c_2, c_3 &\in \{0, 1\}, S_a, S_b \in S_L \end{aligned} \quad (1)$$

其中，所評估的評估函數 Z 的值必須越大越好，而且此兩板材的面積差比上其中一片不可超過 0.2，代表此兩板材面積接近，組合效果比較好，這是經驗值。評估函數 Z 的各項係數均為布林值， L_1, L_2, L_3 分別是三種評估指標，其數值越高分別代表組配結果越接近圖 2a、圖 2b 和圖 2c，且定義如公式(2)、公式(3)、公式(4)。

$$L_1 = \frac{A_{base} + A_{orbiting}}{A_{NFP, hull}} \quad (2)$$

$$L_2 = \frac{A_{NFP, ball}}{A_{NFP, hull}} \quad (3)$$

$$L_3 = \begin{cases} 0, & A_{NFP, rect} \leq A_{base, rect} + A_{orbit, rect} \\ L_1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

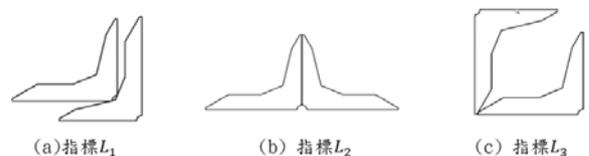


圖 2 L 形板材三種指標代表不同組配方式

2. U 形板材

已知任意兩板材 s_a 與 s_b 均屬於 U 型板材集合 S_U 。因此，U 形板材最佳雙組配問題可定義如下：

$$\begin{aligned}
 \max Z(S_a, S_b) &= c_1 \times U_1 + c_2 \times U_2 + c_3 \times U_3 \\
 s. t. \\
 |(A_a - A_b) / A_b| &\leq 0.2 \\
 \sum_{i=1}^3 c_i &= 1 \\
 c_1, c_2, c_3 &\in \{0, 1\}, S_a, S_b \in \mathbf{S}_U
 \end{aligned} \quad (5)$$

其中， U_1 、 U_2 、 U_3 分別是三種評估指標，其數值越高分別代表組配結果越接近圖 3a、圖 3b 和圖 3c，個別定義如公式(6)、公式(7)、公式(8)。

$$U_1 = \frac{A_{base} + A_{orbit}}{A_{NFP, rect}} \quad (6)$$

$$U_2 = \frac{A_{NFP, ball}}{A_{NFP, rect}} \quad (7)$$

$$U_3 = \begin{cases} 0, & A_{NFP, hull} \leq A_{base, hull} + A_{orbit, hull} \\ U_1, & otherwise \end{cases} \quad (8)$$

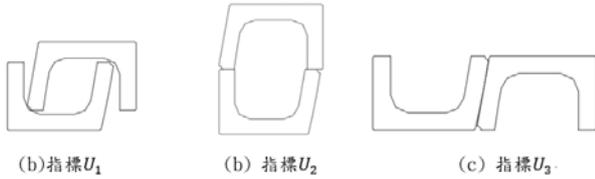


圖 3 U 形板材三種指標代表不同組配方式

雙板材最佳組配系統

雙板材最佳組配系統的流程圖如下。當開始執行時，會讀入所有板材圖形資料(支援 DXF 圖檔格式)；針對所有圖形先透過小策略判定是否擺正，若無會旋轉擺正，然後進行板材分類，分出 L 型板材和 U 型板材。針對每種類型的所有板材，進行最佳組配，最佳化方法採用窮舉法(exhaustive enumeration method)。

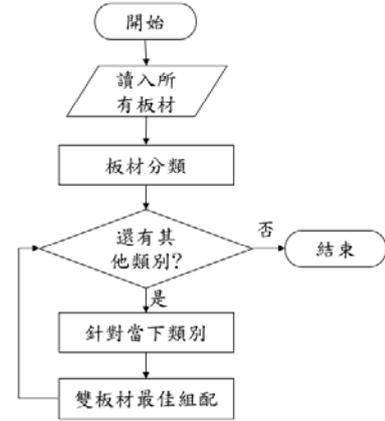


圖 4 雙板材最佳組配系統流程圖

案例測試

本論文針對所收集的三個船廠案例進行測試。每個案例都先將板材進行分類、兩個最佳組配後，再和剩餘板材進行排版，以了解雙板材最佳組配對整體排版的影响效果，所使用的是翁維珠等人自行研發的 SHIPNEST[17]排版軟體。各案例的結果比較乃參考排版完成後的邊長使用率 φ ，計算公式如下：

$$\varphi = \frac{L_u}{L_t} \quad (9)$$

其中，分子是所有板材排版完成後所佔用橫向長度，而分母則是母材總長。因此，邊長使用率 φ 的數值越小代表排版越好、越緊密。以下分多個案例個別說明。

1. 案例一

本案例共有 65 片各種形狀的板材。其大部分皆為 U 形板材，僅有一組 L 形板材。最佳組配後再排版的作法是：先針對 U 型板材的三種係數個別組配後排版，結果如表 1 的編號 1 到編號 3 的組配後排版的邊長使用率 φ_2 ，發現 U 型組配係數 $U_3 = 1$ 的排版結果最優，使得未組配排版的邊長使用率 φ_1 降低 5.17%，改善幅度的計算是： $(\varphi_2 - \varphi_1) / \varphi_2$ 。

接下來，選定 U 型組配係數 $U_3 = 1$ 去搭配 L 型各組配係數值，讓 U 型版材和 L 型版材都先組配後再排版，結果從編號 4 到編號 6 所示，改善幅度以編號 5 的組配係數最佳，改善幅度達 6.12%。從圖 5 可看到排版布置結果，中圖的排版結果只有先組配 U 型材(黃色板材)，特別標示的三片藍色 L 型板材因旋轉姿態使得排版不夠緊密，在搭配 L 型板材組配

後(下圖)，這些板材都被放正，才能有最好的排版結果。這說明組配的重要性。

表 1 案例一排版計算結果

No	U 指標	L 指標	未組配 (φ_1)	組配後 (φ_2)	改善 (%)
1	$U_1=1$	-	0.948	0.935	-1.37
2	$U_2=1$	-	0.948	0.944	-0.42
3	$U_3=1$	-	0.948	0.899	-5.17
4	$U_3=1$	$L_1=1$	0.948	0.908	-4.22
5	$U_3=1$	$L_2=1$	0.948	0.890	-6.12
6	$U_3=1$	$L_3=1$	0.948	0.906	-4.43

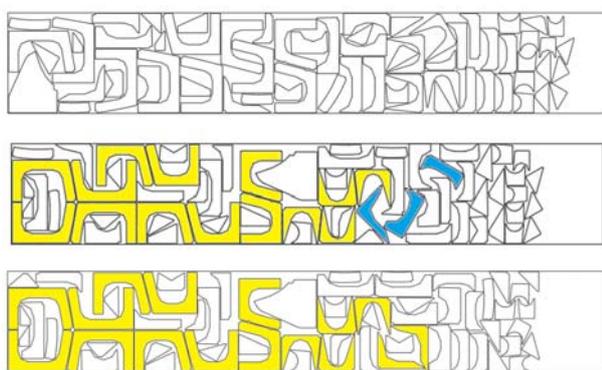


圖 5 案例一(上：無組配;中：No.3 組配；下：No.5 組配)

2. 案例二

本案例共有 87 片各種形狀的板材，與案例一不同，大部分皆為呈弧形的 L 形板材。經過板材分類後，並無分類出 U 型板材，因此僅測試 L 型板材的組配係數。結果誠如表 2 所示，L 型板材經過組配後可改善排版結果達 3.86%。從圖 6 可看到排版布置的差異，弧形的 L 形板材不容易緊密排版，而且這些板材的弧線並不完全一致，有些微差異，這使得組配時也不容易緊密。但相較未組配的結果，仍是有一定的改善效果。實際上，若能將這些 L 型板材全部組配成一超大板材再進行排版，可預期效果更加，這會是未來工作。

表 2 案例二排版計算結果

No	L 指標	未組配(φ_1)	組配後(φ_2)	改善(%)
1	$L_1=1$	0.765	0.735	-3.86

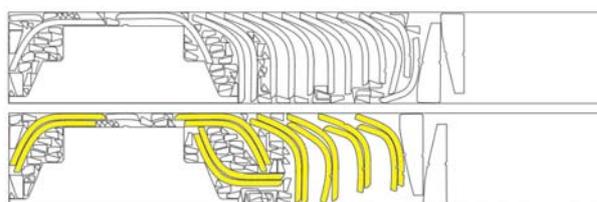


圖 6 案例二(上：無組配;下：組配後)

3. 案例三

本案例具有相當數量的 L 型板材與 U 型板材，每一片 U 形板材與 L 形板材其實都有形狀上的差異。因板材數量非常多，我們將使用 SHIPNEST2 的多母材排版系統，並觀察組配這麼多複雜的板材對排版結果會有何影響。SHIPNEST2 的多母材排版系統的特性是先排版大板材後填補小板材，而本案例只針對大板材有、無組配的差異。

表 3 呈現測試的數據結果，圖 7 展示未組配的多母材排版布置圖，由上到下共用到六片母材，圖 8 則展示表 9 各種組配後的最佳排版多母材布置圖，由上到下依序用到六片母材。因為板材數太多，不確定如何搭配 U 型組配係數和 L 型組配係數，因此針對所有九種搭配個別進行排版來挑選此案例的兩類組配係數的最佳搭配。

從表 9 可看出，編號 6 的組配係數搭配最佳： $U_2=1$ 且 $L_3=1$ ，最終排版結果改善幅達高達 8.65%。圖 8 呈現最佳組配後的排版布置圖，其中黃色板材都是經過組配的大板材，它們或相對、或相扣、或左右相貼的組配，盡量讓未使用的空間或集中框住、或開口與大片空間結合，以方便後續排版利用。這種不讓未使用空間零散各處的做法，才能有效改善排版結果。

表 3 案例三排版計算結果

No	U 指標	L 指標	組配前 (φ_1)	組配後 (φ_2)	改善 (%)
1	$U_1=1$	$L_1=1$	0.959	0.970	1.15
2	$U_1=1$	$L_2=1$	0.959	0.887	-7.51
3	$U_1=1$	$L_3=1$	0.959	0.922	-3.86
4	$U_2=1$	$L_1=1$	0.959	0.910	-5.11
5	$U_2=1$	$L_2=1$	0.959	0.920	-4.07
6	$U_2=1$	$L_3=1$	0.959	0.876	-8.65
7	$U_3=1$	$L_1=1$	0.959	0.907	-5.42
8	$U_3=1$	$L_2=1$	0.959	0.941	-1.88
9	$U_3=1$	$L_3=1$	0.959	0.910	-5.11

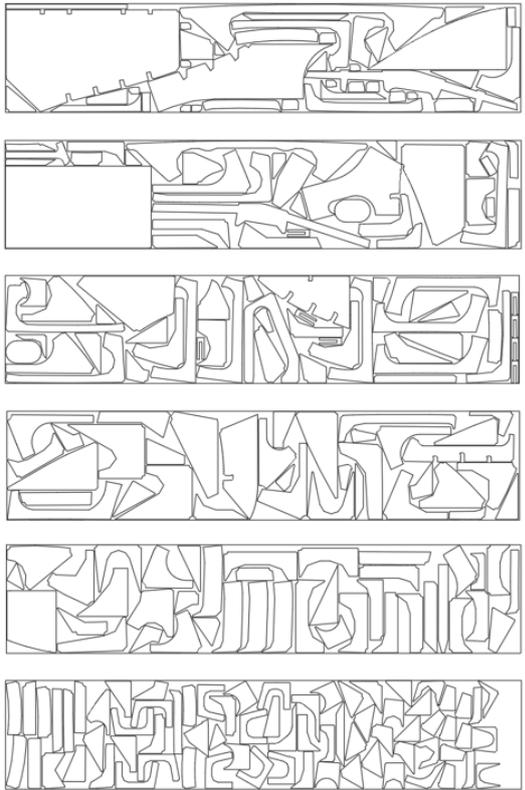


圖 7 案例三：未組配 (由上至下依序使用的母材)

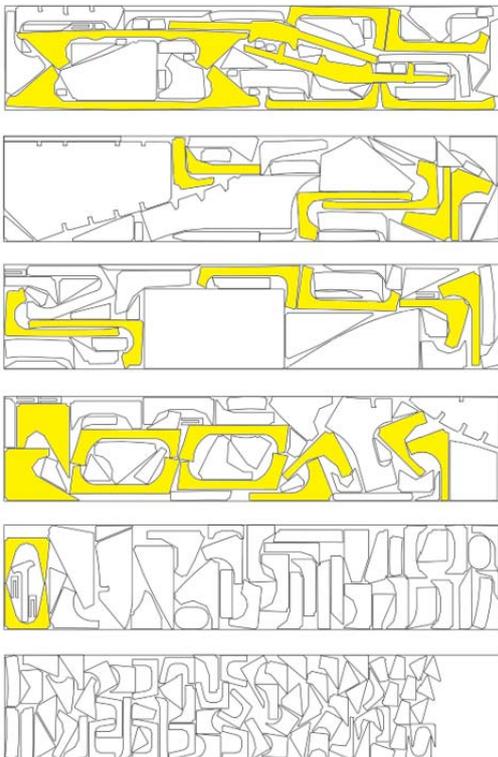


圖 8 案例三：組配後 (由上至下依序使用的母材)

結論與未來工作

本報告以臨界多邊形法作為基礎開發出一套雙板材最佳組配系統，以提升排版效果，搭配自行研發的多母材排版系統，經過測試效果均優於未進行組配的排版結果，實現人工排版常用策略：形狀近似先緊密組合成大板材。並在案例測試中驗證本方法於部分案例中能有效改善排版結果。總結本論文成果如下：

1. 提出針對 U 形與 L 形的各三種量化指標，讓電腦能依據量化指標為組配結果打分數。
2. 使用窮舉法依量化指標形成的目標函數能找到最佳的組配結果。
3. 將組配方法用於現有的排版系統 SHIPNEST 能有效改善其排版結果。
4. 提出一套用於板材旋轉擺正的方法。
5. 應用像素比對法提出 U 形板材的分類方法。
6. 使用凹度指標提出 L 形板材的分類方法

而在測試我們提出的量化指標時，我們也發現了一些需要改進的地方以及未來的研究方向：

1. 須找更多不同類型的 U 形板材與 L 形板材進行測試來驗證量化指標的有效性。
2. 因量化指標 U_2 、 L_2 需要用到滾球法造成計算時間非常久，因此未來將會檢視並優化滾球法的程式流程。
3. 量化指標 U_3 、 L_3 於部分案例中產生非預期的組配效果，因此應針對該指標改進。
4. 對於目標函數的係數 c_1 、 c_2 、 c_3 的值與各量化指標的關係進行更多的探討。
5. 結合郭學豪開發之四分之三包裝法[8]，以加速臨界多邊形的計算方式。

參考文獻

1. Julia A. Bennell and Jose F. Oliveira, The geometry of nesting problems: A tutorial, *European Journal of Operational Research* 184 (2), 2008, 397-415.
2. J.F. Oliveira, J.S. Ferreira, Algorithms for nesting problems, *Applied Simulated Annealing*, R.V.V. Vidal (Ed.), Lecture Notes in Econ. and Maths Systems, Vol. 396, 1993, pp. 255-274.
3. Art, R.C., An approach to the two dimensional irregular cutting stock problem. IBM Cambridge Scientific Centre, 1996, Report 36-Y08.
4. Michael Adamowicz and Antonio Albano, Nesting two dimensional shapes in rectangular modules, *Computer Aided Design* 8 (1), 1976, 27-33.

5. Ghosh, P.K., A Unified Computational Framework for Minkowski operations, *Computers and Graphics*, 1993 ,17, 4.
6. Julia A. Bennell, Kathryn A. Dowland and William B. Dowland, The irregular cutting-stock problem - a new procedure for deriving the no-fit polygon, *Computers & Operations Research* 28 (3), 2001, 271-287.
7. Julia A. Bennell and Xiang Song, A comprehensive and robust procedure for obtaining the nofit polygon using Minkowski sums, *Computers & Operations Research* 35 (1), 2008, 267-281.
8. 郭學豪，基於臨界多邊形法之船廠排版系統初步開發，國立臺灣海洋大學系統工程暨造船所，碩士論文，2021。
9. Mahadevan, A., Optimisation in computer aided pattern packing, Ph.D. Thesis, North Carolina State University, 1984.
10. E.K. Burke, R.S.R. Hellier, G. Kendall and G. Whitwell, Complete and robust No-Fit Polygon generation for the irregular stock cutting problem, *European Journal of Operational Research* 179 (1), 2007, 27-49.
11. Kendall, G., Applying Meta-Heuristic Algorithms to the Nesting Problem Utilising the No Fit Polygon, 2000.
12. Roberto Baldacci, Marco A. Boschetti, Maurizio Ganovelli, Vittorio Maniezzo, Algorithms for nesting with defects, *Discrete Applied Mathematics*, Volume 163, Part 1, 2014, 17-33,
13. Edmund Burke, Robert Hellier, Graham Kendall and Glenn Whitwell, A New Bottom-Left-Fill Heuristic Algorithm for the Two-Dimensional Irregular Packing Problem, *Operations Research* 54 (3), 2006, 587-601.
14. 王清義，以 AutoCAD 為平台之二維不規則形白板系統開發研究，碩士論文，國立臺灣海洋大學系統工程暨造船所，2006。
15. 徐劭逸，二維不規則排版問題之船廠案例研究探討，國立台灣海洋大學系統工程暨造船研究所，碩士論文，2010。
16. 翁維珠，應用 NFP 演算法於船用大型材排版問題，*中國造船暨輪機工程學刊*，35:3 期，2016，115-121。
17. Wei-Chu Weng and Qun-Jie Huang, Multi-Sheets Nesting Problem in Shipbuilding, 31th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, 2018, Wuhan in Hupeh, China.
18. 杜國維，船廠之不規則排版問題最佳化，國立台灣海洋大學系統工程暨造船研究所，碩士論文，2017。
19. Shigeki Yamauchi, Kenji Tezuka, Automatic Nesting System by Use of Genetic Algorithm, *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 1995, Volume 1995, Issue 178, Pages 707-712.
20. Cheol-Soo Lee, Eun-Young Heo and Joo-Hyun Shim, F. Frank Chen, Dong-Won Kim, Ship part nesting by pattern recognition and group arrangement, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 29 (2013), 56-63.

DEVELOPMENT OF AUTOMATIC SHAPE PAIRING SYSTEM BASED ON NFP ALGORITHM FOR SHIPBUILDING

Wei-Chu Weng Yan-Yang Li***

*Department of System Engineering and Naval Architecture, National Taiwan Ocean University

**Ship and Ocean Industries R&D Center

Keywords: nesting problem, irregular cutting stock problem, assemble of paired shapes, no-fit polygon, shipbuilding

ABSTRACT

Shipbuilding 4.0 represents a strategic framework for the intelligent integration of various facets within the ship industry, encompassing ship construction, maintenance, and navigation. Despite the inherent complexity of ship production, achieving complete automation or smart manufacturing remains challenging. However, addressing the nesting problem within ship construction presents a promising avenue for automation. Nesting concerns the optimal arrangement of 2D shapes on a single sheet of material. While existing techniques have shown limitations, our research introduces an innovative approach leveraging a common engineering strategy: shape pairing. We have developed an automatic shape pairing system that categorizes shapes into two main types: L-shaped and U-shaped, then prioritizing similar shapes for pairing. This system optimizes the close integration of paired shapes, employing a no-fit polygon method to generate potential combinations and selecting the best arrangement through exhaustive algorithms. Our tests indicate that the automatic shape pairing system achieves additional material savings of 6-8% compared to traditional methods.