

模擬退火法應用在含中空基板之排版

賴元隆 陳蔦任 許博榕
大葉大學機械與自動化工程學系
51591 彰化縣大村鄉學府路 168 號

摘要

一個排版問題主要由兩個過程來完成，一是零件排列次序 (permutation) 之決定，另一是排放零件至基板的排置 (placement) 方法；這兩個過程就主宰了一次排版結果的優劣。如果次序對了，排置方法也滿足需求，這個時候我們就可以找到正解或最佳解；但是往往無法得知正確的排列次序，因此需要利用搜尋法則來尋找最佳解。但是如果排置的方法不佳，即使排列的次序對了，排版出來的結果也不盡完善。本研究針對具間隙零件的排版需求，開發創新的排置演算法 (placement algorithm)，結合模擬退火法 (simulated annealing) 之特點而來進行排版系統之最佳決策，找出最好的排版效果。二維排版問題最佳化的目的乃將特定數量的相同或不同工件 (piece) 排列於基材 (sheet) 上，期使基材使用率最高或浪費最少為目標，如此基板的使用率最高以減少物料成本。本研究更進一步將系統以自動化的方式來呈現，發展一模擬排版巨集指令，將繁瑣的設定工作交由自動系統完成，簡化操作人員技術上的要求。

關鍵詞：排版，排置演算，模擬退火，巨集

Using Simulated Annealing to Solve 2D Nesting Problems on Hollow Sheets

YUAN-LUNG LAI, DING-REN CHEN and PO-JUNG HSU
Department of Mechanical and Automation Engineering, Da-Yeh University
168 University Rd., Dacun, Changhua 51591, Taiwan, R.O.C.

ABSTRACT

A nesting problem can be solved using two processes; one is determining the permutation for sequences of pieces, and the other is applying a placement algorithm to place the pieces onto the sheet. These two vital processes dominate the solutions to the nesting problem. If the sequence of permutation is available, and the placement rule meets the packing demand, then the exact or optimum solution can be determined. However, whether the sequence of permutation is adequate is unknown. Even if the sequence is appropriate for permutation, without a suitable placement algorithm, the final results are unacceptable. Therefore, this study develops a new placement algorithm for pieces with gaps in nesting operations. Under this placement algorithm, the simulated annealing approach is adopted in the optimal decisions of hollow nesting systems. The objective of the two-dimensional optimal nesting system is to determine the most effective use of the stock sheet



under different piece considerations, maximizing the material use rate and subsequently reducing material costs. Additionally, a macro module is included in the system to support automatic operation.

Key Words: automatic nesting, placement algorithm, simulated annealing, macro

一、前言

排版問題在許多產業是常遇到的問題，如紡織業、出版業、製鞋業、鈹金業、傢俱業、建築業與 VLSI 的平面規劃等。一個排版問題主要由兩個過程來完成，一是零件排列次序 (permutation) 之決定，另一是排放零件至基板的排置 (placement) 方法；這兩個過程就主宰了一次排版結果的優劣。本文針對刀具加工排版需求，對具間隙零件的排版需求，利用創新的排置演算法 (placement algorithm)，結合模擬退火法 (simulated annealing) 之特點而來進行排版系統之最佳決策，找出最好的排版效果。最佳化排版的目的乃在將相同或不同型零件物體排列於原料基板上，並使其利用率最高，廢料率最低。而上述各行業排版作業之零件與基材不論屬規則型或不規則型，都需要一套快速而有效之自動排版系統來取代人工作業以降低成本，縮短產品設計與加工之週期時間。基本上，最佳化排版是要搜尋一組每個零件在原料基板上的位置與旋轉角度，讓基板使用率最高，因此，許多搜尋的方法已被提出來解決此一問題，如模擬退火法 (simulating annealing, SA)、塔布搜尋法 (Tabu search, TS) 與基因演算法 (genetic algorithm, GA)。前兩種搜尋的方法基本上屬於局部搜尋，藉由定義解答空間 (solution space) 及鄰近區域 (neighborhood) 之結構，允許對問題解答無改善性 (non-improving) 的變化，定義成本函數 (cost function) 為搜尋的標準，當有一組解答之成本函數低於目前之成本函數則該組解答即取代為目前之最佳解。使用 SA 或 TS 方法作為搜尋的技術時，其解答空間，鄰近區域結構及其成本函數必須適當定義，才能使其成功的機率加大。由於搜尋的方法較耗時，而且並不一定能保證當最佳解存在時能找到其解或逼近其解，許多學者即提出啟發式經驗法則 (heuristics) 或者藉由這些經驗法則與之前搜尋方法結合，期能減少不必要的搜尋，增加排版的效率。

排版 (nesting) 是常應用在裁切 (cutting) 與堆疊 (packing) 上的一個問題，許久以來一直有文獻在探討這個很經典的問題，這樣的一個 NP-Hard 的問題 (non-deterministic polynomial) [16-17, 23]，此類問題至今仍未找到一個多項式複雜度的決定性演算法，且一般相信沒

有多項式複雜度的決定性演算法存在。排版問題在許多的產業都有重要性，我們可由最近的文獻資料可看出，這個問題一直都是許多研究者想要有所突破的技術 [1-2, 4, 11-13, 19, 27-28, 30]。我們作一個簡單說明，如果以五個零件的排版問題為例，假如存在正解的話，全部嘗試的數目為 120 次，我們有百分之一不到的機率會猜到可能的正解；但如果以十七個零件的排版問題為例，全部嘗試的數目高達 355 兆多次，這是個不易達到的大數目，如果要嘗試這種列舉法要消耗非常多的運算資源。相同的狀況，如果我們利用模擬退火法來搜尋最佳排列組合，例如使用擾動次數 10，退火 100 個溫度階段，經過大約 1,000 次的評估，我們可以在這 1,000 次的嘗試中找出相對的最佳解。就因為排版問題的求解是個指數型困難的問題，以致有許多研究嘗試以新的演算方式來改善尋找最佳解的搜尋過程 [3, 5-6, 8-10, 15, 18, 20, 26]。在巨集指令的部份，Yang 與 Dou [29] 的文獻中提出以巨集指令的方法基於不同的電腦輔助設計系統支援協調合作的設計，並分析市面上 CAD/CAM 軟體的模組指令，提出巨集架構。另外在一些文獻中也提出了以參數的方式修改模型 [24-25]。而 Mun 等人 [22] 提出了利用一套標準化模型指令針對市面上所販售 CAD/CAM 軟體的巨集檔案編譯成標準化的巨集檔案，以此為基礎再轉換成其他 CAD/CAM 系統可作讀取的資料，達到巨集檔案溝通的功能。在這篇文獻中也提出了使用巨集檔案的優點有：(1) 它能陳述設計者目的，因為巨集檔案包含設計紀錄。(2) 巨集檔案容易編輯產生零件群組。(3) 檔案容量極小，有利於網路傳輸。(4) 可強化同步工程的效用，提高網際網路的確認機制。

二、排版方法與流程

首先，我們對排版問題作一定義說明；我們對排版作一定義：「將許多較小元件，以適合的方法及適當的位置排入較大的元件內，以符合最大的目標效益。」文獻中對操作的元件名稱不一；在此，較小的元件我們稱之為零件 (pieces)，最大的元件我們稱之為基板 (sheets)，小零件可以被排入至大基板內；由基板選擇類別與零件的選擇類別可組合各種不同的排版問題。



本研究之實務應用較接近二維裝填問題 (2D bin packing problem)；其影響的條件須考慮零件間的距離、使用者介面需顯示編號、設定基板之數目、設定零件之數目、選擇排置基準位置、選擇最佳化的方式、零件是否可旋轉放置與零件是否有經驗上優先順序。以上描述可知，零件的排置方式 (placement algorithm) 與排入次序最佳化搜尋 (searching algorithm) 是排版問題的兩個最主要的課題；零件排列次序的決定，搭配有效的排置方式，兩個因素的結合就會產生最佳的一組解，這是個機率的問題；但是如果排列次序對了，沒有排置方式來完成排放的工作，依然無法取的最佳解。但是如果無法找到最佳解，但是我們可以想辦法能找到相對的最佳解，或是接近最佳解的解。本計畫中為了對基板與零件的中空幾何問題作有效的處理，我們在此研究中有三個主要步驟要完成：創新排置方法、目標函數定義與模擬退火法三個主要步驟。創新排置方法要能跳脫目前文獻上的方法，另找出一新發法來處理中空問題，而且此方法不會比目前的複雜度高。目標函數的定義關係到目前這組解的品質，現有文獻上的目標函數我們將作修正，以增加實務上的價值。最後在我們嘗試排列的眾多結果中，利用模擬退火法來搜尋可能的最佳解。

目標函數的定義要能非常明確地反應出目前解的優劣程度，文獻上常使用的目標函數為常使用在基因演算法中的適應性函數，如式 (1) 所示，他是裁餘值的倒數，因為裁餘值有可能為零，所以加入一個極小的值以避免奇異性的發生；這方程式表示對每一個群體的染色體，其對應出的適應度值是依據這個適應度函數計算而得。

$$Fitness\ value(\pi) = \frac{1}{(\varepsilon + Trimlossvalue(\pi))} \quad (1)$$

其中 $\varepsilon = 2.2204 \times 10^{-16}$ ，裁餘值如式 (2) 所示。

$$Trimlossvalue = \frac{area\ of\ the\ main\ object - sum\ of\ areas\ of\ placed\ pieces}{area\ of\ the\ main\ object} \quad (2)$$

由式 (2) 看來裁餘值必小於 1，而且分子越小代表排入的零件越多，因此裁餘值越小越好，當裁餘值為零時代表零件可完全排滿整個母材。適應性函數值即為裁餘值的倒數，相對地，適應性函數值如果越大表示效果越好。

但此適應性函數有一瑕疵，當兩組排入之零件種類與數目相同時，即使排入次序與位置皆不同，此裁餘值也可能相同。如圖 1 所示，左右兩個排列結果都可排入十個零件，此時裁餘值一樣，或是可以視此二者為相同的目標函數值，無法作出比較判別優劣，這樣的結果在實務上就會有認知上的誤差。因此我們增加一個影響因子，有效影響面積 (effective area)。有效影響面積的定義為被排入之零件的總影響範圍。這個總影響面積越少，代表在相同條件下還可再被利用的面積的機率越大，已排置的零件較緊密，如圖 1 所示粉紅色的部分面積越大代表可再利用的可能性較高。因此如上所述，為方便程式規劃，我們定義適應性函數如式 (3)，面積影響函數值如式 (4)。

$$F(\pi) = Fitness\ value = \frac{sum\ of\ areas\ of\ placed\ pieces}{area\ of\ the\ main\ object} \quad (3)$$

$$Effective\ value = \frac{sum\ of\ areas\ of\ placed\ pieces}{total\ effective\ area} \quad (4)$$

三、自動化演算法

本研究採用新的概念演算法，如圖 2 所示，利用面積分割原理，初始可排區域為母代原始基板，如圖中紫色的區域，當第一個排入的零件確定位置後，基板將被分割成第二步驟的第一代數個較小可排面積，當第二個排入的零件，可排入第一代的可排面積確定位置後，這個被排入面積將被分割成第二代的數個較小可排面積，而且還要與第一代的其他可排面積比對干涉狀況，而歸入在第二代的可排面積內，第一代可排面積即失效。依照這個邏輯疊代演算一直到最後一個零件排入為止；這個面積比對分割的干涉情況可有如圖 3

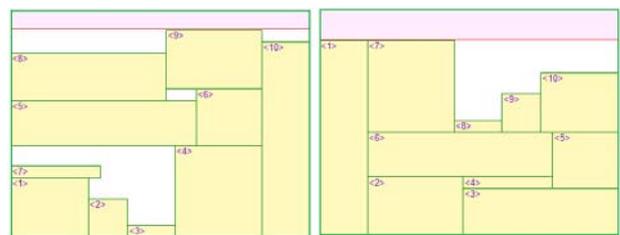


圖 1. 不同的次序排入相同的十個零件



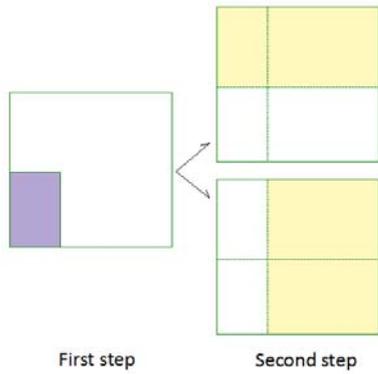


圖 2. 面積分割法 (area-decomposition, AD) 的分割方式

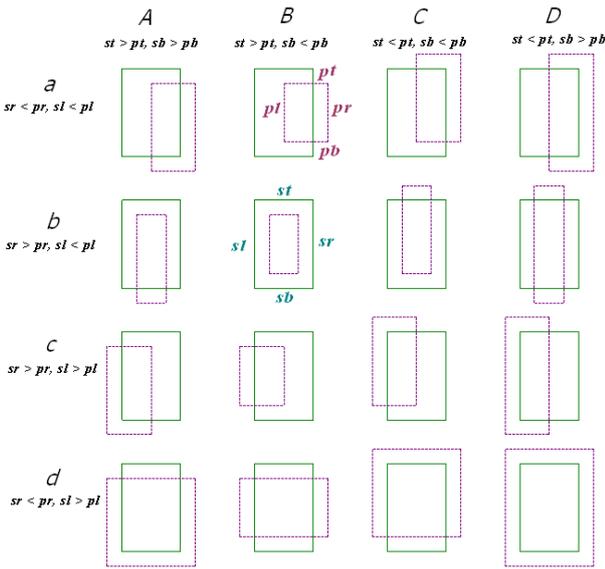


圖 3. 面積分割法的干涉種類

的多種狀況產生，這個作法我們可以馬上得知全部可排的面積，並對每一代的可排面積作排序處理；圖中符號所代表之意義為： p 代表零件， s 代表基材， t 代表上界， b 代表下界， l 代表左界， r 代表右界。因此 st 代表基材的上界， pb 代表零件的下界，其餘以此類推。本研究提出來的排置方法與其他種方法的不同處，在於新方法可以有效處理刀具切削所需要的零件間空隙產生的問題，在下一節中我們將針對範例的實驗結果作敘述與討論。

模擬退火法 (SA) 係模擬凝結物理學中物質結晶退火程序的一種隨機性最佳化演算法，是屬於單路徑尋優技術。SA 於 1953 年首先提出 [21]，但直到 1983 年成功地應用在組合最佳化問題中 [14]，它是蒙地卡羅演算法的推廣，此時這才將它用來解組合最佳化問題。且於 1988 年更利用它

發展出退火神經網路 [7]，使得 SA 理論更加發揚光大。退火是一種物理過程，金屬加熱至一定的溫度後，它的所有分子在狀態空間中自由運動。隨著溫度的下降，這些分子逐漸停留在不同的狀態。在溫度最低時，分子重新以一定的結構排列。這個演算法被希望能滿足兩個條件，第一，當溫度夠高時，系統的組態要能自由變化，也就是這系統的組態能在能量表面自由的移動或稱為它在做無規行走 (random walk)。第二，當溫度變小時，系統的組態在能量表面的移動將受到限制，並逐漸地向低能量的區域集中。

模擬退火演算法來源於固體退火原理，將固體加溫至充分高，再讓其徐徐冷卻，加溫時，固體內部粒子隨溫度升高變為無次序狀況，內能增大，而徐徐冷卻時粒子漸趨有序，在每個溫度都達到平衡狀態，最後在常溫時達到基態，內能減為最小。根據 Metropolis 準則，粒子在溫度 T 時趨於平衡的機率為 $e^{-\frac{\Delta E}{kT}}$ ，其中 E 為溫度 T 時的內能， ΔE 為其改變量， k 為 Boltzmann 常數。用固體退火模擬組合最佳化問題，將內能 E 模擬為目標函數值 f ，溫度 T 演化成控制參數 t ，即得到解組合最佳化問題的類比退火演算法：由初始解 i 和控制參數初值 t 開始，對目前解重複步驟「產生新解→計算目標函數差→接受或捨棄」的疊代，並逐步衰減 t 值，算法終止時的目前解即為所得近似最佳解，這是基於蒙特卡羅疊代求解法的一種啟發式隨機搜索過程。退火過程由冷卻程序表 (cooling schedule) 控制，包括控制參數的初始值 t 及其衰減因子 Δt 、每個 t 值時的疊代次數 L 和停止條件 S 。

模擬退火法簡單的操作方法如下：

1. 首先要針對問題選定目標函數，並且將這個目標函數視為一個廣義的能量函數 E 。
2. 引入一個溫度 T ，這個溫度 T 不一定要具有實際的物理意義。並選擇一個足夠高的溫度作為起始溫度。
3. 在這一個溫度作運算來模擬熱平衡過程，通常使用 metropolis 方法來模擬熱平衡過程，方法如下：
 - (1) 計算目前系統組態的能量 E ，隨機的將系統組態改變一點，並計算變動後的系統組態的能量 E' 。
 - (2) 計算變動成功的機率 $e^{-\frac{\Delta E}{kT}}$ ，並以此為依據來決定系統組態是否改變。
4. 訂定一個退火策略 (或稱為降溫程序 annealing schedule)，由此決定在每一個溫度所停留的時間，及降



溫的比例。

模擬退火演算法可以分解為解空間、目標函數和初始解三部分。解空間：此為問題的所有可能（可行的或包括不可行的）解的集合，它限定了初始解選取和新解產生時的範圍。對無約束的最佳化問題，任一可能解（possible solution）即為一可行解（feasible solution），因此解空間就是所有可行解的集合；而在許多組合最佳化問題中，一個解除滿足目標函數最佳的要求外，還必須滿足一組拘束（constraints），因此在解集中可能包含一些不可行解（infeasible solution）。為此，可以限定解空間僅為所有可行解的集合，即在建構解時就考慮到對解的約束性；也可允許解空間包含不可行解，而在目標函數中加上所謂懲罰函數（penalty function）以壓抑不可行解的出現。目標函數，它是對問題的最佳化目標的數學描述，通常表示為若干最佳化目標的一個組合式。目標函數的選取必須務實面對問題的整體最佳化要求。例如前面所述，當解空間包含不可行解時，目標函數中應包含對不可行解的懲罰函數項，借此將一個有約束的最佳化問題轉化為無約束的最佳化問題。一般而言，目標函數值不一定就是問題的最佳化目標值，但其對應關係應是明顯的。此外，目標函數式應當是易於控制計算的，這將有利於在最佳化過程中簡化目標函數差的計算以提升算法的效率。初始解，此為演算法疊代的起點，經驗顯示，模擬退火演算法是強健的（robust），即其最終解的求得幾乎不倚賴於初始解的選取。

模擬退火演算法的步驟可表示如下：

1. 定義合乎問題的結構空間及能量函數，且於結構空間隨機產生一初始解 C_0 ，並計算其能量函數值 $E(C_0)$ ，其中的 C_0 便是問題所欲求的參數所形成的解型式。
2. 設定起始溫度 T 和降溫係數 α 及適當地設定 k 值，並以初始解當做現解。在本研究中的降溫規劃為 $T_i = \alpha T_{initial}$ ，其中 $\alpha = 1/M$ ， M 為降溫次數。
3. 由現解 C_0 的擾動範圍 s 產生一鄰近解，隨機所產生的亂數，而 s 的初始擾動範圍為整個結構空間，並同時計算其能量函數值 $E(C_1)$ 。如圖 4 所示。
4. 計算鄰近解之能量函數值和現解之能量函數值之差值 $\Delta E = E(C_1) - E(C_0)$ ，並測試，若 $\Delta E \leq 0$ ，則令 $C_0 = C_1$ ；否則，產生一亂數 $R \in [0,1]$ ，假如 $R < \exp(\frac{-\Delta E}{kT})$ ，則令

```

Generation 4 Temperature 0.20000
0: 12 4 7 3 6 16 13 7 9 10 2 4 8 15 11 1 5 4 0.66775 0.78036 172.00005 198.99995
1: 14 12 17 3 6 16 13 7 9 10 2 8 15 11 1 5 4 0.78300 0.81951 197.00000 194.00000
2: 2 14 12 17 3 6 16 13 7 9 10 8 15 11 1 5 4 0.78300 0.81537 194.00005 198.00000
3: 10 2 14 12 17 3 6 16 13 7 9 8 15 11 1 5 4 0.76900 0.78872 195.00000 200.00000
4: 9 10 2 14 12 17 3 6 16 13 7 8 15 11 1 5 4 0.78300 0.79488 198.00000 199.00000
Generation 5 Temperature 0.16000
0: 8 15 12 17 10 1 11 2 9 5 4 6 14 13 7 3 0.78550 0.81374 196.00005 196.99995
1: 16 8 15 12 17 10 1 11 2 9 5 4 6 14 13 7 3 0.74050 0.78310 192.00000 196.99995
2: 1 16 8 15 12 17 10 1 11 2 9 5 4 6 14 13 7 3 0.78550 0.80552 198.00000 196.99995
3: 10 1 16 8 15 12 17 11 2 9 5 4 6 14 13 7 3 0.83275 0.86269 196.00005 196.99995
4: 17 10 1 16 8 15 12 11 2 9 5 4 6 14 13 7 3 0.83950 0.87864 194.00000 196.99995

```

圖 4. 由現解 C_0 產生經由擾動一鄰近解

5. $C_0 = C_1$ 。如圖 5 中重複部分所示。
6. 重覆 m 次步驟 3 及 4，其中 m 為每個溫度下之疊代次數或稱為擾動次數。
7. 進行降溫，並同時減少其擾動範圍
8. 停止準則：若 $T \leq T_{final}$ ，則停止；否則，執行步驟 3-7。

其中 T_{final} 為設計者自訂的參數。在本研究中使用

$$T_{final} = 0.001; T_{initial} = 0.8。$$

四、實驗結果

文獻上少有討論中空問題或是間隙問題之範例，為驗證本研究之方法具實務之競爭性，先利用 Soke 與 Bingul [27] 的 17 個零件的最佳化排版為驗證範例，此範例不具中空條件，零件間也沒有間隙。我們利用與文獻相同之參數條件，內週圈固定為 $N = 5$ ，終止溫度為 0.01，初始溫度由 0.1 至 0.8，擾動方式為調動移動（shifting move），相關參數如表 1 所示。使用模擬退火法搭配 Proportional Decrement 的降溫方式可得到的最佳使用率為 0.64，如果搭配 Lundy and Mees 的降溫方式可得到的最佳使用率約為 0.62。本研究所提出的方法在零件沒有旋轉排置的條件下可得到的最佳使用率可達 0.905，若是搭配零件可以旋轉排置的條件下最佳使用率更可達到 0.922 的滿意結果。在不同的初始溫度的條件下，各方法所得到的結果如圖 6 所示。能量差值由式 (3) 之目標函數而得， $\Delta E = (\frac{1}{F(i)} - \frac{1}{F(i-1)})$ 。

```

Generation 1 Temperature 0.80000
0: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 0.80215 0.81025 198.00000 200.00000 3 4 5 6 12 13 15
1: 10 12 5 4 3 13 16 1 15 14 8 11 6 2 17 7 9 0.81110 0.82765 196.00000 200.00000 4 9 10 12
2: 3 10 12 5 4 13 16 1 15 14 8 11 6 2 17 7 9 0.81110 0.82345 197.00000 200.00000 4 5 6 8 9 10 12 17
3: 16 7 9 11 13 2 17 10 3 1 5 12 4 15 6 8 14 0.83375 0.86675 200.00000 196.99995 9 13
4: 11 16 7 9 13 2 17 10 3 1 5 12 4 15 6 8 14 0.78975 0.82557 194.00000 196.99995 11 14
5: 5 2 12 11 11 13 4 17 15 6 10 7 14 16 3 9 0.80215 0.83111 194.00000 199.00000 6
6: 2 8 3 4 7 15 17 9 10 5 6 1 12 16 14 13 11 0.70990 0.76104 187.00000 197.00000 4 6 10 12

```

圖 5. 產生一亂數 R 時機



表 1. 模擬退火使用不同降溫與排置方式之比較

Method	Placement Algorithm	Permutation Searching	Cooling Schedule	Best Fitness value
Proposed (No Rotation)	AD	SA	$T_i = \alpha T_{initial}$, $\alpha = 1 / M$	0.905
Proposed (Rotation)	AD	SA	$T_i = \alpha T_{initial}$, $\alpha = 1 / M$	0.922
Proportional Decrement (No Rotation)	ILB	SA	$T_i = \alpha T_{i-1}$, $\alpha = M \sqrt{T_{final} / T_{i-1}}$	0.64
Lundy and Mees (No Rotation)	ILB	SA	$T_i = \frac{T_{i-1}}{1 + \beta T_{i-1}}$, $\beta = \frac{T_{i-1} - T_{final}}{M T_{i-1} T_{final}}$	0.62

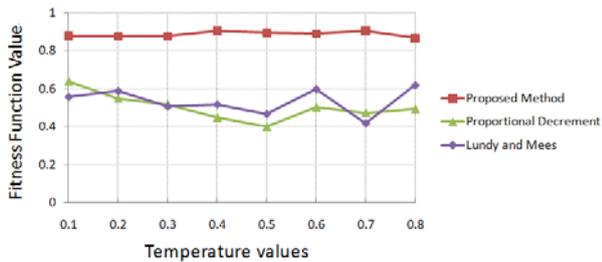


圖 6. 不同降溫方式與初始溫度之比較

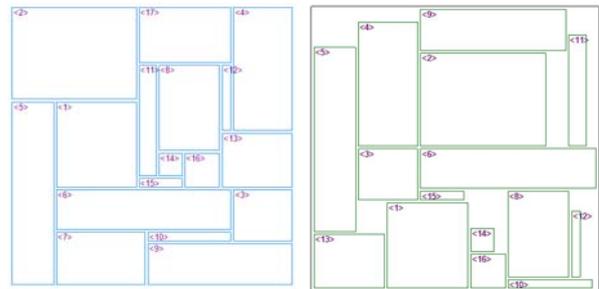


圖 7. 最佳零件排列位置

針對考量刀具切削具間隙的狀況下，首先我們利用文獻上 Soke 與 Bingul 的 17 個零件的最佳化排版的第一個實驗範例，如圖 7 左所示，零件的形狀與最佳解的排列位置，編號表示隨機產生之零件編號。在模擬退火之操作中，我們以控制內迴圈與外迴圈當作變化參數；在同一溫度下，除擾動的鄰解外，最多有 N 個隨機新解產生，在第一個測試中，這個內迴圈數 N 由 2 開始到 10，間隔為 2；外迴圈數 M 固定為 100。第二個測試中，我們取在第一個測試中表現較佳的組合為基礎，內迴圈數 N 固定為 8，外迴圈數 M 由 20 開始增加到 100，間隔為 20。

圖 7 右所示為零件按照排列次序，依序排入基板後的位置，在這次的測試中，我們使用內迴圈參數為 20，經降溫過程，其產生出來的材料使用率為 86.731%。圖 8(a) 所示為零件使用內迴圈參數為 4，經降溫過程，其演算產生出來的材料使用率為 86.785%。圖 8(b) 所示為零件使用內迴圈參數為 6，經降溫過程，其產生出來的材料使用率為 85.489%。圖 9(a) 所示為零件使用內迴圈參數為 8，經降溫

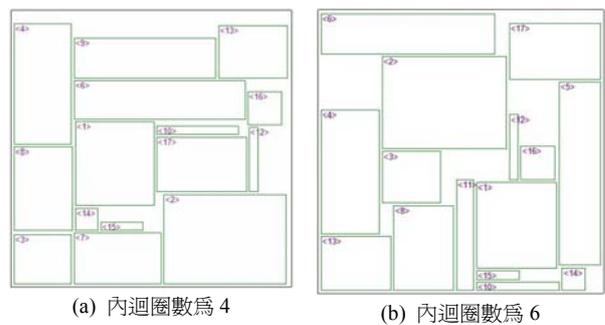


圖 8. 內迴圈數為 4 與 6 時之排列完成結果

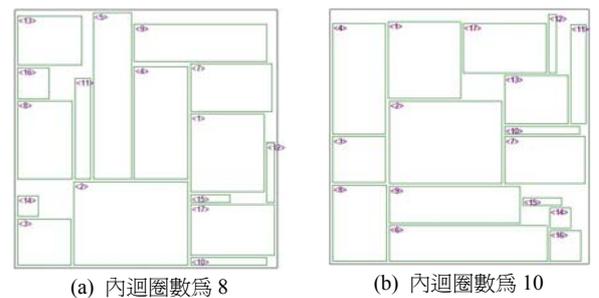


圖 9. 內迴圈數為 8 與 10 時之排列完成結果



過程，其產生出來的材料使用率為 90.511%。圖 9(b) 所示為零件使用內迴圈參數為 10，經降溫過程，其演算產生出來的材料使用率為 89.641%。圖 10 表示在這五種不同內迴圈參數，經降溫過程，其演算產生出來的材料使用率結果，材料使用率平均為 88.736%，結果顯示經降溫過程，內迴圈參數的改變並沒有特別明顯的差異性。在 Soke 與 Bingul 所提出的相同範例中，其各種不同的演算結果皆顯示其面積使用率少有大於 70% 的狀況，表示我們在排置演算法中確實可達到較佳的結果。

同樣的零件形狀，相同的基板大小尺寸，如果考慮使用加工刀徑為 2 mm 的切削刀具，我們即將零件之間隙設定為 2 時，如圖 11(a) 所示，零件的形狀與最佳解的位置，編號表示隨機產生之零件編號。圖 11(b) 所示為零件按照排列次序，依序排入基板後的位置，這次的測試中，內迴圈數固定在 8，我們使用外迴圈數為 20，經降溫過程，其演算產生出來的材料使用率為 86.73%。圖 12(a) 所示為零件使用外迴圈數為 40，經降溫過程，其演算產生出來的材料使用率為 88.93%。圖 12(b) 所示為零件使用外迴圈數為 60，經降溫過程，其演算產生出來的材料使用率為 87.97%。圖 13(a) 所示為零件使用外迴圈數為 80，經降溫過程，其演算產生出來的材料使用率為 86.78%。圖 13(b) 所示為零件使用外迴圈數為 100，經降溫過程，其演算產生出來的材料使用率為 90.18%。圖 14 表示這五種不同外迴圈參數，經降溫過程，其演算產生出來的材料使用率結果，材料使用率平均為 88.12%，結果顯示外迴圈參數的改變並沒有很明顯的差異性，符合模擬退火法的演算過程與結果。圖 15 則是展示一個中空基板，13 個零件分別有不同大小的數量，圖 16 則由退火演算法將 13 個零件依不同的數量要求，在指定的間隙條件下，排入中空基板的結果。

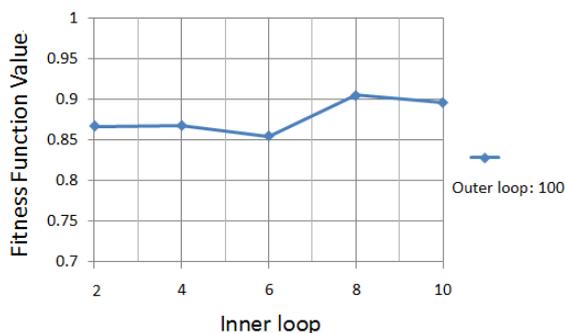


圖 10. 含間隙 2 在各種不同內迴圈參數演算後的結果

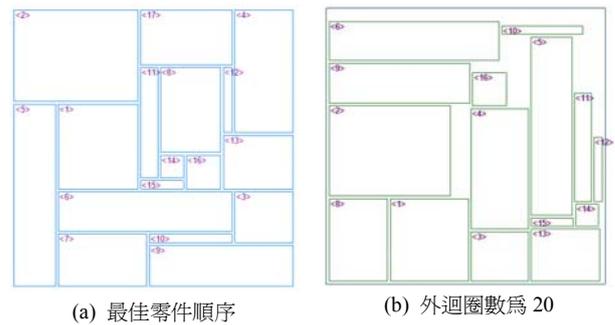


圖 11. 最佳零件順序與外迴圈數為 20 時之排列完成結果

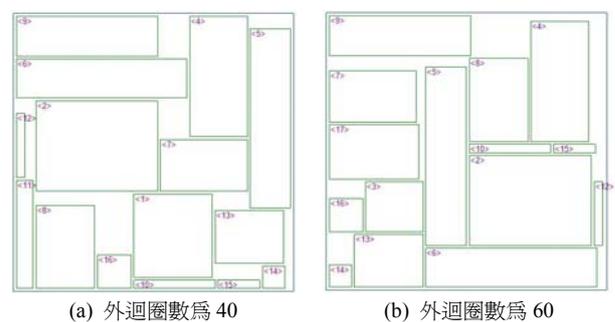


圖 12. 外迴圈數為 40 與 60 時之排列完成結果

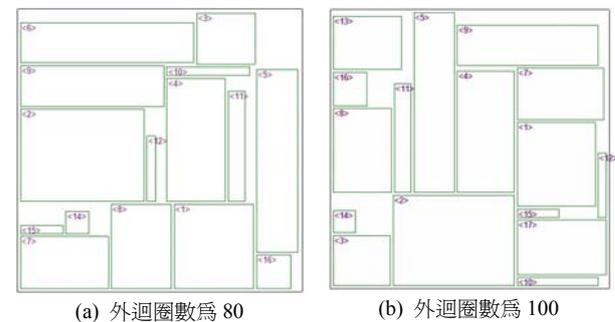


圖 13. 外迴圈數為 80 與 100 時之排列完成結果

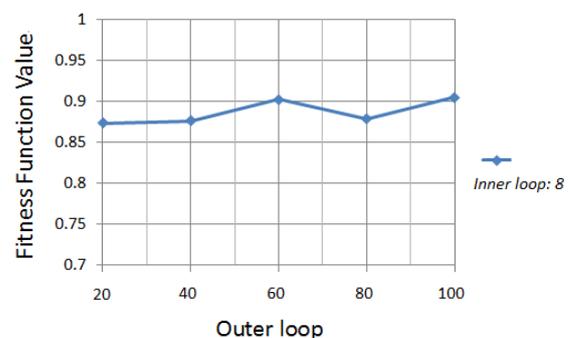


圖 14. 含間隙 2 在各種不同外迴圈參數演算後的結果



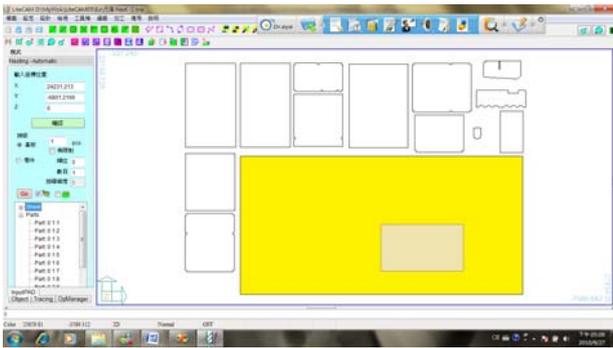


圖 15. 中空基板與 13 個零件

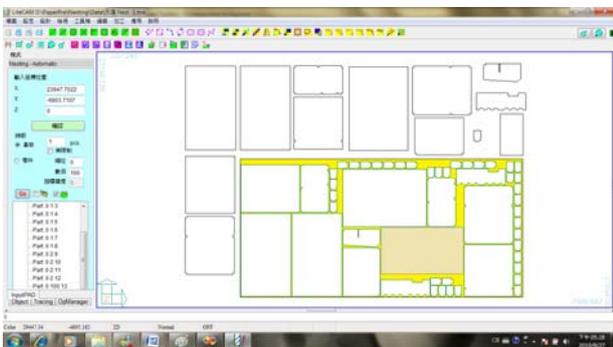


圖 16. 13 個零件排入中空基板的結果

五、結論

本研究的主要目的是針對排版工作在加工切削上的處理，亦即是應用電腦輔助製造之技術，結合學理排版最佳化搜尋分析理論，利用模擬退火法找出局部最佳解，搭配創新排置演算法，針對間隙問題在基板與零件間之切割加工建立製造技術，尤其是在基板在一個部分被使用過的條件下特別適用。在本系統操作後含間隙之排版結果可產生切削加工路徑之狀況，當選定切削加工用刀徑後，排版間隙也可自動被導入至排版系統，讓所有被切削工件沒有過切的顧慮。以本研究之排置理論將可整合以下幾個部分：中空幾何圖形建立、多工件自動化排版、後處理器架構與產生 CNC 機械加工程式碼。利用瞭解板材空間利用最佳化搜尋之基本理論，整合在大型電腦輔助設計製造軟體。

參考文獻

1. Binkley, K. J. and M. Hagiwara (2007) Applying self-adaptive evolutionary algorithms to two-dimensional packing problems using a four corners' heuristic. *European Journal of Operational Research*, 183, 1230-1248.

2. Bortfeldt, A. (2006) A genetic algorithm for the two-dimensional strip packing problem with rectangular pieces. *European Journal of Operational Research*, 172, 814-837.
3. Boschetti, M. A., E. Hadjiconstantinou and A. Mingozzi (2002) New upper bounds for the two-dimensional orthogonal non guillotine cutting stock problem. *IMA Journal of Management Mathematics*, 13, 95-119.
4. Burke, E. K., G. Kendall and G. Whitwell (2004) A new placement heuristic for the orthogonal stock-cutting problem. *Operations Research*, 52(4), 655-671.
5. Caprara, A. and M. Monaci (2004) On the two-dimensional knapsack problem. *Operations Research Letters*, 32, 2-14.
6. Dagli, C. H. and M. Y. Tatoglu (1987) An approach to two dimensional cutting stock problems. *International Journal of Production Research*, 25, 175-190.
7. Engel, J. (1988) Teaching feed-forward neural networks by simulated annealing. *Complex Systems*, 2, 641-648.
8. Fekete, S. P. and J. Schepers (1997) A new exact algorithm for general orthogonal d-dimensional knapsack problems. *Springer Lecture Notes in Computer Science*, 1284, 144-156.
9. Gilmore, P. C. and R. E. Gomory (1961) A linear programming approach to the cutting stock problem. *Operations Research*, 9(6), 849-859.
10. Gilmore, P. C. and R. E. Gomory (1963) A linear programming approach to the cutting stock problem-Part II. *Operations Research*, 11(6), 863-888.
11. Goncalves, J. F. (2007) A hybrid genetic algorithm-heuristic for a two-dimensional orthogonal packing problem. *European Journal of Operational Research*, 183(3), 1212-1229.
12. Hadjiconstantinou, E. and M. Iori (2007) A hybrid genetic algorithm for the two-dimensional single large object placement problem. *European Journal of Operational Research*, 183(3), 1150-1166.
13. Hopper, E. and B. C. H. Turton (2001) An empirical investigation of meta-heuristic and heuristic algorithms for a 2D packing problem. *European Journal of Operational Research*, 128(1), 34-57.
14. Kirkpatrick, S., C. D. Gelatt and M. P. Vecchi (1983) A set of standard modeling commands for the history-based parametric approach. *Science*, 220, 671-680.



15. Lai, K. K. and W. M. Chan (1997) An evolutionary algorithm for the rectangular cutting stock problem. *International Journal of Industrial Engineering*, 4, 130-139.
16. Lodi, A., S. Martello and M. Monaci (2002) The two-dimensional packing problems: A survey. *European Journal of Operational Research*, 141, 3-13.
17. Lodi, A., S. Martello and D. Vigo (2002) Recent advances on two-dimensional bin packing problems. *Discrete Applied Mathematics*, 123, 373-390.
18. Lodi, A., S. Martello and D. Vigo (2004) Models and bounds for two-dimensional level packing problems. *Journal of Combinatorial Optimization*, 8, 363-379.
19. Ma, H. and C. C. Liu (2007) Fast nesting of 2-D sheet parts with arbitrary shapes using a greedy method and semi-discrete representations. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 4(2), 273-282.
20. Martello, S., M. Monaci and D. Vigo (2003) An exact approach to the strip packing problem. *INFORMS Journal on Computing*, 15(3), 310-319.
21. Metropolis, N., A. W. Rosenbluth, M. N. Rosenbluth, A. H. Teller and E. Teller (1953) Equation of state calculation by fast computing machines. *Journal of Chemical Physics*, 21, 1087-1091.
22. Mun, D. W., S. H. Han, J. H. Kim and Y. C. Oh (2003) A set of standard modeling commands for the history-based parametric approach. *Computer-Aided Design*, 35, 1171-1179.
23. Pisinger, D. (2002) Heuristics for the container loading problem. *European Journal of Operational Research*, 141(2), 382-392.
24. Pratt, M. J. (1997) Provision of an explicit constraints schema in the STEP standard. In: *Geometric Modeling: Theory and Practice*, 345-362. W. Strasser, R. Klein and R. Rau, Eds., Springer-Verlag, Tubingen, Germany.
25. Pratt, M. J. (1998) Extension of the Standard ISO10303 (STEP) for the exchange of parametric and variational CAD models. CDROM Proceedings of the 10th International IFIP WG 5.2/5.3 Conference PROLAMAT98, Trento, Italy.
26. Scheithauer, G. (1999) Lp-based bounds for the container and multi-container loading problem. *International Transactions in Operational Research*, 6, 199-213.
27. Soke, A. and Z. Bingul (2006) Hybrid genetic algorithm and simulated annealing for two-dimensional non-guillotine rectangular packing problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 19, 557-567.
28. Wascher, G., H. Haussner and H. Schumann (2007) An improved typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*, 183, 1109-1130.
29. Yang, J. and W. F. Dou (2008) Synchronized collaborative design with heterogeneous CAD systems based on macro semantic commands. *Computer Supported Cooperative Work in Design*, 12, 183-188.
30. Zhang, D., Y. Kang and A. Deng (2006) A new heuristic recursive algorithm for the strip rectangular packing problem. *Computers and Operations Research*, 33, 2209-2217.

收件：100.07.07 修正：100.08.29 接受：100.09.06

