

應用模擬退火演算法求解貨物配櫃 利用率之研究^①

A Simulated Annealing Algorithm Approach to Container Stuffing Problem

薛朝光 (Chao-Kuang Hsueh)^②、李雨築 (Yu-Zhu Li)^③、陳淑玲 (Shu-Ling Chen)^④

摘要

非整櫃貨物之併櫃配裝 (簡稱配櫃) 在目前貨櫃運輸流程中, 係一項非常重要且複雜而需仰賴實務經驗的工作, 由於貨物的種類與尺寸繁多, 配櫃人員往往得耗費許多時間藉助個人經驗或試誤法則來進行排貨和裝櫃, 相當不符合經濟效益。因此, 在兼顧最佳空間利用率及平穩度下, 本研究運用模擬退火演算法之運算架構及特性, 加入實際配櫃時所需考量貨物堆疊限制、擺放型態、貨櫃限重與平衡等重要因素, 結合改良式「下後左角」優先之貨物堆疊準則, 透過 MATLAB[®] (數值計算工具加以程式化, 並經由參數分析和探討, 建構出可用於求解實際貨物配櫃問題的數值模型。同時, 亦發展一 3D 圖像化展示介面, 以便能具體展現各貨物之完整堆疊情形。最後經由實例運算結果顯示, 於貨櫃空間利用率及整體貨物裝載之平穩度, 皆符合配櫃作業所需; 且對於多尺寸、不同堆疊限制、組合貨物含棧板, 或非矩形體等貨物部分之模擬分析, 亦均與現場配櫃情形相當一致, 充分展現本數值分析模型在協助實際配櫃作業上良好的適用性及處理能力。

關鍵字: 模擬退火演算法、配櫃、堆疊問題、平穩度

^① 本文係行政院國家科學委員會補助大專學生參與專題研究計畫 (編號: NSC97-2815-C-019-016-H) 之部分研究成果, 承蒙國科會的經費支持使本研究得以順利完成, 謹致謝忱。

^② 國立臺灣海洋大學商船學系 助理教授 (E-mail: ckhsueh@mail.ntou.edu.tw)。

^③ 國立臺灣海洋大學商船學系 學士 (E-mail: b95710011@mail.ntou.edu.tw)。

^④ 國立臺灣海洋大學商船學系 碩士班學生 (E-mail: 19971014@ntou.edu.tw)。

Abstract

Container stuffing work is a quite important and complicated assignment in container transportation. It is still be accomplished by the workers with actual experiences, but they usually depend mainly on the trial-and-error experiences to load and discharge again and again in order to multiple types and sizes of the cargo could be packed successfully. It may consume much of time and make cost increased. Based on the optimal space utilization and stability conditions, therefore, the purpose of this study is to develop a simulated annealing algorithm approach considering the effects of cargo allocated constraints, container loading limits and stability on packing and integrating with a improved bottom-back-left packing model to solve for actual container stuffing problems. The numerical approach is programmed by MATLAB[®] and a 3D graphic demonstrated interface is also constructed in this study to show the analyzed results specifically. Finally, the computational results indicated that a good container space utilization and stability is good enough to satisfy the requirement of container stuffing assignment. The analyzed results for packing simulation on objects of multiple sizes, irregular shapes, various loading constraints and combination with pallet are agreed well with the practical stuffing work to certify this approach is to be provided with good applicability.

Keywords: Simulated Annealing Algorithm, Stuffing, Container Loading Problem, Stability

壹、前言

海上貨物運送的大容量裝載且相對運費較低廉，使其在運輸業上的重要性不言而喻。目前海運係以貨櫃為主流，除了整櫃滿載貨物 (Full Container Load, FCL) 運

輸外，其餘同一卸貨港但不滿整櫃之貨物 (Less Than Container Load, LCL)，則會送至貨櫃集散站 (Container Fright Station, CFS) 進行併貨裝櫃 (簡稱配櫃) 的作業，以降低運送成本。現行的配櫃作業，係承攬運送業 (forwarder) 於攬到貨之後通知貨

主及公證行，由貨主將貨物送至貨櫃集散站，公證行對其測量材積、形狀、重量和件數後，配櫃人員便根據這些資料、貨物堆疊限制與貨主要求等，進行估算排貨與配置裝櫃的工作。配櫃係一項相當複雜且需多方考量的工作，目前各貨櫃場大都仰賴具多年實務經驗之配櫃人員，採人工作業的方式來進行，基本上一個 20 呎或 40 呎貨櫃平均由 3~4 位人員負責，將各貨物的材質、尺寸、重量、件數等特性與限制條件均納入考慮後，按個人過去堆疊經驗和排貨習慣作為配櫃的依據。然由於貨物之種類與尺寸繁多，加上堆疊限制及配置方法或習慣的不同，往往為了能在貨櫃中堆置更多貨物以減少開櫃數，不僅需反覆嘗試改變貨物堆疊方向和位置，甚至還得將原先已置於貨櫃中的貨物再取出調整次序後重新擺放，因而耗費了許多人力和時間（據實地訪談結果，甚至高達 5 小時以上），實不符合經濟效益；同時亦無法確保此種作業方式每次皆能在穩固平衡下達最佳空間利用率。

貨物配櫃相較於一般物流或倉儲等產業所探討之容器裝載堆疊問題 (Container Loading Problem, CLP)，其最大的差異在於配櫃作業完成後，還需藉助機械力量將貨櫃吊放至船上，若貨櫃荷載分配不均，勢將造成吊櫃作業時之困難，甚至引發傾覆的危險。雖現有之相關研究已由早期處理一維倉儲、二維排列擴展至三維容器堆疊問題為主，但能實際考慮貨物重量、重

心平衡、貨櫃限重及平穩度要求的多尺寸貨物配櫃有關研究，則相對少了許多。因而如何在兼顧貨載平衡與穩固的前提下，研擬出可滿足配櫃需求的貨物堆疊原則及搜尋演算模式，並運用電腦快速及有系統地數值化運算，能適時地將所需裝載之貨物配置擺放到貨櫃中，同時達到最佳空間利用率，以輔助甚至可取代人工作業，來提升配櫃效率且降低營運成本，實為一項相當值得探討與研究的課題。

配櫃問題基本上係屬多重限制組合最佳化之決策問題，對於組合最佳化問題的求解，由於問題結構複雜，且隨著問題規模增加，解題時間將呈現指數遞增之情形。所以近年來之研究通常避免使用雖能保證獲致最佳解，但卻演算耗時的數學規劃工具，而改採較能兼顧解算效率與品質之啟發式演算法，如基因演算法 (Genetic Algorithm, GA)、禁忌搜尋法 (Tabu Search, TS) 或模擬退火演算法 (Simulated Annealing, SA) 等萬用型啟發式 (metaheuristic) 演算法；其中，模擬退火演算法利用機率性攀爬搜尋演算法則 (probabilistic hill-climbing search algorithm)，結合最陡坡降法 (steepest descent method) 與隨機之方式，在兼具迭代改善法的特性及跳脫區域最佳解之能力下，來搜尋能量函數的總體最小值 (吳泰熙等，2007)；相較於其他全域最佳化方法，SA 於處理複雜問題時僅需目標函數資訊且演算程序易於理解與建構 (Nahar et

al., 1986), 同時使用者亦能針對不同問題發展其適合的運算架構等優點, 因而迄今已被大量運用於求解困難的決策問題。故本研究旨在針對配櫃之實務需求下, 運用模擬退火演算法兼具迭代改善法和跳脫局部最佳解的尋優機制, 建構出貨物堆疊排序的解算程式, 並配合柯宜伶 (2008) 之改良式「下後左角」優先堆疊準則, 將貨物與貨櫃之載重限制與平穩度等重要因素均一併納入考量, 發展出可用於求解實際貨物配櫃問題之分析模型; 同時亦開發一 3D 圖像化展示介面, 以便能具體展現各貨物之完整堆疊情形, 期能有助於提供日後配櫃人員於實際作業上之參考應用。

貳、貨櫃 / 容器裝載問題

自 1990 年起長方體物件堆疊問題逐漸受到學術界的注意, 進而開始探討此類裝載問題; 其中, 棧板裝載問題 (Pallet Loading Problem, PLP) 廣為大家所討論, 棧板雖無側面邊界的支撐, 但貨物堆放仍不得超過棧板面積, 所以類似於容器裝載問題。所謂容器裝載問題 (或稱堆疊問題), 基本上係於已知尺寸大小之容器中, 按某特定的堆疊原則在不得超出容器邊界的前提下, 依序將物件堆疊配置在容器內, 直至所有物件均已置入容器中, 或容器內之剩餘空間已無法再配置任何未置入之物件為止。這類問題在本質上是屬

多重限制的複雜組合最佳化問題, 意即 NP-Hard (non-deterministic polynomial time hard) 之問題 (Garey and Johnson, 1979), 隨著問題所探討的因素與限制愈多, 其複雜度相對提升, 計算最佳解所需時間亦呈指數劇增。由於實際貨物裝載為三維空間, 故現有文獻之蒐集係以三維堆疊問題為主, 但具協助處理實務貨物配櫃問題的相關研究明顯較少, 至於同時兼顧荷載限制及平穩度考量, 以求最佳空間利用率之研究則相對更少。

2.1 貨櫃裝載之空間利用率

在單一尺寸矩形體物件與單一矩形體容器之裝載問題上, 張美忠 (1992) 探討單一尺寸貨箱棧板裝載問題, 不考慮長方體物件的高度, 將其簡化成二維問題, 並發展一整數規劃 (integer programming, IP) 模式求解, 再以此模式為基礎而延伸應用於多種規格長方體的棧板裝載問題上。George (1992) 將棧板邊長部分均以一維方式考慮, 再將其邊長依貨物長度分為多塊區域, 使用所發展之方法將每塊區域的容積利用率達到最大, 最後將所有的容積利用率相加即為總容積利用率。Liu and Hsiao (1997) 則提出一個解決三維棧板裝載單一種類箱子的方法, 將三維棧板中長方體物件不同的三個面各視為二維的問題進行排列, 且具相同高度之長方體才能排在同一層, 同時加入物體間接觸面積相對關係之穩度考量, 因而物件在層與層堆

疊時才能平穩，接著再以五階段啟發式演算法求得最佳排列組合。其次，就多尺寸矩形體物件與單一矩形體容器之裝載問題方面，George and Robinson (1980) 將所有物件由大到小排列，利用物體之高度與容器底面積所包含的範圍視為一區塊進行堆疊，接著擺放的物件須在此區塊內，當此區塊擺放不下時，則再產生第二個區塊，重複以上步驟直到所有物件全部堆疊完畢，由於每個區塊皆獨立堆疊完成，故會浪費許多小空間。Abdou and Yang (1994) 所探討之堆疊方式是以容器的底面積為準，將高分成幾個區塊，所有物件依照相同高度歸類同一群組後分別堆疊至適當的區塊，最後再把全部的區塊疊在一起。由於物件的高只能有特定幾種尺寸，且需具倍數關係，以至於實際應用上受到限制。而 Ngoi et al. (1994) 依物件堆疊位置與方向的空間浪費最小為考量，發展出一啟發式的堆疊方法，此法可選擇由容器的底下向上或由後往前兩種方式進行堆疊。並使用陣列的方式記錄物件擺放之座標，以增進計算效率。Bortfeldt and Gehring (2001) 提出另一種採垂直層之堆疊模式，先將所有長方體物件堆疊成數個垂直層，接著逐一將各層配置於積載圖 (stowage plan) 中，並考慮數個實際作業上會影響排列之因素，應用混合基因演算法以階段性計算之概念進行擺放順序運算。Chien and Deng (2004) 係將貨櫃以三維形式做分解，在考慮貨物形狀之條件下，研究不同貨物組合

模式，使用基因演算法求取最佳解，並建構發展出互動式三維單一貨櫃支援決策系統，將貨物在貨櫃中的位置加以呈現。但其貨物擺放的原則係依據貨物大小為堆疊順序，而未考慮其重量與穩定平衡等因素，則無法確保該配櫃結果能滿足實際作業上穩定安全之所需。李兆涵 (2006) 則根據現有宅配車輛的作業特性，考量空間利用率及卸貨順序，改良 SA 演算法之啟動與擾動機制，發展一混合模擬退火演算法來求解三維容器裝載問題。

至於多尺寸矩形體物件與多個相同尺寸矩形體容器之裝載問題上，Bischoff and Ratcliff (1995) 對單一長方體容器之文獻演算法進行評估，而提出一可應用至多個相同尺寸長方體容器堆疊問題的演算法。林光等人 (1995) 根據承攬運送業於不同貨物訂單配櫃情況之所需，以貨櫃滿載密度 (最大限重/最大容量) 原則，及最少貨物訂單拆解和隨機排列模式，曾分別提出啟發式密度配置法與隨機排列法來個別處理不同狀況下之配櫃問題，而建立一套簡易之交談式配櫃決策支援系統，以求得使用櫃數最少下之滿載最佳解，但未將實際貨物重量、堆疊限制與平穩度等因素納入解算之考量為其限制。Scheithauer (1999) 針對多尺寸長方體物件堆疊至單一和多矩形體容器之運算架構，建立一鬆弛線性規劃模式，可求得較佳之上下限值 (tight bounds)。Terno et al. (2000) 使用分枝界限法 (branch-and-bound method) 來逼近，以

求得最少的矩形容器數量與最大容器使用率。亦即先找出矩形容器數量的上界與下界，並由容器的上界開始，將所有長方體物件均分給各容器來進行堆疊，然後逐次減少一個容器，同時重複上述動作，直到容器無法再減少為止。Eley (2002) 針對單一及多尺寸長方體容器之堆疊問題將穩定度及重量分佈兩項影響物體排列之因素納入考慮，並採用貪心法則將各物體依其尺寸安排數個區塊，再以樹狀搜尋方式尋求改善而提出一演算法。楊佳燕 (2005) 則根據容器成本與容量、物件體積和卸載順序，透過叢集 (clustering) 技術將物件先依其種類加以分群處理後，考慮裝填穩定度、承載力與卸載順序等因素，並以最低容器成本、最大空間使用率及最順暢卸載順序為目標，再利用 GA 演算法結合啟發式規則，求解多重限制之容器裝填問題。

2.2 具重量或穩度考量之相關研究

實務上之裝載，除了貨物重量與承重限制外，貨櫃也具有承載方面的限制，當總貨物重量超過貨櫃之承重限制時，在完成配櫃作業後，不僅橋式起重機無法吊放貨櫃，貨櫃本身之結構也將有損壞的可能。除此之外，在運輸過程中，無法避免有搖晃之現象，若貨物擺放為不平穩之狀態下，則更易造成貨損。因此，貨物之重量分配，需透過適當的規劃才能保證貨櫃

於吊放作業上之安全無虞。Gehring et al. (1990) 發展 GA 演算法求解三維長方體物件堆疊的問題，係將體積大小類似的物件集合為一個群體，考慮重量因素後再加以堆疊，並由 GA 演算法進行多次計算以求得近似最佳解，但卻無法提供使用者確認貨物之重量分配。Bischoff and Ratcliff (1995) 提出分別考慮穩定度及層堆疊之演算法，其穩定度的定義為物件之堆疊結果不得有傾斜移動之情形，且容器亦無超重的現象，同時在演算過程中不僅注重容積使用率，更強調物件堆疊之穩定度，雖未針對荷載平衡的部分做考量，但其物件堆疊方式仍具有相當之參考價值。Gehring and Bortfeldt (1997) 曾提出以塔 (tower) 形堆疊來擺放物件，亦即將物件中底面積較大者置於最下方，而上方堆疊之物件底面積需小於其下方已放置好的物件，如此重複擺放而成塔形堆疊。完成數個塔形後，再考慮交換各個塔形間的物件，並以啟發式演算法來控制其運算機制。Ratcliff and Bischoff (1998) 將貨物單位荷重和重心概念加入實際計算中，而擺放原則以同類貨物由下往上逐層堆置於同一平面，以各平面作為選擇基準，並假設貨物無法倒置，由於將同尺寸貨物擺放在一起，可減少不同貨物之間的空間浪費。Davies and Bischoff (1999) 提出可事後調整堆疊方式之演算法，試著同時重視空間利用率與重量之均勻分佈。田邦廷 (2002) 則以容器較

底部且靠內側之位置為優先配置，建構出「下後左角」優先啟發式物件堆疊原則，考慮物件堆疊方向及接觸面積的穩定度，並分別使用 SA 演算法與 GA 演算法來求解長方體物件之三維堆疊問題。計算結果雖可得不錯的容積利用率，但卻未將物件與容器之承重限制與荷重平衡等因素納入考量。李起毓 (2007) 結合蟻群演算法 (Ant Colony Optimization, ACO) 和 GA 演算法求解空間裝載利用率最佳化問題，將物件先聚集成塔集 (tower set) 後，考量物件重量與擺放穩度再進行堆疊，且為降低問題複雜度以階段性方法求解，並於模式計算完成後，又嘗試將未放入的物件填補到容器剩餘的空間，以增加空間利用率。柯宜伶 (2008) 則在處理貨物配櫃問題上，將荷載限制與平穩度等實際堆疊時之重要因素一併納入考量，而提出改良式「下後左角」優先堆疊準則。

參、研究方法

併櫃貨物由於其種類與尺寸繁多，若再加上堆疊限制與配置方法的不同，往往使得實際之配櫃作業相當繁複且耗時。一般而言，不同尺寸貨物堆疊擺入貨櫃的順序，與其擺放方式和位置，將是影響容積利用率高低的主要因素；然而，與現有貨物配置問題相比，其最大的差異在於配櫃作業完成後，還需將貨櫃吊放至貨櫃船，

以進行後續運送流程。倘若貨櫃的荷載超出限制或分佈不均，便將造成吊櫃作業上的困難，而突顯出尤需考量貨櫃限重與平穩度於貨物配櫃問題上之重要性。因此，以下即針對本研究不同尺寸貨物在以穩固平衡為前提之考量下所需的貨物堆疊擺放原則，及作為決定貨物堆疊順序之演算法等加以說明。

3.1 考慮荷載及平穩度下之貨物堆疊原則

不同的物件堆疊方式不僅會改變其擺放型態和整體之空間利用率，同時亦將影響堆疊完成後各物件及容器能否達到荷載平衡與穩固的狀態。由相關文獻中可知物件擺放之方式依其堆疊法則的不同，概可分為層堆疊法、平面堆疊法及塔狀堆疊法等三類。在容器裝載問題發展之前期以層堆疊法最受學者所採用；至發展中期各研究為能提供實務上之應用，開始逐步加入貨物重量、載重限制與減少各物件間因尺寸差異所致空間浪費的概念，因此平面堆疊法隨之產生；而塔狀堆疊法則是因應實際問題所需及複雜度過高而提出的分階段處理模式。

田邦廷 (2002) 提出「下後左角」優先啟發式堆疊原則，其概念源自於 Bischoff and Ratcliff (1995) 及 Ratcliff and Bischoff (1998) 之平面堆疊法，係將矩形容器的長、寬、高等三邊分別以三維座標的 X 軸、 Y 軸、 Z 軸來表示。每一物件與容器

均有八個角隅點，物件堆疊時以其「下後左」之角隅點，由容器的「下後左」角(即座標原點 $(0,0,0)$) 位置處開始進行堆疊，且每置入一個物件，物件會與容器或

已置入的物件產生新的座標點，而這些新的座標點將作為下一個物件可以考慮堆疊的配置基準點，如圖 1 所示。

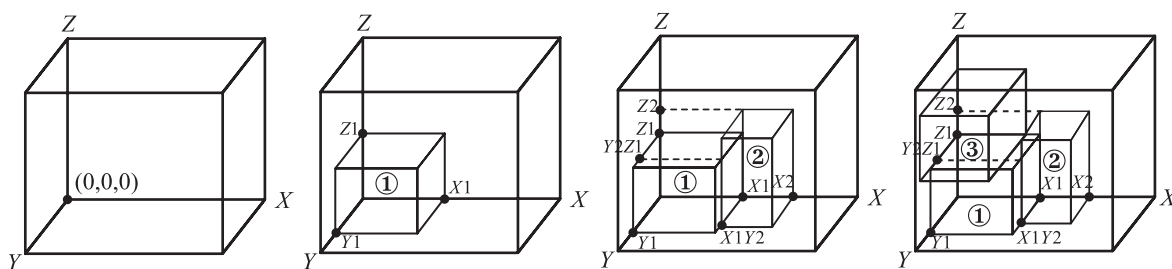


圖 1 「下後左角」優先啟發式堆疊原則 (田邦廷, 2002)

物件 ① 置入容器後，其長、寬、高分別與 X 軸、 Y 軸、 Z 軸相交而產生 $X1$ 、 $Y1$ 和 $Z1$ 等三個參考座標點，因此擺入物件 ② 時便有此三個基準點可供配置選擇。在選擇基準點時，需依照「下後左」之原則，即優先搜尋下方的基準點，愈下面愈好；接著是後方的基準點，愈後面愈好；最後則考慮左方的基準點，愈左邊愈好。故圖 1 中物件 ② 在堆疊時應先選擇 $X1$ 基準點，若 $X1$ 無法堆疊則選擇 $Y1$ ，若 $Y1$ 也無法堆疊才選擇 $Z1$ 作為配置的基準點。圖中物件 ② 置入後便又新增了 $X2$ 、 $X1Y2$ 兩基準點及 $Z2$ 、 $Y2Z1$ 兩投影座標點；於是，物件 ③ 便依序有 $X2$ 、 $X1Y2$ 、 $Y1$ 、 $Z1$ 、 $Y2Z1$ 和 $Z2$ 等六個配置基準點可選擇。如圖所示，若物件 ③ 無法堆疊至 $X2$ 基準點上，可先對其進行水平或垂直向之翻轉，以改變堆疊型態來置入容器內；若仍不可行，便根據物件排列

順序改採其他尚未堆疊的物件；假使各物件均無法完成堆疊，則依「下後左」之原則，更換次一個可供選擇堆疊的基準點。由於所有物件皆無法堆疊到 $X2$ 、 $X1Y2$ 和 $Y1$ 等三個基準點，因此物件 ③ 最後堆疊至 $Z1$ 基準點。重複此「下後左角」優先啟發式堆疊原則，直到所有物件均堆疊完畢或已無法再堆疊才終止此程序。

而柯宜伶 (2008) 所提出的改良式「下後左角」優先堆疊準則，除參考田邦廷 (2002) 之物件堆疊模式外，亦將貨物承重限制、堆疊旋轉方向、接觸面積、貨櫃限重與平穩度等因素均一併納入考量，並加入剩餘空間可否提供具承重限制貨物再利用之二次檢核機制，同時改善原「下後左角」優先啟發式堆疊原則中貨物配置投影基準點的產生方式，如圖 2 所示，簡述如下：

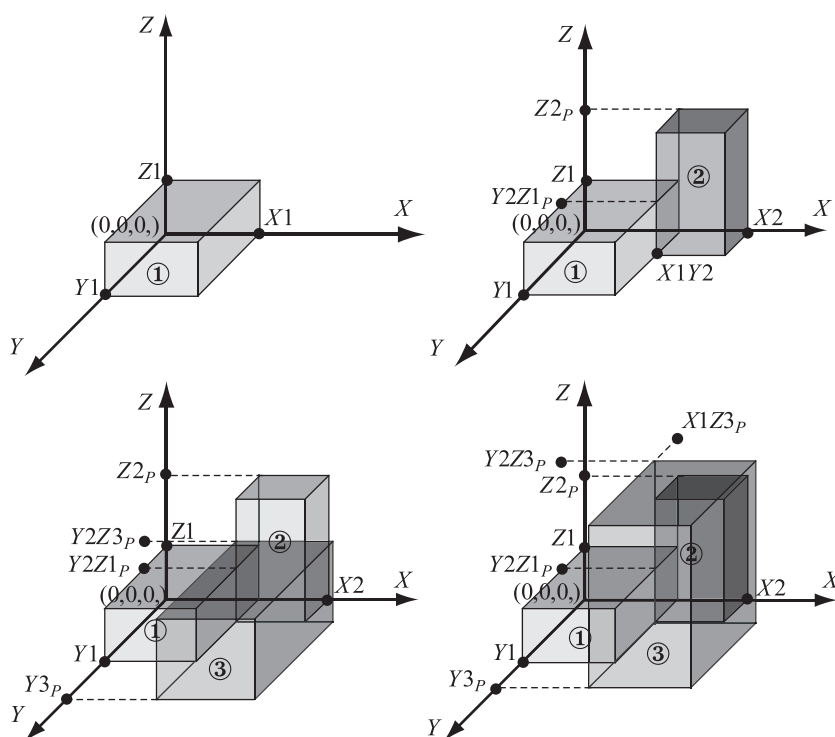


圖 2 改良式「下後左角」優先堆疊準則之配置基準點示意圖 (薛朝光等, 2008)

1. 若後續堆疊之貨物與已置入貨櫃中之相鄰貨物較高且短時，將向左側新增兩個投影座標點；但若僅較鄰近貨物為短時，則將只向左側產生一個投影座標點；
2. 若後續堆疊之貨物較已置入貨櫃中之左側相鄰貨物為長時，將依其是否高於該鄰近貨物，而向左側新增一或兩個投影座標點；
3. 若後續堆疊之貨物較已置入貨櫃中之後方相鄰貨物為高時，將向後方新增一個投影座標點；同時也將視其是否與左側鄰近貨物較長或較高，而個別向左側新增一或兩個投影座標點。

這種堆疊方式的優點在於，其不僅能有系統地建立貨物配置基準點，並考量貨物堆疊與裝櫃之限重條件與平穩度，同時亦可在盡量減少各貨物間因尺寸差異或不同堆置型態，以及具承重限制貨物實際上可擺放卻未擺放等所致空間浪費的原則下，有效簡化堆疊貨物時所需考慮眾多可行擺放位置之決策程序。

3.2 模擬退火演算法

模擬退火演算法最早是由 Metropolis et al. (1953) 所提出，但自 Kirkpatrick et al. (1983) 開始使用此法來求解組合最佳化問題後，該演算法才得以受到重視並命名為

模擬退火演算法。SA 演算法係屬高階的萬用型啟發式演算法，結構上包含退火程序 (annealing procedure) 與 Metropolis 法則兩部分。其中，退火程序乃是模擬物質由熔融狀態下經由緩慢降溫的過程，其晶體結構亦從溫度高時系統高能量之多種排列型態，隨著溫度逐漸下降而轉趨於穩定；當溫度降到最低時，系統能量最小且晶體結構之排列將達到最佳穩定的狀態。因此，若將組合最佳化問題比擬退火程序，晶體結構的排列情形視為組合最佳化問題的可行解，能量狀態代表目標函數值，則最小能量狀態下之晶體結構的排列結果即為組合最佳化問題之最佳解。而在 SA 演

算法迭代的求解過程中，若鄰近解之目標函數值比現行解佳，便以鄰近解取代現行解；但當鄰近解的目標函數值比現行解差時，則將根據波茲曼函數 (Boilztzman function) 相較於隨機亂數間之正負關係來讓上升移動偶爾發生，亦即隨溫度高低透過機率的方式以取決是否接受此較劣解成為現行解，這便是所謂的 Metropolis 法則。Metropolis 法則使 SA 演算法在疊代的搜尋過程中，能夠具備跳脫出區域最佳解之能力，同時再經由降溫退火的過程，讓組合最佳化問題的解得以逐步收斂而趨向於全域最佳解。至於模擬退火演算法之基本運算流程如圖 3 所示，其相關參數概可

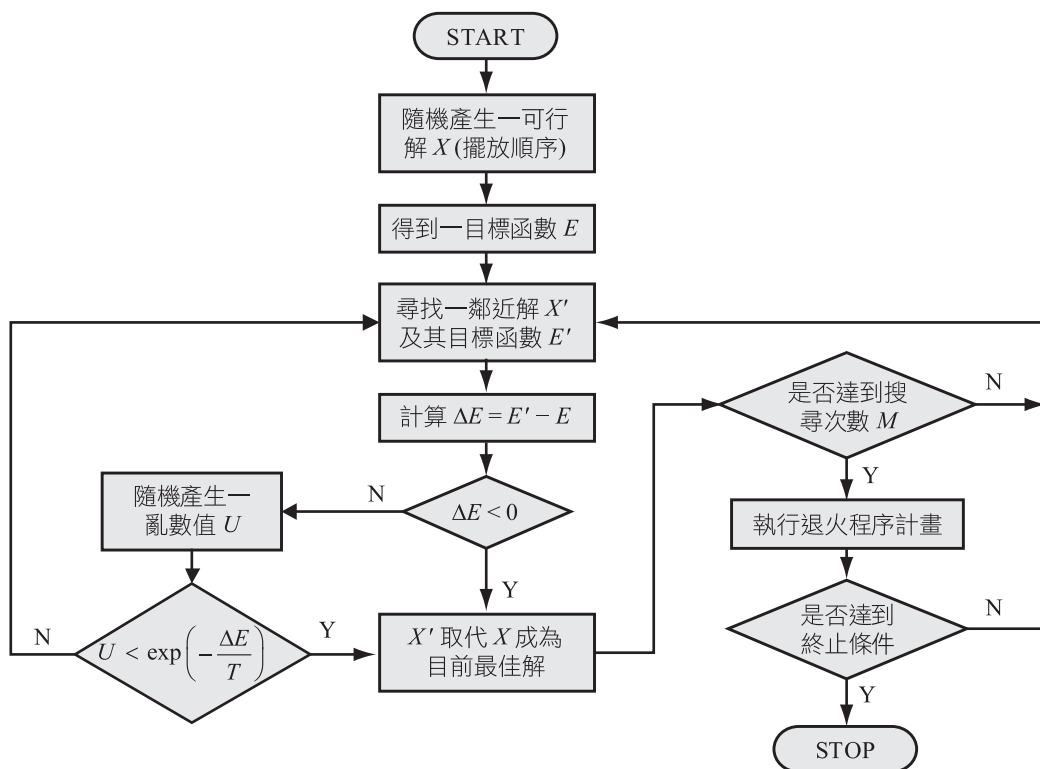


圖 3 模擬退火演算法之運算流程示意圖

說明如下：

1. 初始解

初始解的設定對於後續搜尋結果的品質有相當程度的影響，也會影響到搜尋的效率。

2. 移步法則

透過有效之移步設計，現有解將可逐漸移向表現更加之鄰近解，最終收斂至最佳或近似最佳解。

3. 波茲曼機率分佈

描述一個系統的表面配置。假設在一平衡溫度下，系統表面的組成分子在空間中出現之機率，是依照分子存在空間中之能量所決定的。

$$P = \frac{\pi(r)}{\pi(q)} = \exp\left[\frac{-(E(r) - E(q))}{kT}\right] \quad (1)$$

$$= \exp\left[\frac{-\Delta E}{kT}\right]$$

其中，

$\pi(r), \pi(q)$ ：分子出現在空間中某一位置 r 或 q 的個別機率；

$E(r), E(q)$ ：分子於空間中 r 或 q 位置時所個別具有之能量；

k ：波茲曼常數；

T ：平衡時的溫度；

若 $P > 1$ (即 $\Delta E < 0$)，表示位置 r 的能量必定小於位置 q ，此時位置 r 便取代位置 q 成為新的表面配置，即鄰近解取代現行解成為最佳解。若 $P \leq 1$ ($\Delta E \geq 0$)，

SA 演算法並非直接忽略，而是利用隨機產生範圍介於 0~1 的亂數值 U 相較於機率值 P 之正負情形，作為判斷是否接受此較劣解成為現行解的依據，亦即 $P \leq U$ 便接受；反之，則忽略。於是，由觀察式 (1) 後可得知，溫度高時較劣解被接受的機率相對較高，但溫度逐漸下降後，其被接受的機率亦隨之減少。

4. 初始溫度

初始溫度和實際的物理意義無關，屬於控制參數之一；但溫度的設定在 SA 演算法中則扮演極為重要的角色，既可當作終止演算法的結束條件，避免落入無窮迴圈；亦可藉溫度變化及目標差異，透過波茲曼函數來判斷是否接受較差解，以不至於陷入區域最佳解。

5. 退火冷卻率

表示退火過程中控制溫度下降的速率。該值愈大代表降溫的速率緩慢，SA 演算法雖有足夠搜尋空間，但卻影響求解效率；若其值愈小則降溫速率太快，可能導致 SA 演算法無法完整搜尋。

6. 馬可夫鏈長度

主要是用來控制在每個溫度下搜尋的次數。若其值太少，SA 演算法的執行時間雖可縮短，卻無法有效改善解的品質；但若設定過多，雖然解的品質與效果提升，卻也使得執行時間拉長，而降低演算法的效率。

7. 終止條件

在於決定運算程序何時結束，以避免落入無窮迴圈。

肆、程式開發及參數分析

求解貨物配櫃問題，基本上需根據實際作業建構所需之貨物堆疊模式後，再透過用以決定貨物排序的啟發式演算法於外部控制的機制，反覆執行運算來改善內部的裝載堆疊情形，直至求解品質能滿足所需為止。因此本研究考量貨物配櫃之荷載限制與平穩度要求下，運用模擬退火演算法於處理組合最佳化問題上的執行架構及計算程序，並結合改良式「下後左角」優先之貨物堆疊準則，透過 MATLAB[®] 程式化模組撰寫與開發加以整合，同時經由參數分析和探討，建構出可用於求解實際貨物配櫃問題之數值模型及 3D 圖像化展示介面。

4.1 改良式「下後左角」優先堆疊準則模式建構

為了同時考量貨物承重限制、堆疊旋轉方向、接觸面積、貨櫃限重與平穩度等因素，來滿足實際貨物配櫃所需的堆疊方式，本研究依據柯宜伶 (2008) 之改良式「下後左角」優先堆疊準則作為貨物堆疊的處理方法，其流程圖架構如圖 4 所示，運算步驟則可歸納如下：

步驟一：

利用模擬退火演算法所產生的貨物排列組合，對照不同貨物的數量，計算貨物的總數，公式如下：

$$t = \sum_{i=1}^T \text{cargo_amount}(i) \quad (2)$$

其中，

t ：貨物總數；

T ：貨物種類；

i ：貨物種類之序號；

cargo_amount ：各類貨物的數量。

步驟二：

設定初始基準點，作為待堆疊貨物的擺放位置參考點。接著放入貨物並進行貨櫃限重檢定，其檢定公式如下：

$$\text{totalweight}(i) = \text{totalweight}(i) + \text{cargo_weight}(S(\text{position})) \quad (3)$$

其中，

totalweight ：貨物的總重量；

i ：放入貨櫃的貨物數目；

cargo_weight ：各類貨物的重量貨物重量；

S ：全部貨物的堆疊排序；

position ：貨物在堆疊排序中的位置。

步驟三：

高度檢定。判別貨物可否擺放在基準點的依據之一，利用基準點位置加上貨物的高度值是否在貨櫃高度之範圍內；若在範圍內，則表示該貨物有機會擺放於此基

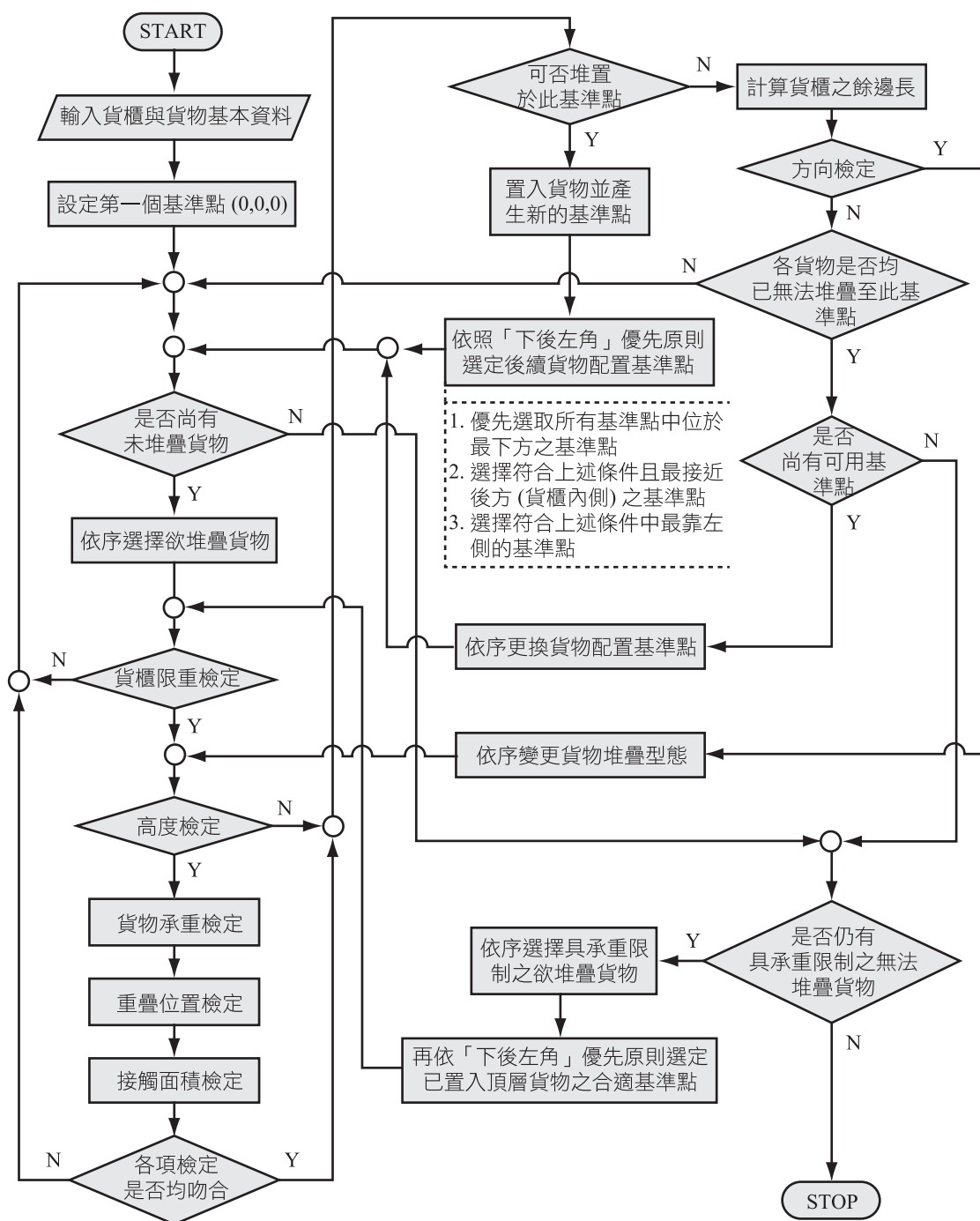


圖 3 改良式「下後左角」優先堆疊準則之流程架構圖 (薛朝光等, 2008)

準點上，判別公式如下：

$$Z1 + CH(S(position)) \leq Zc \quad (4)$$

其中，

Z1：原基準點高度；

CH：貨物的高度；

S：全部貨物的堆疊排序；

position：貨物在堆疊排序中的位置；

Zc：貨櫃的高度。

步驟四：

貨物承重檢定。作為貨物上方不可重壓的條件設定，避開貨物被壓在下方的情形，其流程架構如圖 5 所示。

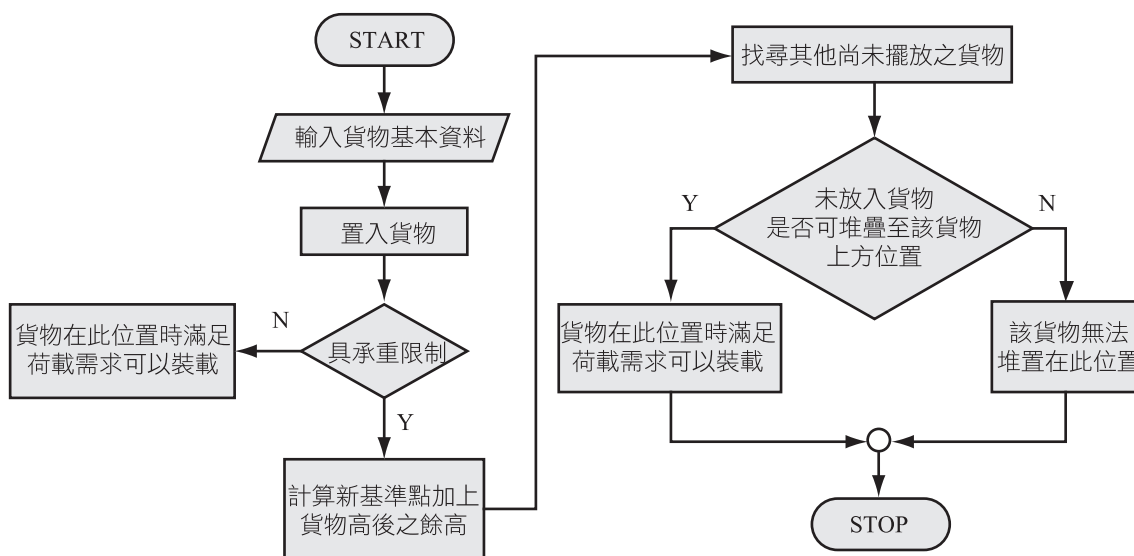


圖 5 貨物承重限制檢定之流程架構圖 (薛朝光等，2008)

步驟五：

重疊位置檢定。由於程式只能進行數學運算並不能自行判斷貨物是否有重疊的情形，因此須利用多項判別式作為輔助工具，檢核流程如圖 6。

步驟六：

接觸面積檢定。判別貨物可否放置於基準點的依據之一，當上方貨物並未完全與下方貨物接觸，或接觸面積小於上方貨物面積之 1/2 時，便會產生不平穩的狀

態，上方貨物可能因傾倒而貨損，因此須對接觸面積進行計算，其流程如圖 7 所示。

步驟七：

若步驟四、五、六檢定皆符合要求，且確認該貨物之各邊長均位於貨櫃之容積範圍內後，便進行貨物擺放並產生新的基準點。同時將已放入貨物的基準點設為無限大，再按照「下後左角」優先堆疊原則依序選出位於貨櫃最底下、最後方與最左

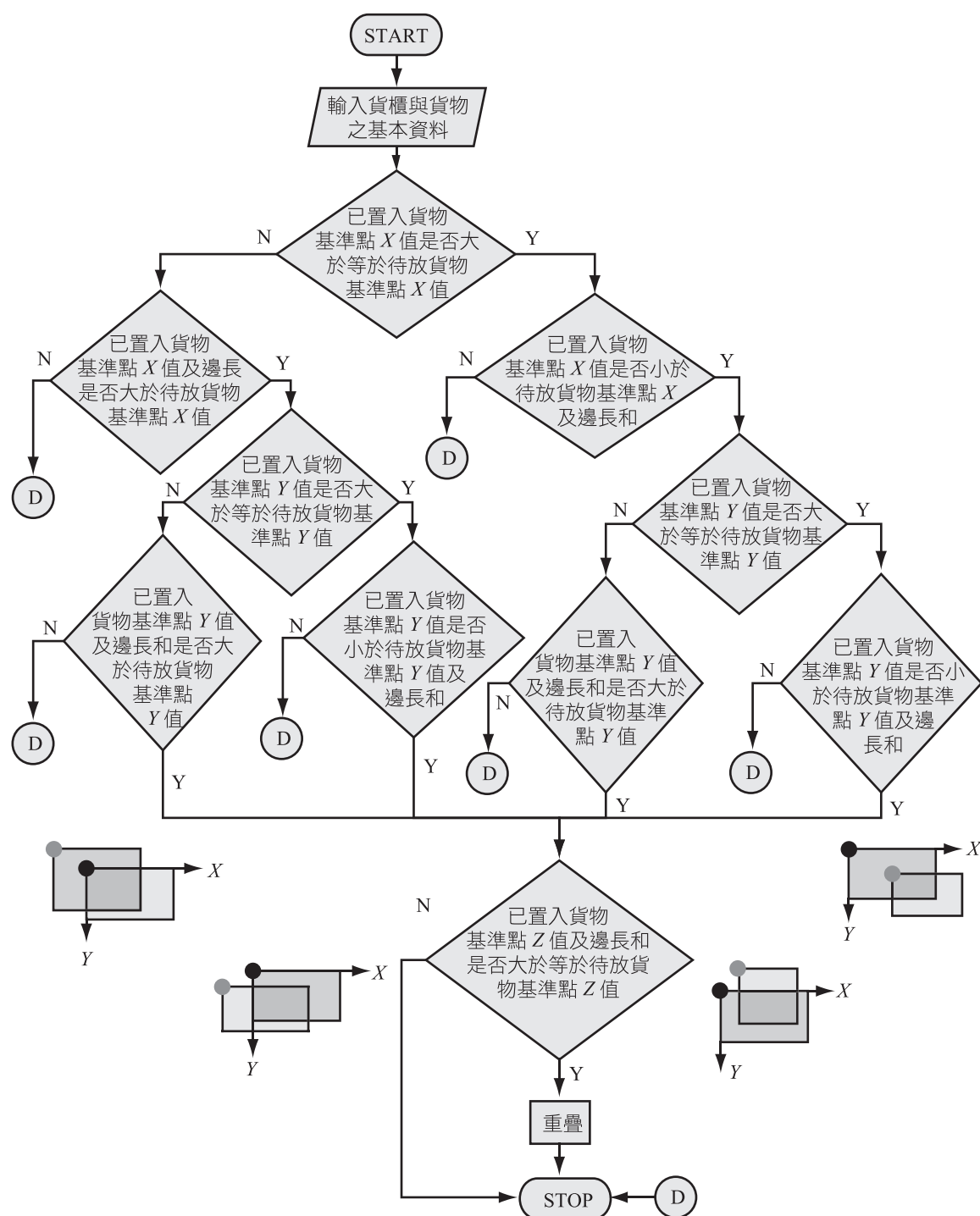


圖 6 貨物重疊位置檢定之流程架構圖 (薛朝光等, 2008)

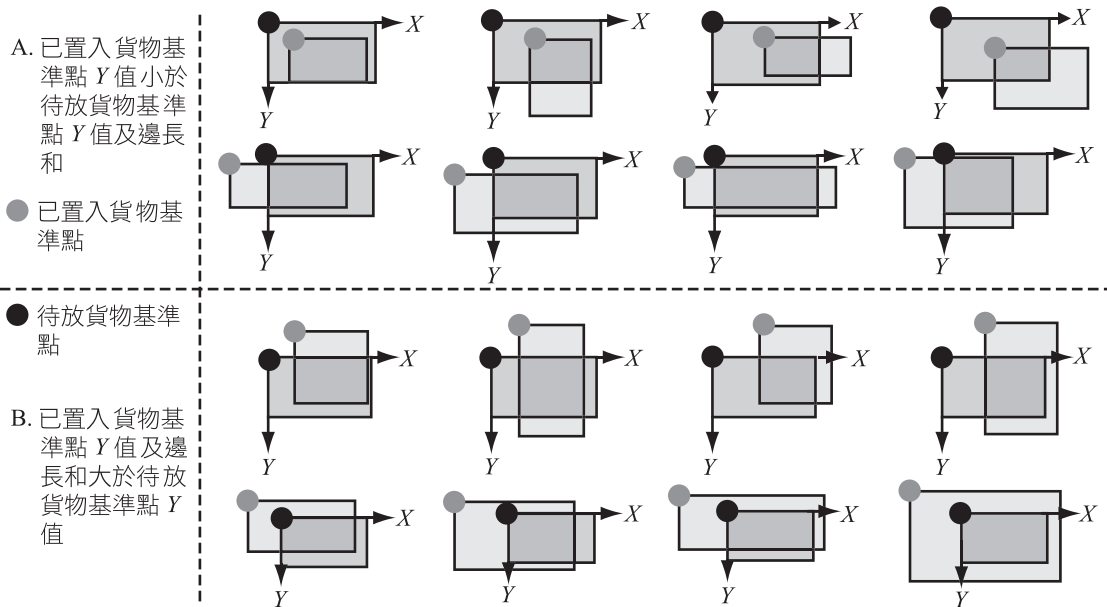
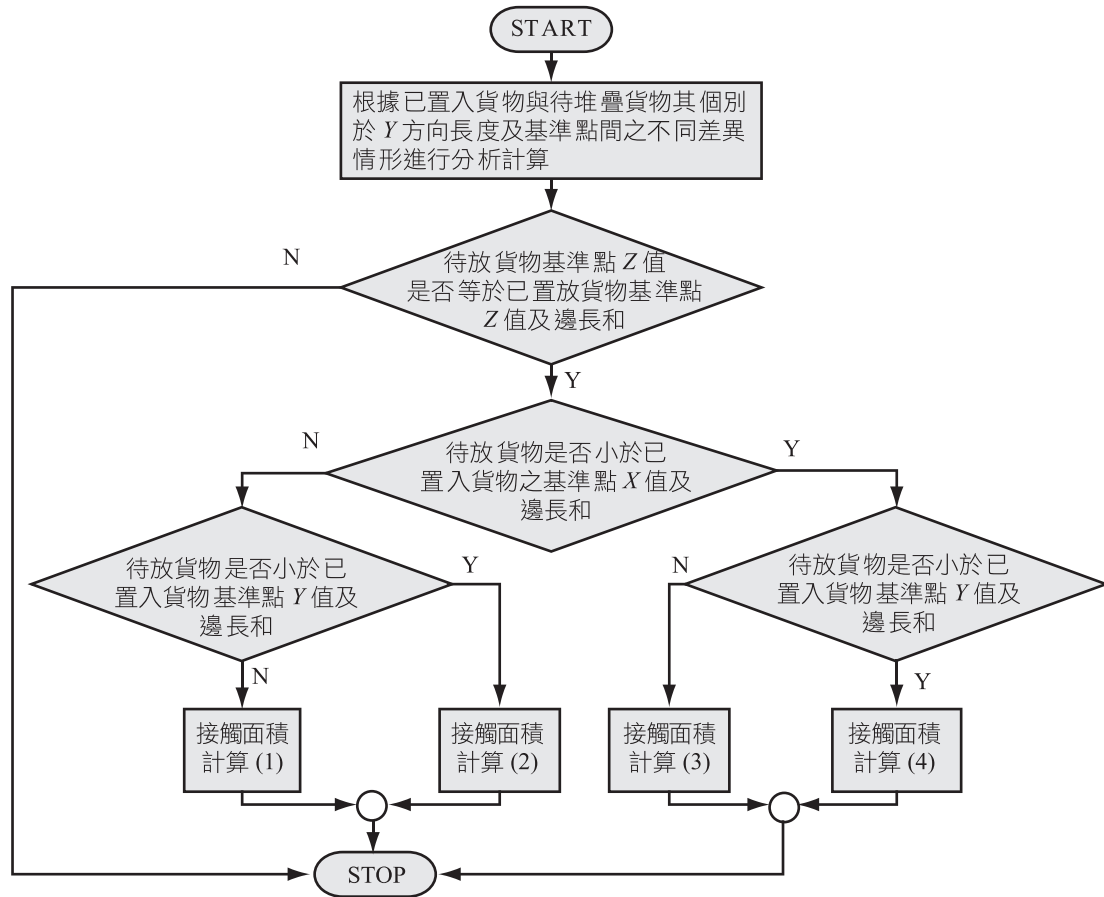


圖 7 貨物接觸面積檢定之流程架構與示意圖 (薛朝光等, 2008)

側之座標點為優先，作為次一貨物擺放的基準點。若未能完全符合要求，則跳至步驟八。

步驟八：

方向檢定。此為貨物可旋轉的方向(分別為(1)不可旋轉；(2)平面旋轉；(3)六面皆可旋轉等三種型態)，由於貨物堆疊位置在靠近貨櫃右側、前方或上方時，易出現貨物邊長超出貨櫃容積範圍之餘高、餘長或餘寬的情況，而不符合堆疊要求。因此，在貨物所容許之堆疊型態下，藉由轉向便可增加貨物擺放於此位置的可能性，減少過多之不可利用空間；若貨物在旋轉後仍無法置於該基準點上，便依堆疊排序選擇下一貨物，並重新執行步驟三至八以進行堆疊運算；但當貨物已達排序的最後一個時，則將此基準點設為無限大，且依「下後左角」優先堆疊原則更換另一配置基準點後，再次執行步驟二至八，直到放入所有貨物或無基準點為止。

步驟九：

前述八項步驟為一個貨物的堆疊流程，而利用迴圈的方式，讓程式能一次運算所有貨物。由於本研究納入貨物承重限制，因此可能會出現有基準點未擺放貨物而造成上方空間浪費的情形，故在第二階段採搜尋的方式針對貨物具承重限制條件下進行剩餘空間再利用。

步驟十：

為確保貨櫃於裝載作業完成後之平穩

度與安全性，本研究在完成貨物的堆疊運算後，隨即進行所有已堆疊貨物的總重心計算，以判別能否位於貨櫃中心所在長寬各 $\pm 1/6$ 的範圍內。其公式如下：

$$GX(ii) = POINT(ii,1) + \frac{1}{2}CW(inputcargo(ii)) \quad (5)$$

$$GY(ii) = POINT(ii,1) + \frac{1}{2}CL(inputcargo(ii)) \quad (6)$$

$$GY_TOTAL = \sum_{ii=1}^k GX(ii) \times cargo_weight(inputcargo(ii)) \quad (7)$$

$$GX_TOTAL = \sum_{ii=1}^k GY(ii) \times cargo_weight(inputcargo(ii)) \quad (8)$$

$$GX_Final = \frac{GY_TOTAL}{totalweight} \quad (9)$$

$$GY_Final = \frac{GX_TOTAL}{totalweight} \quad (10)$$

其中，

GX ：單一貨物其重心位置之 X 座標；

ii ：已放入貨物的序號；

$POINT$ ：已放置貨物的基準點；

CW ：貨物的寬度；

$inputcargo$ ：擺放至貨櫃中的貨物編號與排序；

GY ：單一貨物其重心位置之 Y 座標；

CL ：貨物的長度；

GY_TOTAL ：所有貨物對 Y 軸的總重心力矩；

k ：貨物放入貨櫃的數量；

$cargo_weight$ ：個別貨物的重量；

GX_TOTAL ：所有貨物對 X 軸的總重心力矩；

GX_Final ：貨櫃中所有貨物總重心之 X 座標；

$totalweight$ ：貨物的總重量；

GY_Final ：貨櫃中所有貨物總重心之 Y 座標

4.2 模擬退火演算法程式開發

SA 演算法主要在進行退火程序，又稱冷卻程序，目的為將溫度按一定的速率逐漸降低，同時計算各個降溫過程中系統之能量函數，並重複搜尋一段時間（馬可夫鏈長度），以尋求每個溫度下系統之穩定狀態，直到最後能有效地達到目標函數收斂至最佳或近似最佳解。因此，本研究乃根據改良式「下後左角」優先堆疊準則，採用模擬退火演算法之計算程序與架構，作為決定貨物排序及解算的數值模式。由於 SA 演算法中包含目標函數定義、初始解、移步法則與終止條件等參數，故以下就本研究所建構模擬退火演算法之流程及各參數的設定逐項說明，其流程架構如圖 8 所示。

步驟一：

設定一初始可行解 X ，在本研究中係將貨物的種類按尺寸體積由大到小排序，作為 SA 演算法的初始可行解，而其目標函數為貨櫃空間在貨物完成堆疊後之剩餘空間浪費率 E ，即貨櫃總容積與所有可堆疊至貨櫃中的貨物總體積之差值除以貨櫃總容積。

步驟二：

由實驗設計來決定模擬退火參數。

1. 初始溫度 ($T = T_0$)。
2. 退火冷卻率 (α)：即溫度降低的速率， $0 < \alpha < 1$ 。

初始溫度及降溫速率將會影響到是否接受所得貨物堆疊排序的結果，亦即會影響波茲曼函數是否能有效跳脫區域解之能力。

3. 馬可夫鏈長度 (M)：係用來控制不同種類貨物進行排序的次數，其值之設定對於解的品質及執行效率有一定程度之影響。
4. 終止條件。本研究將終止條件設為：
 - (1) 當所有貨物均已完成堆疊；
 - (2) 當溫度已低於終止溫度；
 - (3) 當連續十次降溫過程中，前後兩次降溫所得目標函數差值與現有目標函數的平均比值已小於 1%。

步驟三：

針對現行解 X ，利用移步法則決定另

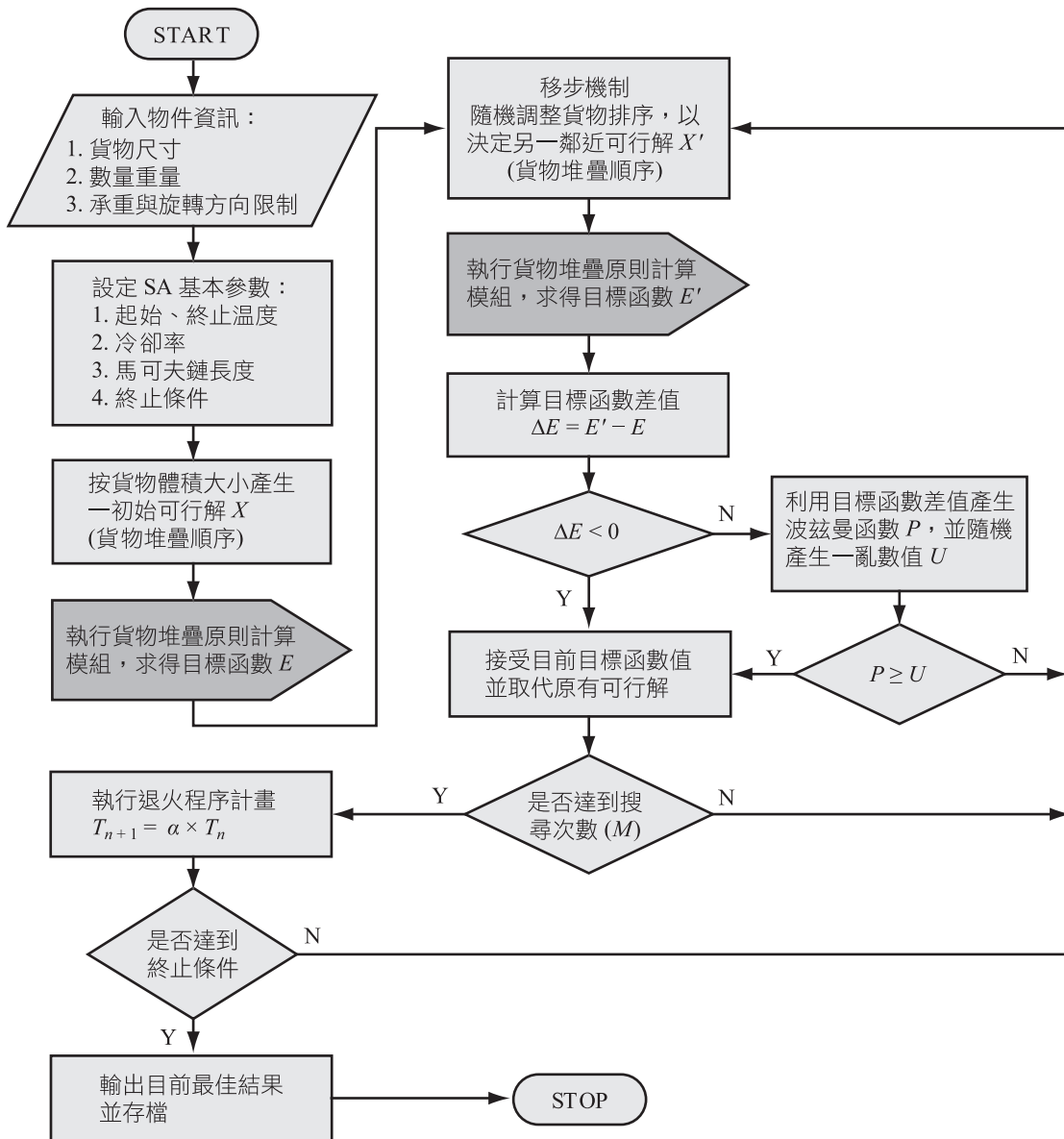


圖 8 本研究所採用模擬退火演算法之流程架構圖

一鄰近解 X' ，其目標函數為 E' 。本研究將移步的範圍設定為 2，即採隨機抽樣的方式選取某種貨物作為移步的中心，向前向後各取兩種貨物，共計四種，再隨機挑出兩任兩種進行交換位置的動作，以產生新的

鄰近解。由於在演算法初期需要較大幅度的變動，來增加鄰近解的搜尋範圍以達到多樣化的目標；但在演算法後期時，因目標函數已趨於穩定，則不宜再做大幅度變化之移步。因此，本研究便根據疊代次數

(降溫次數) 的多寡，而採用下述之移步控制：

1. 執行疊代次數在 1/3 總疊代次數前，進行移步之機率為 100%。
2. 執行疊代次數在 1/3 至 2/3 總疊代次數間，進行移步之機率為 66.7%。
3. 執行疊代次數在 2/3 總疊代次數後，進行移步之機率為 33.3%。

步驟四：

計算兩目標函數的差值 $\Delta E = E' - E$ 。

步驟五：

判斷 ΔE 值。

1. $\Delta E < 0$ ，表示目標函數值下降 (即 $E' < E$)，則 X' 取代 X 成為新的現行解。
2. $\Delta E \geq 0$ ，則需判斷模擬退火演算法是否接受此較劣解。於是，利用波茲曼函數值 (P)，如式 (1)，並隨機產生介於 0~1 的亂數 (U)。若 $P > U$ ，則 X' 取代 X 為新的現行解；反之，則忽略此一鄰近解 X' 且重回步驟三。

步驟六：

檢查在此溫度下的搜尋次數是否已達馬可夫鏈長度 (M)。若已達到便繼續步驟七；反之，則回到步驟三。

步驟七：

執行退火程序 $T_{n+1} = \alpha \times T_n$ ，並把搜尋次數歸零。其目的在使溫度逐漸下降，以尋求各溫度下系統之穩定狀態，並檢查溫度是否小於終止溫度。若已達終止條件，即停止計算並輸出目前最佳結果與存

檔；否則回到步驟三繼續搜尋可行解。

4.3 參數設定與分析

SA 演算法的關鍵參數均需經由實驗測試，方可將演算法之效能確實發揮。本研究依循過去相關文獻之慣例，設定波茲曼常數 $k = 1$ ；且由於本研究的目標函數 (E) 為貨櫃之剩餘空間浪費率，數值大小乃介於 0~1 之間，前後疊代的目標差 (ΔE) 便自然為一非常小之數值，因此可推算出若初始溫度設定在 0.05~0.3 的範圍內，其波茲曼函數值 (P) 即可介於 0~1 之間。故本研究設定初始溫度最高為 0.3，終止溫度為 0.001。同時為求得合適之 SA 演算法參數，由初始溫度 (T_0)、馬可夫鏈長度 (M) 及降溫率 (α) 等參數值所搭配的水準設定，如表 1 所示，共計 12 種不同之參數組合；再配合三種實驗情境 (如表 2)，並各進行兩次 SA 演算法之分析運算，以分別求其目標函數並轉換成貨物擺入貨櫃後之空間利用率。

表 1 SA 實驗參數組合表

參數水準	初始溫度 (T_0)	馬可夫鏈長度 (M)	降溫率 (α)
1	0.05	5	0.85
2	0.1	10	0.95
3	0.3	-	-

綜整各實驗情境與參數組合運算分析的結果如圖 9 所示，可發現三種實驗情境分別於不同參數組合下，皆可達到 92% 以上之空間利用率，表示此分析模型基本上

表 2 各實驗情境之容器與物件基本資料表

		情境 (1)			情境 (2)						情境 (3)								
容 器	長 × 寬 × 高	241 × 47 × 48																	
	限重	500			15000														
物 件	型式	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
	長	12	64	36	46	12	42	20	64	18	36	42	12	42	64	18	20	30	6
	寬	14	14	12	10	14	12	10	14	12	12	10	14	10	14	10	10	12	6
	高	4	12	10	8	4	14	4	12	8	10	4	4	14	12	12	4	10	4
	重量	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	數量	110	35	60	37	65	30	44	20	39	25	30	45	21	17	27	45	31	60
	堆疊條件	六面均可旋轉且無承重限制																	
估算容積率		130.48%			130.43%						130.49%								

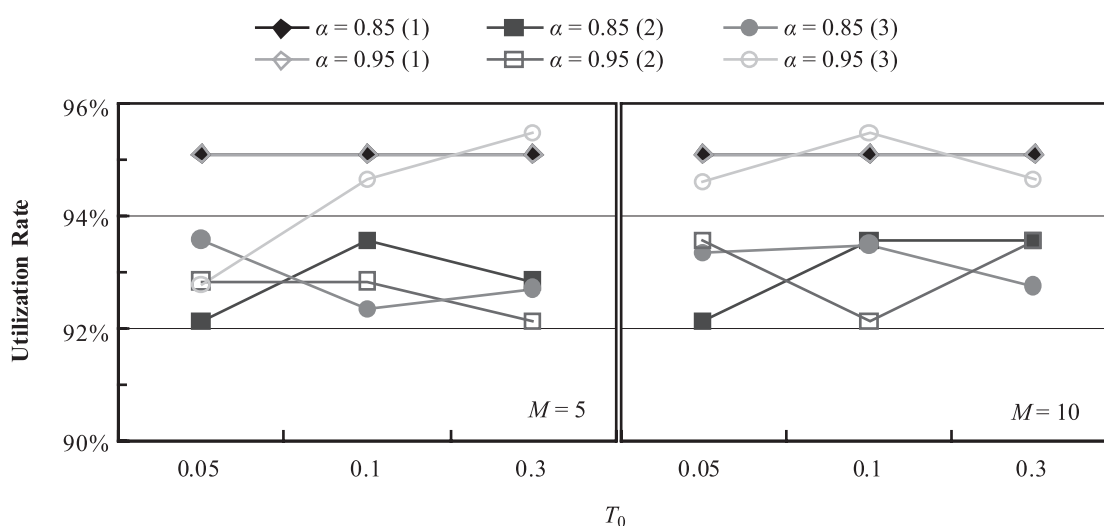


圖 9 三種實驗情境下各參數組合所得之分析結果

在處理物件堆疊問題的尋優機制方面，確實具有相當之成效。其次，觀察圖中各曲線的變化情形，實驗情境 (1) 無論在何種參數組合下，其空間利用率均為 95.1%；而實驗情境 (2) 對 12 種參數組合個別進行兩次分析後，所得之平均空間利用率雖互有消長，但差異皆小於 $\pm 1\%$ ；至於實驗情境 (3) 則可明顯看出，降溫率 $\alpha = 0.95$ 的

分析結果普遍較 $\alpha = 0.85$ 為佳，且在參數組合 0.3-5-0.95 (初始溫度-馬可夫鏈長度-降溫率) 與 0.1-10-0.95 兩者所得之空間利用率均達 95.5%。由於馬可夫鏈長度係用來控制每個溫度下的搜尋次數，搜尋次數愈多，對運算效率之影響便相對愈大，因此在空間利用率相同的情況下，本研究考量以執行時間較短的參數組合 0.3-5-0.95

作為 SA 演算法之建議參數。

相當之適用性與處理能力。

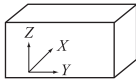
伍、實例分析與探討

為能將本研究所建構之數值分析模型，用於求解實際貨物配櫃問題，以供配櫃人員或承攬運送業者之應用參考，因此透過實地至基隆貨櫃場所蒐集的現場配櫃相關資料，應用本研究之數值模型進行運算模擬分析，並與現場實際堆疊情形加以比較和討論，以確定本研究按實際貨物配櫃問題所發展建構的數值分析模型，具有

5.1 實例一

20 呎貨櫃一只，貨物為 12 種不同尺寸之立方體貨物，總數為 255 件，所有貨物的體積總和除以貨櫃總容積之估算容積利用率為 66.58%，貨櫃與貨物之各項基本資料、堆疊特性與限制條件，綜整如表 3 所示。欲分析多種尺寸貨物在堆疊旋轉方向不盡相同，並考慮限重及平穩度條件下，本研究所建構之數值模型，是否能如同現場配櫃作業結果，而將貨物全數裝入該 20 呎貨櫃中。

表 3 實例一之貨櫃與貨物基本資料及特性

貨櫃	長 × 寬 × 高	589.6 × 235.2 × 239.3											
	限重	28110											
貨物	型式 (※)	$T1_{(2)}$	$T2_{(2)}$	$T3_{(3)}$	$T4_{(2)}$	$T5_{(2)}$	$T6_{(2)}$	$T7_{(2)}$	$T8_{(2)}$	$T9_{(3)}$	$T10_{(2)}$	$T11_{(3)}$	$T12_{(3)}$
	長	75	189	68	120	115	114	105	115	30	91	34	47
	寬	62	103	45	91	114	115	106	114	27	67	28	27
	高	38	87	30	95	166	133	142	175	16.5	40	29	18
	重量	172	198	30	750	459.3	459.3	459.3	459.3	21.9	83	10.2	10.2
	數量	1	1	92	1	1	1	1	1	1	109	1	41
估算容積率		66.58%											

※ 括號內數字係指貨物堆疊可旋轉方向 (1：不可旋轉；2：平面旋轉；3：六面皆可旋轉)

彙整運算分析的結果與貨物立體配置情形如圖 10 所示。在符合貨櫃荷載限制及平穩度要求下，貨物可全數堆疊完畢，並達到最佳容積利用率 66.58%。同時由圖中之貨物擺放情形係由下往上堆疊，且同類貨物大多堆放在一起，以及大尺寸貨物優先置於貨櫃最裡層等，均與貨櫃場實際

堆疊所採階梯狀與依貨物尺寸分類的方式 (如圖 11)，在配櫃完成型態上相當一致。對於組合貨物含棧板部分 (圖 11(a))，本研究係依其整體外觀尺寸，而視為一具限制堆疊方向 (無法側翻或倒置) 之矩形體貨物來進行分析，其計算配置結果 (如圖 10)，亦相當符合實際的堆疊情形 (圖 11(a))。

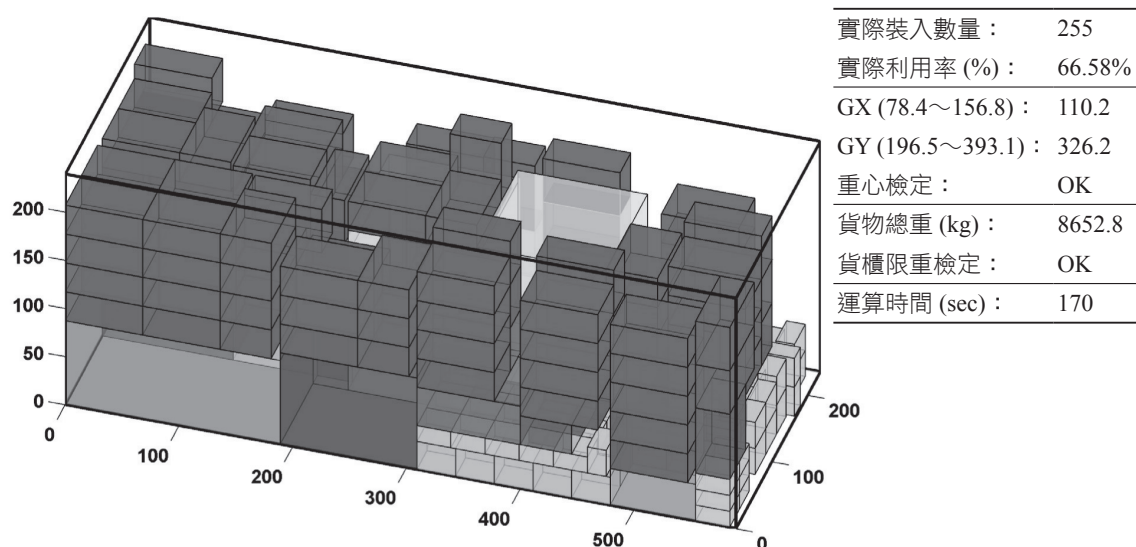


圖 10 分析運算所得貨物裝載結果與 3D 配置圖 (實例一)



圖 11 貨櫃場之實際配櫃作業情形 (實例一)

此外，在模式運算過程中，貨物只要能平穩堆疊且接觸面積超過其底面積 1/2 時，便可放置於該選定位置；故圖 10 中某些大尺寸貨物並非位於貨櫃底層，而係堆放在小體積貨物上方；若對照實際配櫃結果 (如圖11(b) 之紅圈標示部分)，則可充分

顯示出此種堆疊方式在配櫃作業上是合宜的。

5.2 實例二

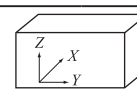
40 呎貨櫃一只，貨物為 16 種不同尺寸的立方體貨物，總數為 219 件，估算容

積利用率為 79.86% (即所有貨物的體積總和與貨櫃總容積之比值)，貨櫃與貨物之各項基本資料、堆疊特性與限制條件，綜整如表 4 所示。其中，T1 型式貨物因具有承重限制，故其上方將無法堆疊任何貨物。

欲分析多種尺寸貨物在不同堆疊條件限制、貨櫃限重及平穩度考量下，本研究所建構之數值模型，是否能如同現場配櫃作業結果，而將貨物全數裝入該貨櫃中。

表 4 實例二之貨櫃與貨物基本資料及特性

貨櫃	長 × 寬 × 高	1202.5 × 235.2 × 239.3								
	限重	28550								
貨物	型式 (※)	T1 ₍₂₎	T2 ₍₂₎	T3 ₍₂₎	T4 ₍₂₎	T5 ₍₂₎	T6 ₍₂₎	T7 ₍₂₎	T8 ₍₂₎	
	長	111	118	118	114	178	110	110	58	
	寬	111	119	119	114	93	105	105	58	
	高	97	95	100	160	98	82	92	89	
	重量	262.8	797.6	839.6	1247.4	808	969.1	1086.4	152.8	
	數量	4	1	1	2	1	1	2	4	
	型式 (※)	T9 ₍₃₎	T10 ₍₃₎	T11 ₍₂₎	T12 ₍₂₎	T13 ₍₂₎	T14 ₍₂₎	T15 ₍₂₎	T16 ₍₃₎	
	長	136	55	92	106	131	131	113	93	
	寬	120	40	106	107	131	131	114	35	
	高	130	23.2	175	180	194	183	127	35	
	重量	1079.5	26	172.8	206.2	336.6	317.4	1015	22.1	
	數量	1	120	1	1	1	1	6	72	
	估算容積率	79.86%								



※ 括號內數字為貨物堆疊可旋轉方向 (1：不可旋轉；2：平面旋轉；3：六面皆可旋轉)；T1 貨物具承重限制，其上方無法堆疊貨物

根據圖 12 之運算分析結果與貨物立體配置情形顯示，全數貨物均可堆疊至該貨櫃中，達到 79.86% 之最佳容積利用率，且符合貨櫃荷載限制及平穩度的要求。其中，T1 型式貨物為四件各含棧板且具承重限制之組合貨物，因此本研究係採同時限制堆疊方向 (無法側翻或倒置) 與承重限制之矩形體貨物來進行分析，而由圖中該類貨物之計算結果 (藍實線圈標示部分)，其上方確實並無任何貨物堆疊，且配

置在貨櫃的最頂層，而與現場實際配櫃情形 (如圖 13(a) 之紅圈標示處) 完全一致，充分顯示出本研究所建構數值分析模型之適用性；此外，對照圖 13(b) 的紅圈標示位置所示，可發現 T8 型式貨物實乃四件不得傾覆之圓桶狀貨物，本研究依其配櫃原始資料，模擬為堆疊方向受限的矩形體貨物來進行分析。圖 12 中綠虛線框標示區域即為該類貨物的計算結果，其堆放方式均相鄰且位於櫃內之最底層，上方則堆

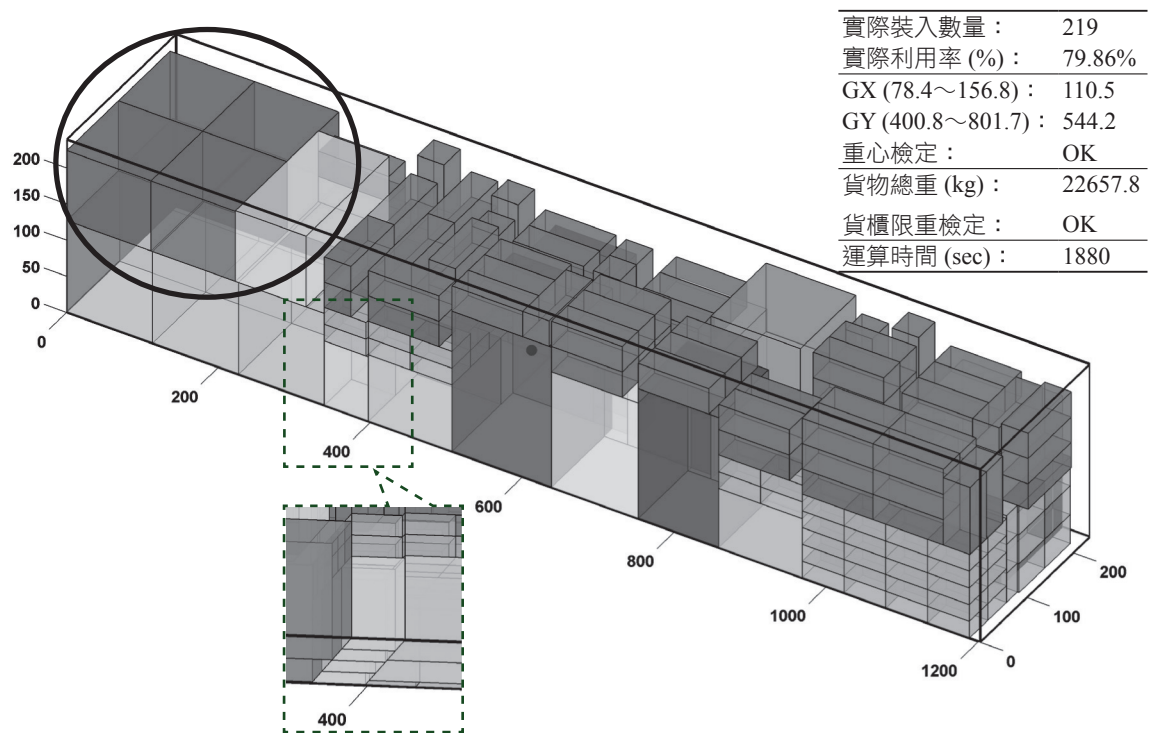


圖 12 分析運算所得貨物裝載結果與 3D 配置圖 (實例二)



圖 13 貨櫃場之實際配櫃作業情形 (實例二)

疊數層他種小尺寸貨物，亦相似於實際配櫃結果，足以證明本數值分析模型對多尺寸與非矩形體貨物在實際配櫃問題上，確實具有良好的處理能力。

陸、結論與建議

本研究針對非整櫃貨物併櫃配裝之利用率最佳化問題，在考量實際配櫃作業所需的貨物堆疊限制、擺放型態、接觸面積、貨櫃限重與平穩度等重要因素下，採用模擬退火演算法之運算架構及特性，並結合改良式「下後左角」優先堆疊準則，建構一可適用於協助配櫃作業的數值分析模型，以進行貨物堆疊之運算模擬。綜整本研究模式建構、程式開發及案例分析成果，可歸納出以下之結論與建議：

1. 根據實例運算模擬之成果顯示，本研究所建構的數值分析模型，不僅均可在符合實際配櫃所需荷載限制與平穩度要求下，達到最佳容積利用率外；且對於多尺寸、不同堆疊限制、組合貨物含棧板，或甚至非矩形體等貨物部分之模擬分析結果，均與現場配櫃情形相當一致，充分展現出本數值分析模型在協助實際配櫃作業上，確實具有相當良好的適用性及處理能力。
2. 本研究以改良式「下後左角」優先堆疊準則作為貨物堆疊的處理模式，其中所

運用之同類貨物聚集擺放與底部優先且逐層向上配置技巧，以及剩餘空間提供具承重限制貨物再利用的二次檢核機制，並改善貨物配置基準點之建立方式等，經比較現場配櫃結果與實例模擬分析所得貨物配置型態的相近程度，足見該堆疊準則確可有效模擬配櫃實務上之所需。

3. 相較於前人對容器裝載問題之相關研究中，大多僅列出堆疊計算完成後的數據資料與簡化示意圖，致難以有效展現各物件擺放結果之不足；本研究所建構的數值分析模型，亦同時開發一 3D 圖像化展示介面，使模擬運算所得各貨物之完整堆置情形和整體重心位置等，均能立即以三維方式配合多重色彩具體呈現，而有助於提升本研究成果在實際配櫃作業上的實用性。
4. 本研究在模擬堆疊的過程中，貨物可設定為平面或六面旋轉；但若採第一種堆疊方向即被貨櫃空間所容許擺放，程式便不再進行旋轉的步驟，亦無法得知其他堆疊方向所得之空間利用情形，能否較前者來的更佳。故後續研究如能將此因素加以考量，或許能進一步使裝載結果達到更好的空間利用率。
5. 為達整體貨載之平穩度，本研究於設定貨物堆疊條件時，並未考慮其可傾斜擺放的情形；然實務上若該貨物可不受堆疊角度限制，其實是容許此種方式之擺

放配置。因此若能將此情況納入貨物的堆疊模式中，應對整體貨物配置及貨櫃空間利用之靈活度有所助益。

參考文獻

- 田邦廷，2002，長方體物件堆疊問題解法之研究，大葉大學工業工程學系碩士論文。
- 吳泰熙、鄭豐聰、趙楷，2007，以加入升溫機制之模擬退火演算法求解單原片方形物件排列問題，*技術學刊*，第 22 卷，第 4 期，253-261。
- 李兆涵，2006，宅配業車輛裝載規劃問題之研究，輔仁大學資訊管理學系碩士論文。
- 李起毓，2007，以混合啟發式演算法求解空間裝載利用率的最佳化問題，朝陽科技大學資訊管理學系碩士論文。
- 林光、李選士、王昱傑，1995，配櫃決策系統之研究，*航運季刊*，第 4 卷，第 4 期，84-106。
- 柯宜伶，2008，以基因演算法求解限重與平穩度考量下之貨物配櫃問題，國立臺灣海洋大學商船學系碩士論文。
- 張美忠，1992，貨物運輸棧板裝載問題啟發式解法之應用，國立交通大學土木工程學系碩士論文。
- 楊佳燕，2005，多重限制多容器裝填問題最佳化系統之研究，華梵大學工業工程與經營資訊學系碩士論文。
- 薛朝光、柯宜伶、賴奕安，2008，以基因演算法求解限重與平穩度考量下之貨物配櫃問題，*中華民國運輸學會 97 年年會暨學術論文國際研討會論文集*，3257-3286，高雄。
- Abdou, G. and Yang, M., 1994. A systematic approach for the three-dimensional palletization problem. *International Journal of Production Research*, 32(10), 2381-2394.
- Bischoff, E.E. and Ratcliff, M.S.W., 1995. Loading multiple pallets. *The Journal of the Operational Research Society*, 46, 1322-1336.
- Bortfeldt, A. and Gehring, H., 2001. A hybrid genetic algorithm for the container loading problem. *European Journal of Operational Research*, 131(1), 143-161.
- Chien, C.F. and Deng, J.F., 2004. A container packing support system for determining and visualizing container packing patterns. *Decision Support System*, 37(1), 23-34.
- Davies, A.P. and Bischoff, E.E., 1999. Weight distribution considerations in container loading. *European Journal of Operational Research*, 114(3), 509-527.
- Eley, M., 2002. Solving container loading problems by block arrangement. *European Journal of Operational Research*, 141(2), 393-409.

- Garey, M.R. and Johnson, D.S., 1979. *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*, W.H. Freeman and Company: San Francisco.
- Gehring, H., Menschner, K. and Meyer, M., 1990. A computer-based heuristic for packing pooled shipment containers. *European Journal of Operational Research*, 44(2), 777-288.
- Gehring, H. and Bortfeldt, A., 1997. A genetic algorithm for solving the container loading problem. *International Transactions of Operational Research*, 4(5-6), 401-418.
- George, J.A. and Robinson, D.F., 1980. A heuristic for packing boxes into a container. *Computers and Operations Research*, 7(3), 147-156.
- George, J.A., 1992. A method for solving container packing for a single size of box. *Journal of the Operational Research Society*, 43(4), 307-312.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D. and Vecchi, M.P., 1983. Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598), 671-680.
- Liu, F.F. and Hsiao, C.J., 1997. A three-dimensional pallet loading method for single-size boxes. *Journal of the Operational Research Society*, 48(7), 726-735.
- Metropolis, N., Rosenbluth, A.W., Rosenbluth, M.N., Teller, A.H. and Teller, E., 1953. Equations of calculation by fast computing machines. *Journal of Chemical Physics*, 21(6), 1087-1092.
- Nahar, S., Sahni, S. and Shragowitz, E., 1986. Simulated annealing and combinatorial optimization. In *proceedings of the 23rd ACM/IEEE Design Automation Conference*, pp. 293-299, Las Vegas, Nevada.
- Ngoi, B.K.A., Tay, M.L. and Chua, E.S., 1994. Applying spatial representation techniques to the container packing problem. *International Journal of Production Research*, 32(1), 111-123.
- Ratcliff, M.S.W. and Bischoff, E.E., 1998. Allowing for weight considerations in container loading. *OR Spectrum*, 20(1), 65-71.
- Scheithauer, G., 1999. LP-based bounds for the container and multi-container loading problem. *International Transactions in Operational Research*, 6(2), 199-213.
- Terno, J., Scheithauer, G., Sommerweis, U. and Riehme, J., 2000. An efficient approach for the multi-pallet loading problem. *European Journal of Operational Research*, 123(2), 372-381.