

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

多吊、多自動起重機貨櫃整櫃問題(第 2 年) 研究成果報告(完整版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 98-2221-E-006-151-MY2
執行期間：99 年 08 月 01 日至 100 年 10 月 31 日
執行單位：國立成功大學土木工程學系(所)

計畫主持人：李宇欣
共同主持人：陳春益
計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：李衍儒

公開資訊：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 101 年 01 月 31 日

中文摘要： 出口儲區取櫃問題為貨櫃裝船作業中重要的一環。為了有效使用儲位空間，貨櫃多以堆疊的方式存放，僅能由堆疊的最上方存取貨櫃，因此儲區存在壓櫃現象。壓櫃現象導致取櫃時需要額外、無直接生產力的翻櫃動作，因而影響儲區之作業效率。

本研究發展一套演算法用以處理取櫃問題，求解如何以最少的搬動次數、最短的軌道型門式起重機(RMGC)工作時間，以取櫃同時整櫃之方式將所有貨櫃以已知的順序搬離儲區。本研究涵蓋三類取櫃問題。第一類為單吊、單一台 RMGC 取櫃問題，先以一演算法求解取櫃計畫，再將取櫃計畫建構成最短路徑模型，藉以減少 RMGC 工作時間。第二類多吊、單一台 RMGC 取櫃問題，則是將單吊、單一台 RMGC 之取櫃計畫，利用交換法將貨櫃搬動動作分配給數個夾櫃器處理。第三類為單吊、兩台 RMGC 取櫃問題，先將取櫃計畫分配給兩台 RMGC，再據以推估兩台 RMGC 完成其所負責之貨櫃搬動動作所需的時間。

測試結果顯示本研究求解出之單吊、單一台 RMGC 取櫃問題之取櫃計畫接近或等於搬動次數下限值。可求解 2000 個以上貨櫃的儲區之取櫃計畫。使用多個夾櫃器亦可減少搬動時間，並且有可能減少搬動次數，但多吊之效用隨夾櫃器數目增加而遞減。將取櫃計畫分配給兩台 RMGC，總工作時間可以減少 30%以上。

中文關鍵詞： 貨櫃場、最佳化、整櫃、多吊、軌道型門式起重機

英文摘要： Retrieving export containers from a yard is an important part of the ship-loading process. Containers are stacked high to utilize yard space more efficiently, and can be accessed only from the top of each stack. Therefore, non-productive reshuffles are required to remove the containers stacked on top of a target container in the process of retrieving containers. Reshuffles influence the efficiency of a container yard operation. In this research we develop a heuristic to solve the container retrieval problem which yields a working plan for a rail mounted gantry crane(RMGC) to retrieve all the export containers from a given yard in a given sequence. The optimization goal is to minimize the number of container movements and the RMGC' s working time. We study three variants of the

container retrieval problem. The first one is single-lift and single RMGC container retrieval problem. We propose a heuristic to develop a retrieving plan. Next, we use the retrieving plan to construct a graph and solve the shortest path in the graph to reduce the RMGC' s working time. The second one is multi-lift and single RMGC container retrieval problem. Assigning the movements to multiple spreaders is done by exchanging the movements of the single-lift and single RMGC retrieving plan. The third one is single-lift and twin RMGC container retrieval problem. The heuristic first assigns the movements to two RMGCs, and then estimate the time for the two RMGCs to finish their tasks.

Numerical testing results show that the number of container movements of the single-lift and single RMGC retrieving plan approaches or equals the lower bound. The heuristic is able to solve instances with more than 2000 containers. Using multiple spreaders can reduce RMGC' s working time as well as the number of container movements. The effect of multi-lift is decreasing with the increase in spreaders. Using two RMGCs to execute the retrieving plan can reduce the RMGC' s working time by more than 30%.

英文關鍵詞： container yard, optimization, pre-marshaling, multiple-lift, rail mounted gentry crane

多吊、多自動起重機貨櫃整櫃問題

目錄

目錄.....	I
圖目錄.....	II
表目錄.....	II
摘要.....	III
Abstract.....	IV
一、前言.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
二、文獻回顧.....	3
三、結果與討論.....	4
3.1 問題定義.....	4
3.2 概念簡介.....	5
3.3 基本模式.....	6
3.4 利用最短路徑模型減少工作時間.....	8
3.5 多吊、單一起重機模式.....	10
3.6 二台起重機模式.....	11
3.7 測試例.....	13
四、結論與後續研究.....	15
4.1 結論.....	15
4.2 後續研究.....	15
參考文獻.....	17

圖目錄

圖 1. 貨櫃場實況及軌道型門式起重機.....	2
圖 2. 軌道式門型起重機的結構示意圖.....	4
圖 3. 貨櫃場一個 bay 示意圖.....	4
圖 4. 產生取櫃同時整櫃工作計畫第一階段演算法步驟.....	6
圖 5. 儲區初始狀態.....	8
圖 6. 取出貨櫃 1 後之儲區狀態.....	8
圖 7. 取出貨櫃 2 後之儲區狀態.....	8
圖 8. 取出貨櫃 3 後之儲區狀態.....	8
圖 9. 說明例之工作計畫.....	8
圖 10. 說明例工作計畫之輔助網路.....	9
圖 11. 說明例工作計畫之輔助網路與替代路徑.....	10
圖 12. 輔助網路與替代路徑示意圖.....	10
圖 13. 橋式起重機之多吊夾櫃器.....	11

表目錄

表 1. 基本模式測試結果.....	13
表 2. 多吊、單一起重機模式測試結果.....	14
表 3. 測試例 R011606_0070_001 使用不同夾櫃器個數測試結果.....	14
表 4. 兩台起重機模式測試結果.....	14

摘要

出口儲區取櫃問題為貨櫃裝船作業中重要的一環。為了有效使用儲位空間，貨櫃多以堆疊的方式存放，僅能由堆疊的最上方存取貨櫃，因此儲區存在壓櫃現象。壓櫃現象導致取櫃時需要額外、無直接生產力的翻櫃動作，因而影響儲區之作業效率。

本研究發展一套演算法用以處理取櫃問題，求解如何以最少的搬動次數、最短的軌道型門式起重機(RMGC)工作時間，以取櫃同時整櫃之方式將所有貨櫃以已知的順序搬離儲區。本研究涵蓋三類取櫃問題。第一類為單吊、單一台 RMGC 取櫃問題，先以一演算法求解取櫃計畫，再將取櫃計畫建構成最短路徑模型，藉以減少 RMGC 工作時間。第二類多吊、單一台 RMGC 取櫃問題，則是將單吊、單一台 RMGC 之取櫃計畫，利用交換法將貨櫃搬動動作分配給數個夾櫃器處理。第三類為單吊、兩台 RMGC 取櫃問題，先將取櫃計畫分配給兩台 RMGC，再據以推估兩台 RMGC 完成其所負責之貨櫃搬動動作所需的時間。

測試結果顯示本研究求解出之單吊、單一台 RMGC 取櫃問題之取櫃計畫接近或等於搬動次數下限值。可求解 2000 個以上貨櫃的儲區之取櫃計畫。使用多個夾櫃器亦可減少搬動時間，並且有可能減少搬動次數，但多吊之效用隨夾櫃器數目增加而遞減。將取櫃計畫分配給兩台 RMGC，總工作時間可以減少 30% 以上。

關鍵詞：貨櫃場、最佳化、整櫃、多吊、軌道型門式起重機

Abstract

Retrieving export containers from a yard is an important part of the ship-loading process. Containers are stacked high to utilize yard space more efficiently, and can be accessed only from the top of each stack. Therefore, non-productive reshuffles are required to remove the containers stacked on top of a target container in the process of retrieving containers. Reshuffles influence the efficiency of a container yard operation.

In this research we develop a heuristic to solve the container retrieval problem which yields a working plan for a rail mounted gantry crane(RMGC) to retrieve all the export containers from a given yard in a given sequence. The optimization goal is to minimize the number of container movements and the RMGC's working time. We study three variants of the container retrieval problem. The first one is single-lift and single RMGC container retrieval problem. We propose a heuristic to develop a retrieving plan. Next, we use the retrieving plan to construct a graph and solve the shortest path in the graph to reduce the RMGC's working time. The second one is multi-lift and single RMGC container retrieval problem. Assigning the movements to multiple spreaders is done by exchanging the movements of the single-lift and single RMGC retrieving plan. The third one is single-lift and twin RMGC container retrieval problem. The heuristic first assigns the movements to two RMGCs, and then estimate the time for the two RMGCs to finish their tasks.

Numerical testing results show that the number of container movements of the single-lift and single RMGC retrieving plan approaches or equals the lower bound. The heuristic is able to solve instances with more than 2000 containers. Using multiple spreaders can reduce RMGC's working time as well as the number of container movements. The effect of multi-lift is decreasing with the increase in spreaders. Using two RMGCs to execute the retrieving plan can reduce the RMGC's working time by more than 30%.

Keywords: container yard, optimization, pre-marshaling, multiple-lift, rail mounted gentry crane

一、前言

1.1 研究動機

以運送貨物之噸數計算時，水運是現今世界上運輸最主要的貨運系統。而貨櫃運輸系統又是水運系統中最主要的部份之一。隨著全球化趨勢所帶來的需求成長，貨櫃運輸系統的運輸量與日俱增。因應需求量的增加，以及科技發展所帶來的新技術，貨櫃船的容量在近十年中出現顯著的成長[1, 2]。目前已有相當數量的超巴拿馬型新船的容量達到 10000、12000TEU (twenty-foot equivalent unit)，或更高[3]。全球性的海運市場長期以來競爭激烈，而且這些新船的造價多在每艘一億美元以上，因此如何充份利用其運能，並降低成本以為營運者帶來利潤，便成為重要的課題。對大型貨櫃船而言，影響營運效率最重要的因素之一是靠港時船上與陸上交換貨櫃的效率。貨櫃船絕大部份的靠港時間使用在貨櫃的裝卸，而快速的裝卸過程將可縮短船舶的靠港時間，進而提高造價高昂的船舶使用效率、並減少佔用船席的時間，對業者的營運效率有直接而顯著的貢獻。

裝卸時間的縮短不能僅由機具的更新達成，而必須配合高效率、高度精準的計畫與櫃場管理。為了提高場地使用效率，現今世界上絕大多數的貨櫃場均採用堆疊法儲放貨櫃，亦即將貨櫃在櫃場中高度疊放。其堆疊的高度受起重機具性能的影響，由二層到九層均有。圖 1 所示為貨櫃場實況。該貨櫃場所使用之起重機具為軌道式門型起重機(rail-mounted gentry crane, RMGC)。此類機具為現今大多數大型貨櫃場之主力機具，台灣各主要貨櫃港以及即將營運的台北港均以此類機具為主力，而軌道式門型起重機亦為本研究之研究對象。



圖 1. 貨櫃場實況及軌道型門式起重機

1.2 研究目的

本研究之目的為發展一套演算法，結合整櫃與取櫃問題，以求解一取櫃同時整櫃之工作計畫。最佳化之目標在以最少的搬動次數、最短的起重機工作時間，依事先給定之離場順序將櫃場中無規則堆疊之所有貨櫃取出搬離貨櫃儲區。

二、文獻回顧

將出口貨櫃由儲區搬至場內拖車上，再由拖車將貨櫃搬至岸肩交由橋式起重機裝船之動作稱為取櫃。通常貨主將貨櫃送抵貨櫃儲區的時間不定。若需較早裝船的貨櫃較先抵達，而較晚裝船的貨櫃較晚抵達，則可能導致較早裝船的貨櫃被壓在下方，形成壓櫃現象。再者，通常船舶積載計畫會將較重之貨櫃裝入船底部，將較輕之貨櫃安排於上部。若取櫃裝船時，在儲區中較輕之貨櫃堆置於較重之貨櫃上方，則亦會發生壓櫃現象。由於 RMGC 由場中取出貨櫃時只能從堆疊的最上層拿取，是以要取出的貨櫃存在著壓櫃現象時，必須先將壓在上方的貨櫃搬至其他堆疊暫存，這個動作稱為翻櫃。由於翻櫃動作並沒有將貨櫃交由拖車運至岸邊裝船，因此並不具生產力。

整櫃之目的在調整貨櫃於儲區中之堆放方式，以減少壓櫃狀態，因而得以節省裝船的時間。Kim and Bae[4]提出一方法將貨櫃重新分配到各堆疊列中，使得每一個堆疊列中各個種類貨櫃之數量與儲區目標狀態之數量相一致。但該研究並未討論使儲區成為目標狀態之貨櫃搬動方式。Lee and Hsu[5]構建以多元商品流量為基礎之整數規畫模式處理單一堆疊列中的整櫃問題，得到一整櫃計畫以減少壓櫃狀況。Lee and Chao[6]使用鄰近搜尋法及雙元整數模式，可以處理更大規模的整櫃問題。Choe et al.[7]處理儲區內有兩台不可互相跨越之 RMGC 的整櫃問題。該研究之目標是把原本分散在堆疊區塊(block)中相同種類的貨櫃，亦即大小相同且擁有相同目的港的貨櫃整理至同一個目標堆疊列(target bay)中以減少 RMGC 的工作時間。所有目標堆疊列在一開始時沒有任何貨櫃存放其內。設定儲區目標狀態為裝船時不需翻櫃，而將貨櫃由其來源堆疊列(source bay)搬至其目標堆疊列時亦不需要翻櫃。發展一演算法找出給定儲區之目標狀態，並利用 RMGC 排程來評估目標狀態，以及估算用來達到目標狀態所需的 RMGC 工作時間。

在另一方面，取櫃問題的文獻不多，Kim and Hong[8]利用分枝定限法(Branch and bound)加上一簡單但有效的演算法，求解將一堆疊列中之貨櫃取出所需的最少搬動次數。Lee and Lee[9]提出三階段的演算法來求解取櫃問題。首先，先產生一起始工作序列，接著利用構建並求解雙元整數模式來減少工作序列中的搬動動作。最後再利用混合整數規畫來減少 RMGC 執行工作序列所需的工作時間。而 Forster and Bortfeldt[10]則發展一 tree search procedure 以處理取櫃問題。晚近[11]使用 corridor method 之基本概念，發展啟發式解法以利用最少的搬動次數，依既定之順序由 N 只貨櫃中取出其中指定之 n 只。然其方法較受限，假設僅有下一只目標貨櫃上方之其他貨櫃產生壓櫃時方可移動之。而[12]則以雙元整數規畫模型求解由船上卸下貨櫃之最佳工作順序。

三、結果與討論

3.1 問題定義

軌道式門型起重機的結構示意如圖 2。該型起重機的工作構件可分為大車 (crane)、小車 (trolley)、及夾櫃器 (spreader) 三部份。配合起重機的性能，櫃場普遍使用 bay-row-tier 座標系統為貨櫃儲位定位。對照圖 2，其 x 軸為 bay，亦即大車在各 bay 之間移動。小車則沿 y 軸，亦即在各 row 之間移動。最後夾櫃器沿 z 軸，亦即在各 tier 之間移動。可供儲放一個貨櫃的空間稱為一個儲位。貨櫃種類繁多，其中長度大略可分為 20 呎與 40 呎兩類。絕大多數的貨櫃場均將不同長度的貨櫃分別存放，以避免混存所可能導致的堆疊不穩定及工作複雜性。圖 3 所示為一個 bay 的示意圖。

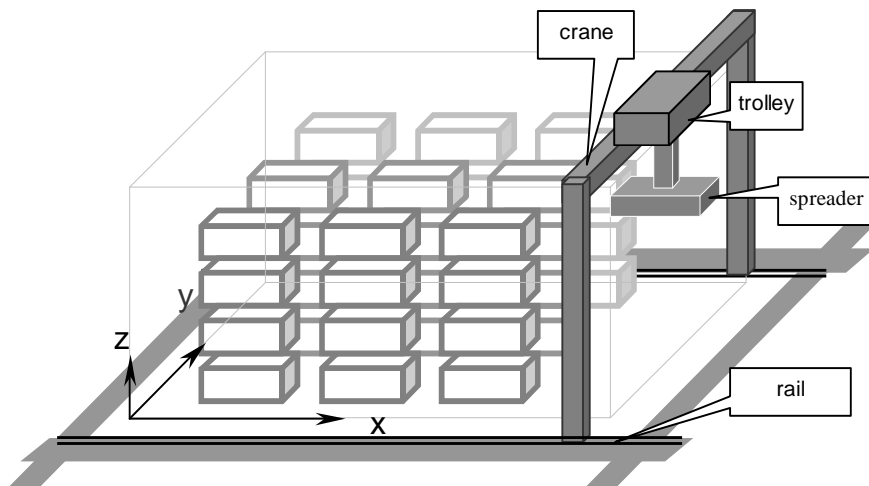


圖 2. 軌道式門型起重機的結構示意圖

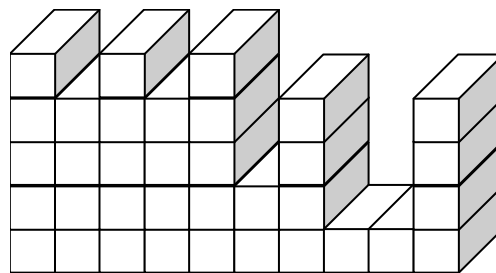


圖 3. 貨櫃場一個 bay 示意圖

本研究對整櫃與取櫃問題定義如下：考慮一特定範圍的貨櫃儲區，儲區內的堆疊列(bay)數目、每一堆疊列之堆疊(stack)數目、可容許的最大堆疊高度、貨櫃數目與種類、貨櫃儲區的初始狀態、貨櫃出場順序、門式起重機的速度、最大揚升高度等參數已知的情況下，求解如何以最少的搬動次數、最短的起重機工作時間，將所有貨櫃搬離貨櫃儲區。

本研究假設櫃場中所有貨櫃的堆疊並無特定順序或規則，且考慮在將貨櫃搬離出場的同時，對櫃場中尚未出場的貨櫃進行整櫃，以利後續出場工作之進行。而在場中移置產生壓櫃之貨櫃時，則假設可以選擇貨櫃儲區中任何堆疊列中的任一尚有空間之堆疊作為移置放置之用。對櫃場則假設所有貨櫃長、寬相同，因此只要空間允許，任何貨櫃均可置於其他任何一只貨櫃上方。在機具方面則假設使用軌道型門式起重機。晚近新式門式起重機之穩定性均較舊型大有改善，因此操作時均允許在夾櫃器有負載的狀況下移動大車。本研究亦作此假設。此外，本研究不同於過往文獻[8]之求解限制，而假設可以提前移置產生壓櫃之貨櫃。如此可以得到更佳之成果，但對模式及求解造成更大之挑戰。

3.2 概念簡介

一個門式起重機的貨櫃搬動動作(movement)定義為將貨櫃由某一堆疊夾起或放下之動作，以「貨櫃編號」、「堆疊編號」、「操作型態」這三項資訊代表之。每一個動作又可分解為「夾起」與「放下」兩項操作(operation)。本論文以 (x,s,P) 代表一項操作，其中 x 為貨櫃編號、 s 為該操作所發生之所在堆疊、而 P 則為該操作之型態，以 U 代表夾起，以 D 代表放下。例如， $(2,6,U)$ 即為由堆疊6夾起貨櫃2之操作。櫃場中所有的堆疊由1開始以自然數編號，並以堆疊0代表拖車。因此 $(x,0,D)$ 之操作即代表貨櫃 x 被置於卡車上並離場。在此定義下，將一個貨櫃由一處搬移到另一處的搬動動作需要兩次操作 (x,a,U) 與 (x,b,D) 。

一個貨櫃儲區取櫃同時整櫃之工作計畫是一組多個貨櫃搬動操作所組合而成的序列(sequence)。下列6種情況將導致工作計畫不可行：

1. 對某堆疊中並不存在的貨櫃執行夾起操作。
2. 對已達最大高度之堆疊執行放下操作。
3. 對非位於堆疊最上方之貨櫃執行夾起操作。
4. 夾櫃器無可用空間時執行夾起操作。
5. 對夾櫃器所沒有的貨櫃執行放下操作。
6. 編號較大的貨櫃比編號較小的貨櫃早搬離貨櫃儲區。

3.3 基本模式

本研究基本模式係假設使用單一門式起重機，且該起重機僅有單一夾櫃器。亦即在任一時間僅能夾取一只貨櫃。模式符號定義如下。

S 為貨櫃儲區內所有堆疊所成之集合。

C 為貨櫃儲區內所有貨櫃所成之集合。

$S(c)$ 為貨櫃 c 所在之堆疊編號。

n 為櫃場儲區內的總貨櫃數。

$top(s)$ 為堆疊 s 最頂上貨櫃之編號，並定義若堆疊 s 為空堆疊，則 $top(s)=n+1$ 。

$min(s)$ 為堆疊 s 中最小之貨櫃編號。

$V(s)$ 為堆疊 s 之空儲位數。

BAD 為所有擋住其他貨櫃而造成壓櫃之貨櫃所成之集合。

本研究分兩階段解得取櫃同時整櫃之工作計畫。第一階段以圖 4 之演算法求得一工作計畫，之後再於第二階段以最短路徑模型改善之。在第一階段，演算法依給定之取櫃順序，在每一回合將一只貨櫃裝上卡車，並在其過程中尋求適當之時機進行整櫃，以利後續作業之進行。令 c 為目前回合所欲裝車之貨櫃。若 c 位在其所在堆疊之最上方，則直接令起重機夾取裝車即可。否則於步驟 4 令 $d=top(s(c))$ 為 c 所在之堆疊中位於最上方之貨櫃。此時貨櫃 d 造成壓櫃，必須移置其他堆疊暫存。

1. $c := 0$
2. $c := c+1$, if $c > n$ terminate.
3. if $c = top(s(c))$ move c to the truck, go to step 2.
4. $d := top(s(c))$
5. $T := \{r \mid r \in S, r \neq s(c), V(r) > 0, \min(r) > d\}$
6. if $T = \emptyset$ go to step 13.
7. $t := \arg \min_{r \in T} (\min(r))$
8. if $V(t) = 1$ go to step 14.
9. $K := \{u \mid u \in BAD, u = top(s(u)), d < u < \min(t) - 5\}$
10. if $K = \emptyset$ go to step 14.
11. $k := \max_{k \in K} (k)$
12. move container k to stack t , go to step 8.
13. $t := \arg \max_{r \in S, V(r) > 0, r \neq s(c)} (\min(r))$
14. move container d to stack t , go to step 3.

圖 4. 產生取櫃同時整櫃工作計畫第一階段演算法步驟

演算法步驟 7 之目的在尋找理想之堆疊以暫時存放需要移置之貨櫃 d 。令 s 為至少有一個空儲位之堆疊，且 s 不為 d 所在之堆疊。假設存在有堆疊 s 滿足 $\min(s) > d$ ，亦即將貨櫃 d 置入堆疊 s 時不會產生壓櫃。由於堆疊之 $\min(.)$ 值愈大，該堆疊下一次有貨櫃出場之時間將愈晚，因此該堆疊愈能夠容納各種貨櫃作為暫存之用。因此演算法在步驟 5 找到滿足這種條件之所有堆疊之後，於步驟 7 選擇其中 $\min(.)$ 值最小之堆疊 t 作為貨櫃 d 移置之用。

選定移置之目標堆疊 t 之後，演算法再於步驟 8 判斷該堆疊之剩餘儲位數是否大於 1。若該堆疊存在超過 1 個空儲位，則演算法進入步驟 9，再檢查儲區中是否有仍其他貨櫃，適合於貨櫃 d 移入該堆疊之前，先一步移入同一堆疊中，以充份利用堆疊 t 之剩餘空間。在此階段，演算法逐一檢視儲區中所有堆疊最頂上之貨櫃 k ，尋找滿足以下兩條件者：(1) 貨櫃 k 壓住其他貨櫃、(2) $d < k < \min(t) - 5$ 。滿足此二條件之貨櫃原本即已造成壓櫃，而將其搬移到堆疊 s 之後並不會造成壓櫃，因此提早移動貨櫃 k 並不會增加總搬移次數，卻能夠避免未來需要移動時無法尋得適當暫存位置之可能性。若有超過一只貨櫃滿足上述二條件，則於步驟 11 選擇其中編號最大者移入堆疊 s 中。若移動過後堆疊 s 之空儲位數仍超過 1，則重複相同的尋找，直到再無適合之貨櫃，或堆疊 s 僅剩 1 個儲位為止。之後即於步驟 14 將貨櫃 d 移入堆疊 s 中。

若在尋找可以移置貨櫃 d 之堆疊時發現所有堆疊 s 均滿足 $\min(s) < d$ ，亦即每一堆疊均將因 d 之移入而產生壓櫃，則此時演算法進入步驟 13，選擇所有尚有可用儲位之其他堆疊中， $\min(.)$ 值最大者作為貨櫃 d 移入之用。此一設計之著眼在於， $\min(.)$ 值愈大之堆疊，其下一次需要將貨櫃 d 再次移出之時機愈晚。而隨著貨櫃之陸續裝車出場，儲區中之可用空間將持續增加。因此愈晚進行再次移置，再度造成壓櫃之機會愈小。

移置貨櫃 d 之後，演算法回到步驟 3 檢查裝車目標之貨櫃 c 是否仍被壓櫃。若是則重複前述移置步驟，否則即將 c 裝車，結束本回合並進入下一回合。演算持續至所有貨櫃均裝車離場為止。測試結果發現此一演算法能夠在極短的時間內得到極為接近搬動次數下限值之工作計畫。

以下將以圖 5 之儲區狀態為例，說明本演算法之執行過程。該儲區僅有一個 bay，其中有 6 個堆疊以及 12 只貨櫃。假設堆疊容許之最大高度為 6。第 1 回合之目標為取出貨櫃 1。由於該貨櫃已位在其堆疊頂上，因此可以直接取出裝車，之後儲區狀態成為圖 6 所示。第 2 回合之目標為取出貨櫃 2。然而該貨櫃壓於貨櫃 6 之下方。檢視儲區可以發現 $\min(1)$ 、 $\min(4)$ 、與 $\min(6)$ 之值依序為 9、10、8 均大於 6，而其中最小者為 $\min(6)$ ，因此在演算法步驟 7 選擇堆疊 6 為移置貨櫃 6 之目標堆疊。復於步驟 8 發現堆疊 6 之可用儲位大於 1，因此依據步驟 9 至 12 之計算，將貨櫃 7 先移置於堆疊 6，之後於步驟 14 將貨櫃 6 亦移入堆疊 6，最後將貨櫃 2 取出裝船，儲區形成圖 7 之儲區狀態。

第 3 回合之目標為取出貨櫃 3。由圖 7 可以發現該貨櫃被貨櫃 11 壓櫃。移置貨櫃 11 至任何堆疊均將造成壓櫃，而經過步驟 13 之計算，選擇其中 $\min(.)$ 值最大之堆疊 4 作為移置之堆疊。經過移置貨櫃 11 之後，於步驟 3 將貨櫃 3 取出裝車，完成本回合之演算。此時之儲區狀況示如圖 8。後續之演算過程較為單純，不再贅述。而所得之工作計畫示於圖 9。

1	6				
12	2	7		11	
9	5	4	10	3	8
1	2	3	4	5	6

圖 5. 儲區初始狀態

	6				
12	2	7		11	
9	5	4	10	3	8
1	2	3	4	5	6

圖 6. 取出貨櫃 1 後之儲區狀態

					6
12				11	7
9	5	4	10	3	8
1	2	3	4	5	6

圖 7. 取出貨櫃 2 後之儲區狀態

					6
12			11		7
9	5	4	10		8
1	2	3	4	5	6

圖 8. 取出貨櫃 3 後之儲區狀態

(1,1,U), (1,0,D), (7,3,U), (7,6,D), (6,2,U), (6,6,D),
 (2,2,U), (2,0,D), (11,5,U), (11,4,D), (3,5,U), (3,0,D),
 (4,3,U), (4,0,D), (5,2,U), (5,0,D), (6,6,U), (6,0,D),
 (7,6,U), (7,0,D), (8,6,U), (8,0,D), (12,1,U), (12,2,D),
 (9,1,U), (9,0,D), (11,4,U), (11,2,D), (10,4,U),
 (10,0,D), (11,2,U), (11,0,D), (12,2,U), (12,0,D)

圖 9. 說明例之工作計畫

3.4 利用最短路徑模型減少工作時間

於上一小節解得可行之工作計畫之後，演算法於第二階段利用最短路徑模型以進一步縮短起重機之工作時間。起重機吊起一只貨櫃之操作過程可分解為四個步驟：(1)大車由機當時所在之堆疊列移至目標堆疊列、(2)小車由所在之位置移至目標堆疊之位置、(3)夾櫃器由最高位置下降至目標高度、(4)夾櫃器夾起貨櫃後升至最高位置。同樣的，起重機放下一只貨櫃之操作過程亦可分解為四個步驟。其中三個與前述相同，而第 4 個步驟則為：夾櫃器釋放貨櫃後升至最高位置。在上述各步驟依序執行之假設下，可以正確計算起重機執行一個工作計畫所需之時間。

建立最短路徑模型所使用之輔助網路方法說明如下。首先觀察工作計畫之執行可以發現每一次貨櫃移置或裝車之動作均改變儲區之狀態。為此，演算法對工作計畫執行過程中之每一個儲區狀態均建立一個節點。而連接節點之節線則對應儲區狀態之前後關係。圖 9 之工作計畫所建立之輔助網路示於圖 10。其中節點 1 對應圖 5 所示之儲區初始狀態、節點 2、3、4 則依序對應圖 6、7、8 所示之儲區狀態。最後節點 18 則對應最終、儲區全空之狀態。

圖 10 之網路顯示了儲區狀態隨著工作計畫之執行而變化之過程。然而儲區由一種狀態變化成為另一種狀態之過程並不唯一。例如，圖 10 顯示由節點 11 至節點 13 之狀態變化係先將貨櫃 8 裝上卡車出場，之後將貨櫃 12 由堆疊 1 移置到堆疊 2。若對調此二搬動動作之順序，則儲區即以不同之過程，由節點 11 之儲區狀態轉變成為節點 13 之儲區狀態。此一替代路徑示於圖 11。而該圖同時亦顯示由節點 3 至節點 10 之另一替代路徑，亦即由節點 3 之儲區狀態轉變為節點 10 之替代路徑之另一種不同之過程。

如前所述產生多數替代路徑後之輔助網路示意如圖 12 所示。網路中之每一個節點對應一個儲區狀態，每一個節線對應由一個狀態變到到另一個狀態之一個貨櫃的搬動動作。由於該動作為明確已知，因此能夠精準計算其所需耗用之工作時間。以該工作時間作為各節線之長度時，輔助網路中由儲區起始狀態之節點到最終全空狀態之節點之間的最短路徑即為所有替代路徑之可能組合中，起重機具工作時間最短的一種組合。

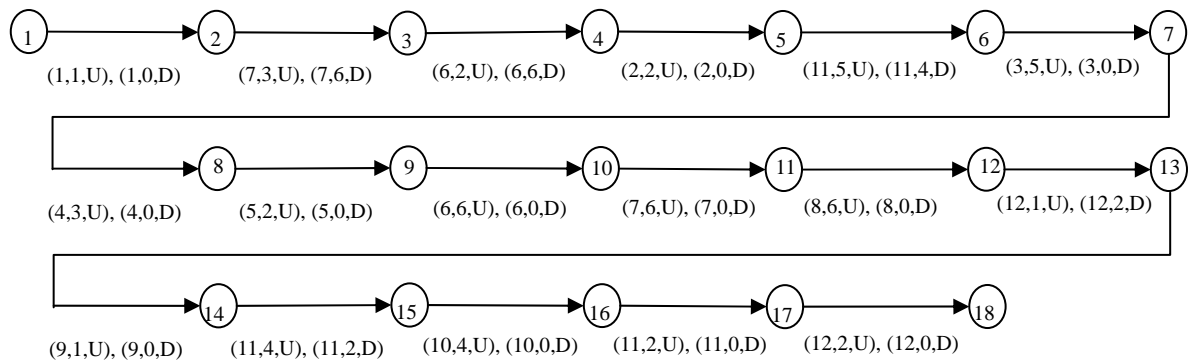


圖 10. 說明例工作計畫之輔助網路

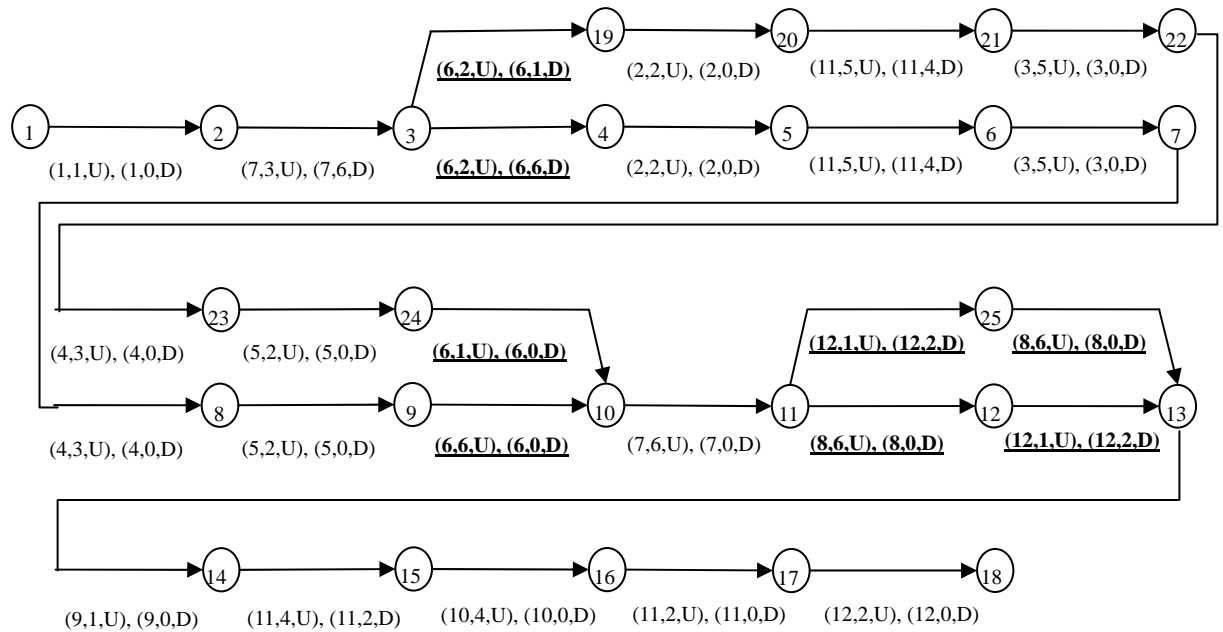


圖 11. 說明例工作計畫之輔助網路與替代路徑

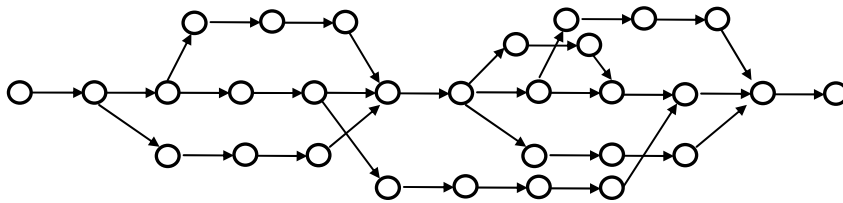


圖 12. 輔助網路與替代路徑示意圖

3.5 多吊、單一起重機模式

少數先進碼頭之 RMGC 裝有二或多個夾櫃器，稱為多吊 RMGC。多吊之 RMGC 目前尚處於測試階段，但可預期其為未來發展之趨勢。多吊之橋式起重機較為普遍，圖 13 之橋式起重機多吊夾櫃器可同時夾四個 20 呎貨櫃或二個 40 呎貨櫃。

多吊之 RMGC 由於一台小車配有多個夾櫃器，因此於操作時夾起一個貨櫃可以不必放下，即可再夾起另一貨櫃。故不需要如單一夾櫃器之機型，必須連續完成同一個貨櫃一次完整搬動的兩個貨櫃搬動操作 (x,a,U) 和 (x,b,D) 。亦即具有多吊能力之起重機可不需要在做完 (x,a,U) 後接著執行 (x,b,D) 。此一差異使得多吊機型之工作計畫更有彈性，亦更形複雜。



圖 13. 橋式起重機之多吊夾櫃器

處理多吊、單一台 RMGC 取櫃問題時，可用前小節之方法先產生單吊、單一台 RMGC 工作計畫。以此作為基礎，進一步於演算法第三階段中執行工作計畫貨櫃搬動操作之順序交換。由於 RMGC 配備多個夾櫃器，因此於工作計畫中執行交換時係以貨櫃搬動操作 (x,a,U) 或 (x,b,D) 為單位。而於 3.2 節所整理之工作計畫可行條件仍然有效。

於交換貨櫃搬動操作順序後，若檢查發現不可行則放棄之。否則即依據門檻接受法之原則決定接受或不接受新解。除此之外，並檢查是否有同一貨櫃被放在某堆疊後又立刻被夾起之狀況。若有則可同時刪除放下與夾起之操作。此一搜尋機制可達到有效利用多個夾櫃器之目的。亦即若小車僅配備一組夾櫃器，則任一個貨櫃被夾起後，放下之前無法再搬動任一其他貨櫃。但配備多組夾櫃器時，則可以其中一個夾櫃器夾著一個貨櫃，同時由其他夾櫃器進行貨櫃搬動。

3.6 二台起重機模式

本小節將模式推廣到二台 RMGC 同時工作之狀況，所考慮者為一個儲區中有兩台大小相同、共用軌道的 RMGC 的情形。這種狀況在實務上至為常見。而模式的目的則為求解如何充份利用二台起重機，以取櫃同時整櫃的方式依既定之順序取出所有貨櫃。

兩台 RMGC 需要遵守以下規則：

1. 避免碰撞：基於安全考量，兩台 RMGC 必須保持一定的距離，以避免碰撞。在實務上，兩台 RMGC 之間至少要相距一個 bay。亦即若有一台 RMGC 位在第 k 個 bay，則不可有其他 RMGC 在第 $k-1$ 、 k 、 $k+1$ 個 bay 停留或作業。

2. 不可互相穿越：由於兩台 RMGC 之大小相同且共用軌道，所以 RMGC 不可能互相穿越，也不可能從兩側繞過。

對此一問題，本研究所提出之方法，基本概念是利用前述基本模式產生工作計畫，再將原本由一台 RMGC 執行的工作計畫分配給兩台 RMGC，說明如下。為求方便，將二台起重機分別稱為 A 與 B。並令 m 為儲區中之 bay 之個數。

使用基本模式第一、第二階段演算產生工作計畫後，演算法於第三階段將貨櫃儲區依 bay 切割成前後兩個區塊，前半部由 A 機負責，後半部由 B 機負責。此時兩台 RMGC 所負責的區域即不相重疊。若儲區中的 bay 個數為奇數，則第 $(m+1)/2$ 個 bay 由 A 機負責，亦即令 A 機比 B 機多負責一個 bay。需注意的是由於貨櫃可在任兩堆疊之間搬動，因此兩機在工作的過程中仍有機會跨入另一機之區塊。

受到避免碰撞之規則之限制，兩機在必要時需要相互避讓。例如，若在某一時間 A 機於第 k 個 bay 夾起一個貨櫃，欲放置於第 $k+5$ 個 bay。同時 B 機停留在第 $k+2$ 個 bay。此時 B 機需要配合 A 機之需求而避讓至第 $k+7$ 個 bay 或更遠處。由於此種避讓之需求，因此在工作時 A 機將無法進入第 $m-1$ 個 bay 以及第 m 個 bay。同樣的，B 機將無法進入第 1 個 bay 以及第 2 個 bay。因此使用基本模式產生工作計畫時，不可產生在第 1、2 個 bay 與第 $m-1$ 、 m 個 bay 之間搬動貨櫃之動作。其餘則均相同。

將產生出來之工作計畫中的所有搬運操作，分配給兩台 RMGC 之原則為：

1. 將一個貨櫃由一處搬移到另一處，需要兩個貨櫃搬動操作 (x,a,U) 與 (x,b,D) ，若堆疊 a 或堆疊 b 位於第 1 個或第 2 個 bay，則 (x,a,U) 與 (x,b,D) 由 RMGC A 負責；若堆疊 a 和堆疊 b 中任一個位於第 $m-1$ 個或第 m 個 bay，則 (x,a,U) 與 (x,b,D) 交由 RMGC B 負責。

2. 若沒有第 1 點所描述的情形，則依貨櫃的起點堆疊決定負責的 RMGC。

依上述規則可以很容易地將工作計畫中的所有搬運操作分配給二台 RMGC。之後即可推估這二台機具完成整個工作計畫所需要的時間，方法說明如下。假設規畫期由時間為 0 時開始，而此時 A 機位在第 1 個 bay，B 機位在第 $m/2+1$ 個 bay 或第 $(m+1)/2+1$ 個 bay，視 m 為偶數或奇數而定。而兩機之小車均位在第 1 堆疊之位置，夾櫃器均位在頂端。

與儲區僅有單一 RMGC 之狀況不同的是，A 機與 B 機必須遵守兩機間隔至少一個 bay 之避碰規則，以及兩機不可互相穿越之限制。因此其中一機在移動大車時，可能另一機必須連帶移動，無法持續進行其工作。除此之外，起重機並有以下二種需要停等之狀況。第一，某機將某貨櫃放置於卡車上時，另一編號較小之貨櫃尚未搬運出場。出現此狀況時，該起重機必須暫停，待另一起重機將編號較小之貨櫃全部搬運出場後再恢復工作。第二，某起重機執行某項操作時將造成某一堆疊之貨櫃進出順序變更。例如，若依工作計畫，某堆疊需要依序置入 α 與 β 兩貨櫃。其中 α 貨櫃由 A 機負責搬運，而 β 貨櫃由 B 機負責搬運。若因為移動距離等因素使得 B 機得以較 A 機早執行 β 貨櫃之置入工作，則在推估工作時間的過程中需要令 B 機停等並避讓，待 A 機將 α 貨櫃置入堆疊並離開該 bay 之後，再由 B 機置入 β 貨櫃。

3.7 測試例

本研究所使用之測試例在計算搬動時間時，皆假設儲區只存放 20 呎櫃。RMGC 大車速度為 4 公尺/秒，小車速度為 2.5 公尺/秒，夾櫃器在未夾貨櫃的狀態下速度為 1 公尺/秒，有夾貨櫃時速度為 0.5 公尺/秒。大車加減速度時間損失假設為 40 秒。以下表 1 整理基本模式測試結果，並與 Lee and Lee[9]之成果相比較。表中數據顯示此模式成效優良，遠超過文獻之成果。

表 1. 基本模式測試結果

測例編號	Bay	Row	貨櫃數	搬動次數 下限	回合數	CPU ^{*1}	搬動次數 ^{*2}	工作時間(1) ^{*3} (秒)	工作時間(2) ^{*4} (秒)
D010606_0012_002	1	6	12	16	502	0.936	17	1698.99	1670.19
R011606_0070_001	1	16	70	100	506	2.282 (6304.28)	107 (118)	9956.43	9672.57
R101606_0720_001	10	16	720	1107	600	285.751 (20753.88)	1107 (1163)	166306	147986
R101606_0816_001	10	16	816	1279	617	255.935	1287	193306	172392
R101606_0864_001	10	16	864	1359	621	286.052	1384	207666	185619
R200806_0720_001	20	8	720	1121	602	260.586	1121	182396	159173
R301606_2160_001	30	16	2160	3321	898	8540.060	3321	616130	515086

註 1,2：括號內為 Lee and Lee[9]之成果。

註 3：第一階段求解結果，RMGC 之工作時間秒數。

註 4：第二階段求解結果，RMGC 之工作時間秒數。

表 2 整理雙吊、單一起重機模式測試結果。數據顯示使用雙吊夾櫃器能夠略為減少起重機之工作時間。

表 2. 多吊、單一起重機模式測試結果

測例編號	Bay	Row	貨櫃數	搬動次數 下限	回合數	CPU	搬動次數	工作時間(1) (秒)	工作時間(2)* (秒)
D010606_0012_002	1	6	12	16	503	1.846	16	1698.99	1563.12
R011606_0070_001	1	16	70	100	521	3.298	106	9956.43	9214.50
R101606_0720_001	10	16	720	1107	618	177.97	1107	166306	145320

註：使用雙吊夾櫃器。

表 3 則測試多吊、單一起重機之狀況。數據顯示小車之夾櫃器個數增加時，能夠進一步減少起重機之工作時間。

表 3. 測試例 R011606_0070_001 使用不同夾櫃器個數測試結果

夾櫃器個數	工作時間 (秒)	搬動 次數	用到 3 個夾櫃 器(次)	用到 2 個夾櫃 器(次)	用到 1 個夾櫃 器(次)	用到 0 個夾櫃 器(次)
2	9214.5	106	--	63 (29.7%)	106 (50%)	43 (20.3%)
3	9029.7	106	39 (18.4%)	80 (37.7%)	67 (31.6%)	26 (12.3%)
4	8904.9	106	52 (24.5%)	63 (29.7%)	54 (25.5%)	21 (9.9%)
5	8819.3	105	47 (22.4%)	60 (28.6%)	52 (24.8%)	21 (10%)
6、7、8	8788.1	105	47 (22.4%)	62 (29.5%)	52 (24.8%)	20 (9.5%)

表 4 則測試兩台起重機同時工作之狀況。數據顯示兩台起重機同時工作，能夠大幅減少總工作時間 30% 以上。然而兩台起重機之總工作時間則比單一起重機之工作時間略長，與預期相符合。

表 4. 兩台起重機模式測試結果

測例編號	Bay	Row	貨櫃數	搬動 次數 下限	CPU*	搬動 次數 (A)	搬動 次數 (B)	工作時間(A) (秒)	工作時間(B) (秒)
R101606_0720_001	10	16	720	1107	0.325	608	499	108170	108119
R200806_0720_001	20	8	720	1121	0.354	588	534	111520	111311

註：第三階段演算之 CPU 時間。前二階段之 CPU 時間與表 1 相同。

四、結論與後續研究

4.1 結論

本研究探討貨櫃儲區取櫃問題，目標是要求解如何以最少的搬動次數、最短的 RMGC 工作時間，將所有貨櫃搬離儲區。本研究將取櫃問題分為三類：單吊、單一台 RMGC 取櫃問題，多吊、單一台 RMGC 取櫃問題，以及單吊、兩台 RMGC 取櫃問題。本研究針對各個問題，分別發展求解最佳工作計畫的方法。

本研究提出兩階段方法以求解第一類的問題。在第一階段先以一啟發式演算法求得高品質、接近或等於搬動次數下限值之工作計畫。之後再於第二階段利用最短路徑模型以縮短起重機之工作時間。對第二類與第三類問題，則各發展不同的第三階段以接續求解，分別得到適合多吊起重機，以及二台起重機同時作業之工作計畫。

多吊、單一台 RMGC 取櫃問題則是將單吊、單一台 RMGC 之取櫃計畫，透過兩個貨櫃搬動動作之交換，將貨櫃搬動動作分配給數個夾櫃器處理。

單吊、兩台 RMGC 取櫃問題，為了避免兩台 RMGC 違反應遵守之規則，故在產生取櫃計畫的演算法中加入額外限制，之後將產生出之取櫃計畫分配給兩台 RMGC，以模擬的方法求得兩台 RMGC 完成其所負責之貨櫃搬動動作所需的時間。測試結果發現三個問題均能解得相當理想之結果，模式有能力求解 2000 個貨櫃以上之大型櫃場問題，達到真實問題的規模。而測試結果亦發現兩台起重機同時作業可以縮減工作時間達 30% 以上。

4.2 後續研究

本節提出有關貨櫃儲區取櫃問題，可再深入研究與探討的項目。

1. 設計更高效能演算法以改善單吊、兩台起重機取櫃問題中，取櫃計畫之分配與模擬。本研究在探討單吊、兩台起重機取櫃問題時，僅依照簡單的規則將取櫃計畫分配給兩台起重機，再據以推估兩台起重機完成其所負責之貨櫃搬動動作所需的時間。未來可設計更高效能之演算法以處理取櫃計畫之分配與模擬，以更進一步減少兩台起重機的工作時間。

2. 將研究成果推廣至多吊、兩台起重機取櫃問題。本研究已發展出處理多吊、單一台起重機取櫃問題及單吊、兩台起重機取櫃問題之方法，未來可擴展成多吊、兩台起重機取櫃問題。

3. 發展各種不同的機具取櫃計畫最佳化模式，例如：輪胎型門式起重機、跨載機、側載機等。本研究僅探討使用起重機之出口儲區，尚有許多儲區採用其他的作業方式並使用不同的機具，未來可考慮各種不同起重機具之特性，以本研究之成果為基礎，擴及各種不同起重機具工作計畫之求解。

4. 同時考慮整櫃與取櫃。實務上會利用前一艘貨櫃船裝卸作業結束至下一艘貨櫃船開始裝卸作業前這段時間進行整櫃，利用閒置中的機具，預先翻櫃，以減少壓櫃現象，縮短之後貨櫃裝船的作業時間。本研究僅考慮貨櫃船已經停靠在岸邊，必須在取櫃的同時進行翻櫃的情況。未來演算法應將整櫃和取櫃混合處理。

5. 推廣至貨櫃重號問題。相同種類的貨櫃，例如：大小相同、目的港相同等，彼此間在裝船沒有特定的先後順序。以編號代表裝船順序之要求時，同類貨櫃將具有相同的編號。此問題看似類似，然基本性質與本研究所探討之問題具有相當的基本差異。由於其在實務上的重要性，建議後續研究可以探討貨櫃重號的問題。

參考文獻

1. Baird, A.J., *Optimising the container transshipment hub location in northern Europe*. Journal of Transport Geography, 2006. **14**(3): p. 195-214.
2. Steenken, D., S. Vo, R. Stahlbock, *Container terminal operation and operations research - A classification and literature review*. OR Spektrum, 2004. **26**(1): p. 3-49.
3. Stahlbock, R., S. Voss, *Operations Research at Container Terminals: A Literature Update*. OR Spektrum, 2008. **30**(1): p. 1-52.
4. Kim, K.H., J.W. Bae, *Re-marshaling export containers in port container terminals*. Computers & Industrial Engineering, 1998. **35**(3-4): p. 655-658.
5. Lee, Y., N. Hsu, *An optimization model for the container pre-marshalling problem*. Computers & Operations Research, 2007. **34**(11): p. 3295-3313.
6. Lee, Y., S. Chao, *A neighborhood search heuristic for pre-marshalling export containers*. European Journal of Operational Research, 2009. **196**(2): p. 468-475.
7. Choe, R., T. Park, M.S. Oh, J. Kang, K.R. Ryu, *Generating a rehandling-free intra-block remarshaling plan for an automated container yard*. Journal of Intelligent Manufacturing, 2009: p. 1-17.
8. Kim, K.H., G.-P. Hong, *A heuristic rule for relocating blocks*. Computers & Operations Research, 2006. **33**(4): p. 940-954.
9. Lee, Y., Y.-J. Lee, *A heuristic for retrieving containers from a yard*. Computers & Operations Research, 2010. **37**(6): p. 1139-1147.
10. Forster, F., A. Bortfeldt, *A tree search procedure for the container relocation problem*. Computers & Operations Research, 2012. **39**(2): p. 299-309.
11. Caserta, M., S. Voß, M. Sniedovich, *Applying the corridor method to a blocks relocation problem*. OR Spektrum, 2011. **33**(4): p. 915-929.
12. Meisel, F., M. Wichmann, *Container sequencing for quay cranes with internal reshuffles*. OR Spektrum, 2010. **32**(3): p. 569-591.

國科會補助計畫衍生研發成果推廣資料表

日期:2012/01/31

國科會補助計畫	計畫名稱：多吊、多自動起重機貨櫃整櫃問題	
	計畫主持人：李宇欣	
	計畫編號：98-2221-E-006-151-MY2	學門領域：交通運輸

無研發成果推廣資料

98 年度專題研究計畫研究成果彙整表

計畫主持人：李宇欣			計畫編號：98-2221-E-006-151-MY2				
計畫名稱：多吊、多自動起重機貨櫃整櫃問題							
成果項目			量化			單位	備註（質化說明：如數個計畫共同成果、成果列為該期刊之封面故事...等）
			實際已達成數（被接受或已發表）	預期總達成數(含實際已達成數)	本計畫實際貢獻百分比		
國內	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	1	1	100%		
		研討會論文	0	0	100%		
		專書	0	0	100%		
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（本國籍）	碩士生	1	1	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		
國外	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	0	0	100%		
		專書	0	0	100%	章/本	
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（外國籍）	碩士生	0	0	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		

<p>其他成果</p> <p>(無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)</p>	無
---	---

	成果項目	量化	名稱或內容性質簡述
科教處計畫加填項目	測驗工具(含質性與量性)	0	
	課程/模組	0	
	電腦及網路系統或工具	0	
	教材	0	
	舉辦之活動/競賽	0	
	研討會/工作坊	0	
	電子報、網站	0	
	計畫成果推廣之參與（閱聽）人數	0	

國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

☒ 達成目標

☐ 未達成目標（請說明，以 100 字為限）

☐ 實驗失敗

☐ 因故實驗中斷

☐ 其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文：☐ 已發表 ☐ 未發表之文稿 ☒ 撰寫中 ☐ 無

專利：☐ 已獲得 ☐ 申請中 ☒ 無

技轉：☐ 已技轉 ☐ 洽談中 ☒ 無

其他：（以 100 字為限）

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

本研究提出三個數學模式，求解由貨櫃儲區中取櫃同時整櫃的最佳工作計畫。其基本模式可求解 2000 個貨櫃以上之規模的問題，除具有學術價值之外，並已達到真實問題之規模。而針對多吊、多起重機之模式則具有前瞻性。整體而言，本研究之成果應具有進一步實用化之潛力與價值。