

貨櫃碼頭出口儲區門型起重機 小車取櫃問題之研究

PICKING SEQUENCE ARRANGEMENT OF EXPORT CONTAINERS FOR A YARD BAY IN PORT TERMINALS

陳春益 Chuen-Yih Chen¹

趙時樑 Shih-Liang Chao²

(92 年 4 月 14 日收稿，92 年 6 月 10 日第一次修改，92 年 7 月 2 日
第二次修改，92 年 7 月 23 日定稿)

摘 要

本文以採用門型起重機之貨櫃碼頭出口儲區為研究對象，探討取櫃順序規劃問題。在機械結構特性考量下，門型起重機取櫃順序規劃問題可分兩個子問題：門型起重機主體（簡稱大車）之移動路徑問題、與駕駛台車含夾櫃器（簡稱小車）之取櫃問題。由於問題特性不同，本文僅就小車取櫃問題加以探討。同時，因該問題涉及許多實務性限制條件，如「重櫃優先取出」、「僅最上層貨櫃可被吊起」及「貨櫃僅可置於另一堆疊之上」等，本文利用限制式規劃協助分析，以期在實際作業時減少不具生產力的貨櫃搬移動作，據以提升出口儲區取櫃流暢性。

關鍵詞：貨櫃碼頭；門型起重機；出口儲區取櫃問題；限制式規劃

-
1. 長榮大學航運管理學系教授（聯絡地址：396 臺南縣歸仁鄉長榮路一段 396 號長榮大學航運管理學系；E-mail：cychen@mail.cju.edu.tw）。
 2. 陽明海運公司企劃部副課長（聯絡地址：206 基隆市七堵區明德一路 271 號；電話：02-24550377；傳真電話：02-24550777；E-mail：alex@yml.com.tw）。

ABSTRACT

Most container terminals use transfer cranes to stack containers in higher tiers to enhance their capacities. Hence, more containers may be stacked in the yard and picking complexity of loading them onto vessels may increase. According to the properties of transfer cranes, the problem of arranging their working sequence while picking export containers from the yard can be divided into two sub-problems: finding the optimal routing path for the crane to move among different bays, and arranging picking sequences for the trolley and the spreader of the transfer crane when the crane stays at a specific bay. This article focuses on the latter, and uses constraint programming, which accepts both logical and mathematical constraints, to develop a model to solve the sequencing problem for trolley and spreader. This model is verified with some cases.

Key Words: *Container terminals; Transfer cranes; Picking sequence of export containers; Constraint programming*

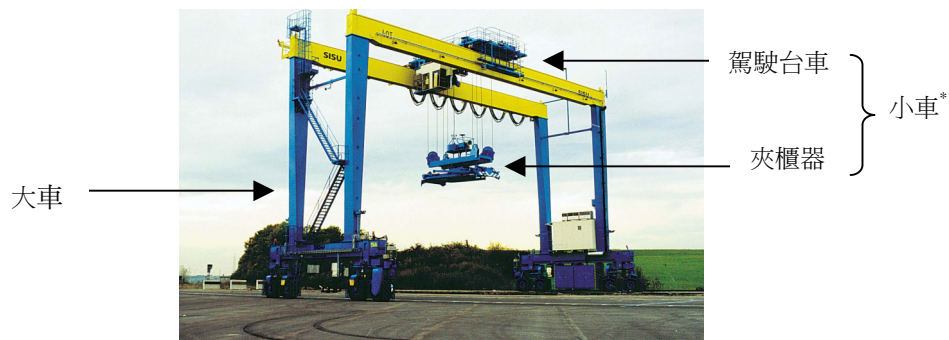
一、緒 論

船舶貨櫃運輸因具有運量高與成本低的優勢，已成為全球跨海洋區域間貨物運送的主要方式。由於貨櫃之體積與重量均十分龐大，在儲區之搬運與移動必須藉由起重機具與拖車始能進行，為縮短船舶滯港作業時間，碼頭營運者通常會要求託運人在船舶抵港之前將貨櫃送抵儲區集中暫存，以利船舶抵港時可連續將貨櫃由儲區拖送至船邊裝船。尤其在船舶大型化與高速化趨勢的影響下，單位艘次船舶於港口之貨櫃裝卸量大幅增加，此時，如何以最快的方式由儲區中取出貨櫃，拖送至船邊裝船，遂成為貨櫃碼頭營運者關心，並致力檢討改進的重要課題。

另一方面，為提升儲區容量以供更多貨櫃暫存，採用「排列緊密化、堆疊高層化」的方式儲放貨櫃，並搭配門型起重機進行吊卸的作業方式亦日漸為貨櫃碼頭所採用，此舉雖可大幅提升儲區容量，卻也容易導致不同屬性的貨櫃混合堆儲，對連續取櫃作業形成干擾，進而延誤貨櫃裝船效率。是故，於實際執行「取櫃裝船」作業之前，貨櫃碼頭會指派專人進行出口儲區取櫃順序之規劃，期能在符合船舶積載要求的前提下，儘量提升門型起重機之取櫃效率，以利貨櫃裝船作業之執行。

為達成在三度空間處理貨櫃吊卸工作之目的，門型起重機在結構上區分為起重機主體（實務上簡稱大車）、駕駛台車（trolley）以及夾櫃器（spreader）三部分（圖 1），相互搭配移動執行儲區吊櫃工作。如圖 2 所示，當門型起重機橫跨於貨櫃堆疊上方時，大車係沿 X 軸方向前後移動，以便於不同存放排間變換駐停位置；駕駛台車橫跨於大車上方，僅能沿 Y 軸方向左右移動，在不同存放列間變換駐停位置；當大車與駕駛台車皆完成駐停定位後，駕駛員會以鋼索垂直調整夾櫃器之高度（Z 軸方向），開始吊卸貨櫃。

實務上處理儲區貨櫃吊卸時，由於大車體積龐大且變換駐停位置後必須微調定位，故作業前會針對其駐停位置之變動次序與方向進行規劃，以減少實際作業時大車之駐停位置變換次數與往復移動距離^[1,2]。為使大車每次駐停時可連續處理貨櫃吊卸工作，屬性類似的貨櫃會盡量被堆儲於同一存放排內，故當大車變換駐停位置後（圖 2 之 X 軸方向），如何利用駕駛台車與夾櫃器吊卸貨櫃（圖 2 之 Y、Z 軸方向），遂成為另一項規劃性課題，尤其在取櫃裝船時，一般會在儲區屬性類似的貨櫃中優先取出重櫃裝入船艙底部，此時，取櫃順序之安排會直接影響儲區取櫃流暢性。



*：本文將駕駛台車與夾櫃器合稱小車，但實務上有時僅稱駕駛台車為小車。
資料來源：[3]。

圖 1 門型起重機之大車、駕駛台車與夾櫃器

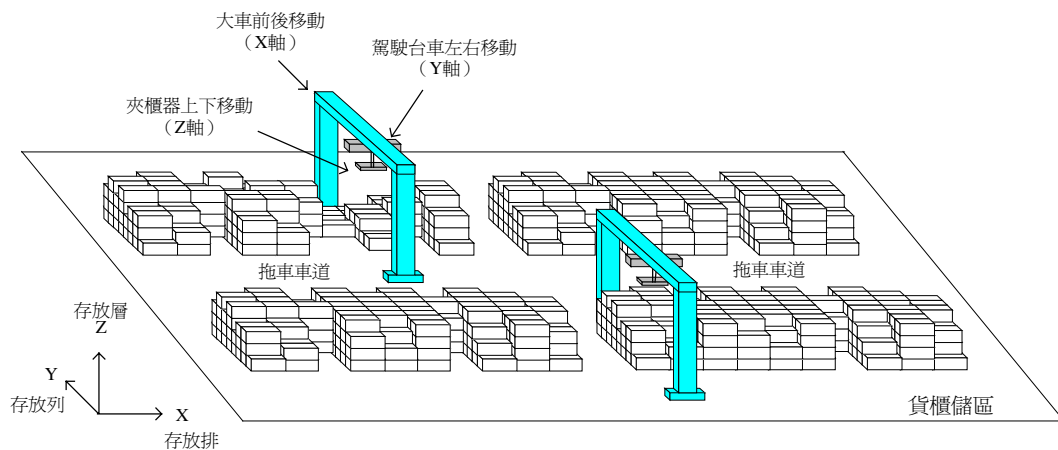


圖 2 門型起重機之大車、駕駛台車與夾櫃器移動方向示意

納入上述大車、駕駛台車及夾櫃器作業特性考量後，門型起重機出口儲區取櫃順序規劃問題可分解為大車移動路徑規劃與駕駛台車含夾櫃器（以下簡稱小車）取櫃順序規劃等兩個子問題，本文係針對後者進行探討。同時，因小車取櫃順序規劃涉及許多複雜的限制條件，故本文嘗試利用限制式規劃作為研究方法，協助構建小車出口取櫃順序規劃模式。本文以下共分為四節，第二節分析出口儲區小車取櫃問題之成因；第三節探討小車執行出口儲區取櫃作業時，所涉及之決策因素與限制條件，並建立小車出口取櫃順序規劃模式；第四節進行案例分析；結論與建議則整理於最後一節。

二、出口儲區小車取櫃問題

本節共分為三個小節，2.1 節分析出口貨櫃進儲與裝船之特性；2.2 節從起重機具使用的角度，說明小車作業時必須遵守的限制條件；2.3 節則根據前兩小節歸納出小車出口取櫃問題之成因，並探討實務上主要之處理策略。

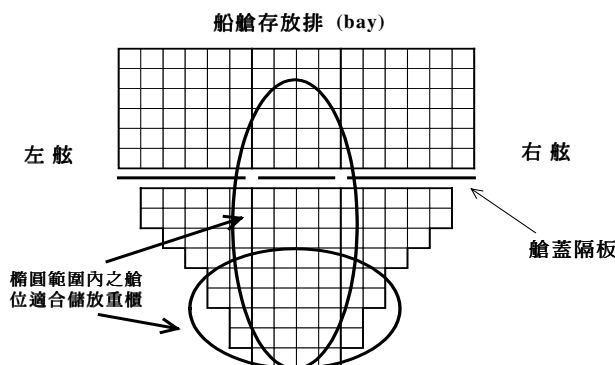
2.1 出口貨櫃進儲與裝船之特性

「隨機抵達、整批離開」是出口貨櫃進儲碼頭的最大特性。由於同一座碼頭通常會服務多條航線的船舶，每艘船舶預定裝載之出口貨櫃又包含若干個港口，因此，在碼頭後線之出口儲區中，會有許多不同屬性（如目的港、重量、尺寸）的貨櫃在不同時間點陸續進儲，此現象稱為出口貨櫃之「隨機進儲」。在出口貨櫃實際進儲前，貨櫃碼頭之儲區規劃員會預先將儲區劃分成若干個子分區（preferred area）^[4]，用以集中儲存特定屬性的貨櫃，以利後續門型起重機大車快速連續取櫃裝船。

值得一提，儲區為碼頭之有限資源，在出口貨櫃「隨機進儲」的影響下，若將儲區劃分為過多之子分區，在貨櫃進儲時，將增加門型起重機大車變換駐停位置之頻率與移動距離，且亦較難發揮門型起重機高度堆疊貨櫃之優點。因此，為提升儲區使用效率並減少門型起重機大車之移動，儲區子區域之預劃通常會以貨櫃所屬之船名、航次、目的港（vessel, voyage and destination，簡稱 VVD）作為主要分類依據，至於貨櫃重量等級則常被列為次要分類依據。換言之，就儲區作業的角度而言，VVD 相同的出口貨櫃會被盡量集中堆儲，其中重量等級不同的貨櫃則允許被混合堆儲，不再另行予以區隔，以提升儲區平均堆疊高度，並減少大車移動。值得一提，雖然貨櫃重量為儲區貨櫃堆儲之次要分類依據，然就船舶積載規劃（stowage planning）而言，貨櫃重量對於船舶航行穩定度卻具有決定性的影響。故於實際取櫃裝船前，積載規劃員除了依據尺寸與目的港口等屬性安排貨櫃裝船順序之外，尚須納入貨櫃重量之考慮因素，事先核算俯仰差（trim）與定傾高度（GM）等主要積載指標。一般而言，在其他屬性相同的情況下，較重的貨櫃通常會盡量安排於船艙內之底部與中央位置（圖 3）^[5]，以維持較佳之航行穩定度（stability）。

根據上述探討可知，出口貨櫃進儲時受到「隨機進儲」的影響，致使不同重量等級之

貨櫃於儲區中混合堆儲，然為求得較佳之船舶適航性，較重的貨櫃必須優先自儲區中取出，以利裝入船艙內靠近底部與中央的位置，因此，在取櫃過程中，常需執行調整貨櫃堆疊位置，但不將貨櫃取出儲區的吊櫃動作（實務上稱「翻櫃」），以利優先取出重櫃。而如何安排取櫃順序盡量減少翻櫃動作，又能符合「重櫃優先」的取櫃原則，即為小車取櫃問題之規劃目標。



註：本圖為貨櫃船舶船艙剖面，每一方格表示貨櫃存放艙位。

圖 3 貨櫃船舶積載規劃示意

2.2 小車取櫃作業之限制

貨櫃門型起重機之駕駛台車係指以駕駛員控制室為主的相關機電設施，其作用在於提供駕駛員一個安全的操控空間，並可利用控制室底部之鋼輪在大車頂端鋼軌上移動，配合鋼索長度之調整，以夾櫃器進行貨櫃吊卸工作（圖 1）。在採用門型起重機的儲區中，貨櫃係以「排列緊密化、堆疊高層化」的方式儲放，以提升儲區容量。為了將貨櫃置入或取出儲區，門型起重機必須藉由大車與駕駛台車駐停位置之變換來調整夾櫃器的位置，以達到可對每個儲存位置進行貨櫃吊卸的目的。駕駛台車因僅能於大車頂端鋼軌上移動，故其駐停位置之變換方向為儲區中由存放列所構成之維度（圖 2 之 Y 軸方向），變換範圍則為大車跨距所涵蓋之所有存放列所成的集合。然實務上進行取櫃順序規劃時，考慮的範圍除了駕駛台車本身於大車上駐停位置變換外，尚須納入駕駛台車駐停時，如何調整底部鋼索長度對不同高度的儲存位置進行存取（圖 2 之 Z 軸方向），因此，探討取櫃順序規劃問題時，問題的範疇包含存放列與存放層兩個維度。

門型起重機之小車主要用於執行貨櫃吊起（將貨櫃由儲存位置吊起，簡稱「吊櫃」），以及貨櫃放置（將貨櫃置入某儲存位置，簡稱「置櫃」）兩項基本動作，藉由此兩項基本動作的組合，門型起重機始可滿足儲區中各項貨櫃吊卸作業之需求。然基於作業安全考量以及機械結構等因素，小車於儲區進行貨櫃吊卸工作時，必須考慮以下幾項特性：

1. 大車靜止，小車始能作業

基於安全考量，在大車完成定位並完全靜止的情況下，小車始可進行貨櫃吊卸工作，換言之，當大車於各存放排間移動時，小車必須利用鋼索將夾櫃器升至最高，且不得夾住任何貨櫃，以避免發生碰撞的危險，有鑑於此，為減少因移動大車所造成的小車作業中斷，屬性相同之貨櫃往往會被盡量堆置於同一存放排中，以利大車每次駐停時，小車可連續進行取櫃。根據此一特性，出口儲區小車取櫃問題之探討範圍可界定為當大車於某存放排駐停靜止時，如何規劃小車於該存放排內之取出貨櫃的順序。

2. 執行「吊櫃」動作時，僅能吊起堆置於最上層的貨櫃

「吊櫃」動作為小車作業的基本動作之一，其目的在於將貨櫃由某儲存位置垂直吊起，接續動作為將吊起之貨櫃置入另一儲存位置，或是將貨櫃交由拖車載離儲區。小車執行「吊櫃」動作時，駕駛員必須使駕駛台車駐停於目標貨櫃所在存放列之正上方，垂下鋼索並利用夾櫃器鉤住目標貨櫃頂部鎖孔，再收縮鋼索將貨櫃吊起，故每次僅能吊起堆置於最上層的貨櫃。如圖 4 所示，小車僅可針對貨櫃 A、B、C 或 D 執行「吊櫃」動作，因為僅此四個貨櫃屬於堆置於最上層的貨櫃。

3. 執行「置櫃」動作時，僅能將貨櫃堆疊於最上層

小車作業的另一項基本動作為「置櫃」動作，亦即將貨櫃置入儲區中某一儲存位置，其前置動作必為 1 個「吊櫃」動作。同樣是礙於夾櫃器僅能鉤住貨櫃頂部，小車執行「置櫃」動作時只可將貨櫃堆置於某存放列中之最上層。易言之，若該存放列中原先並無貨櫃儲放，則可將貨櫃堆置於該存放列之地面儲存格 (ground slot)，若該存放列中已有貨櫃儲放，則小車只可將貨櫃堆疊於某該存放列中之最上層。必須注意的是，若存放列中貨櫃儲放已達高度上限 (如圖 4 之存放列 1)，則小車不可再於該存放列中執行「置櫃」動作，必須另行尋找適當的存放列堆置貨櫃。

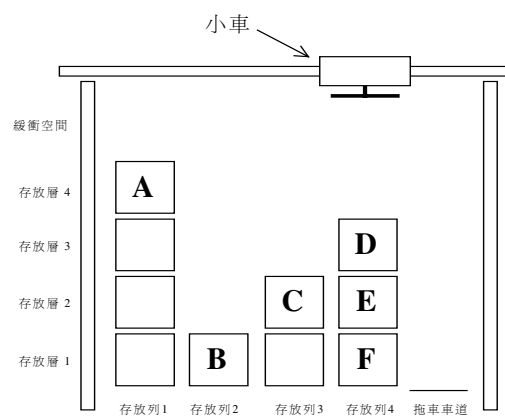


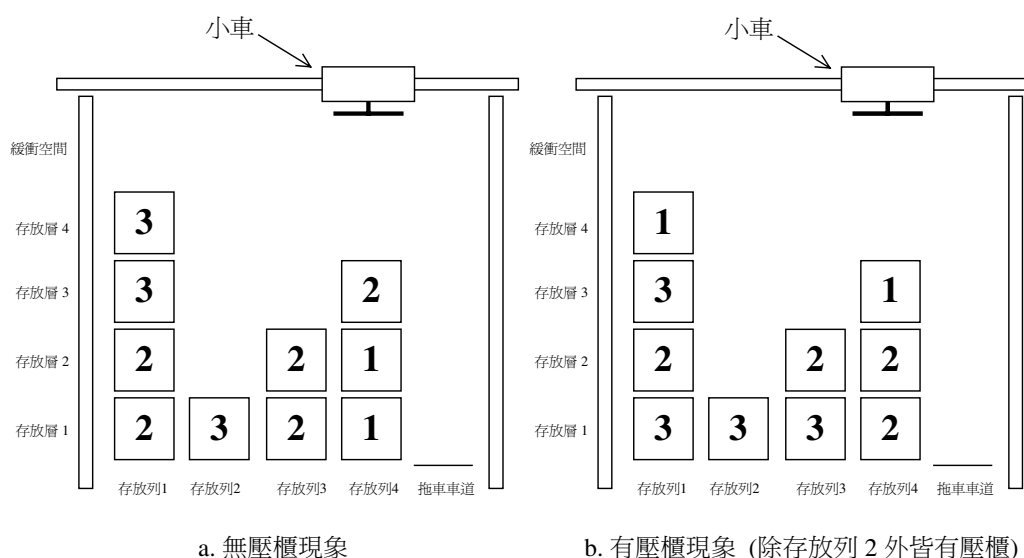
圖 4 特定存放排貨櫃存放示意

2.3 出口儲區小車取櫃問題之形成與處理

從 2.1 節可知，在「隨機進儲」的作用下，無法掌握重量不同貨櫃的進儲時間，又為了充分發揮門型起重機高度堆疊貨櫃的能力，碼頭經營者往往允許輕重貨櫃混合堆儲。但就船舶積載而言，出口貨櫃裝船時應優先自儲區中取出重櫃，裝入船舶靠近底部與中央的位置，以獲得較佳之航行穩定度（圖 3）。為了在輕重貨櫃混合堆疊的儲區中優先取出重櫃，可能會附帶產生一些不具生產力的「翻櫃」動作而降低儲區取櫃效率。

當大車於某存放排駐停時，若每一個存放列中所有較重的貨櫃均堆置於較輕貨櫃之上（圖 5a），則小車取櫃問題將非常容易處理，僅需遵循「重櫃優先」的原則將貨櫃取出即可；然在「隨機進儲」的影響下，實務上甚少有此理想的儲區堆疊狀態，絕大部分會發生輕、重櫃混合堆疊的情形。就任何一存放列而言，若存在輕櫃堆置於重櫃之上的情形，會對「重櫃優先」的取櫃原則形成干擾（實務上稱為「壓櫃」），如在圖 5b 中，除存放列 2 無壓櫃狀態外，其餘各存放列均存在「壓櫃」的狀態，此時小車取櫃問題將較為複雜，因為對於存在「壓櫃」狀態的存放列而言，必須先將重櫃上方的輕櫃暫時移至其他存放列（實務上稱為「翻櫃」），以利優先取出重櫃。

「翻櫃」動作為解除「壓櫃」狀態之必要動作。一個「翻櫃」動作實際上可分解為一個「吊櫃」動作與一個「置櫃」動作，亦即以夾櫃器將某一存放列最上層的貨櫃吊起，連同駕駛台車一起移動後，再將貨櫃堆疊於另一存放列之最上層。由於「翻櫃」動作並不能取出貨櫃交由拖車裝船，實務上將之稱為不具生產力的動作（unproductive movement）^[6]。



註：圖中數字表貨櫃重量分級，數字越大表示重量越重。

圖 5 存放列有／無壓櫃現象示意

然而，在「重櫃優先」的取櫃前提下，存放列中若存在「壓櫃」狀態，則不得不藉由「翻櫃」動作加以解除，在此情況下，小車取櫃順序規劃問題可定義為如何在「重櫃優先」的取櫃前提下，以「翻櫃」動作次數最少的方式將貨櫃取出，以提升出口儲區取櫃效率。

實務上，小車取櫃問題的處理策略主要可分成兩類，第一類為將「取櫃」與「翻櫃」分開處理，即利用船舶抵港前的空檔，預先以儲區起重機執行「翻櫃」動作，盡量解除各存放列之壓櫃狀態，以利船舶抵港後可連續執行「取櫃」動作，提升儲區取櫃流暢度；第二類是同時處理「取櫃」與「翻櫃」，即在儲區起重機數量不足，或起重機須執行其他吊櫃工作等無法預先執行「翻櫃」時，小車取櫃問題必須同時考慮「取櫃」與「翻櫃」，亦即在安排取櫃順序的同時，若遇壓櫃狀態，必須執行不具生產力的「翻櫃」動作，直到所有貨櫃皆被取出為止。

就支援裝船作業之效率而言，第一類策略因已預先執行「翻櫃」，故實際作業時可於儲區中連續執行「取櫃」，送至岸肩裝船，維持裝船作業之高度順暢性。但此策略必須於船舶抵港前的空檔，使用儲區起重機執行「翻櫃」，且貨櫃總數因未執行「取櫃」而維持不變，可能會增加「翻櫃」作業之複雜度；第二類策略不事先「翻櫃」，故不需額外占用儲區起重機作業時間，但實際「取櫃」時會被「翻櫃」動作干擾，降低儲區「取櫃」之順暢性，可能會延誤岸肩裝船作業之進行，然而因為貨櫃總量會隨著「取櫃」而陸續減少，小車取櫃問題之複雜度亦將隨著貨櫃總量減少而降低。

在研究方法上，許乃云^[7]曾以時空網路模式探討第一類小車預先翻櫃的策略，然由於取櫃與翻櫃順序問題所涉及之限制式較為複雜，該文以多元商品網路將不同屬性的貨櫃加以區隔，同時搭配多組附加限制式 (side constraints) 表示取櫃與翻櫃之各項作業限制。如在圖 5b 中，因涉及三種重量等級的貨櫃，若以網路分析探討其取櫃與翻櫃順序問題，必須構建三層相對應的時空網路，並另搭配附加限制式表示「重櫃優先取出」、「僅最上層貨櫃可被吊起」以及「貨櫃僅可置於另一堆疊之上」等限制條件，模式之建立較為複雜。

有鑑於此，本文嘗試利用「限制式規劃」為研究方法，建立小車取櫃順序規劃模式。採用限制式規劃主要乃因其除可接受傳統數學規劃之等式／不等式外，尚可同時接受其他形式的限制式，如若則 (if..than) 之邏輯條件，利於構建限制條件較為繁雜的模式，如趙時樑等^[2]、謝玉霜^[8]處理出口儲區多部大車移動路徑問題，即利用限制式規劃所提供之等式／不等式、以及邏輯條件等功能，處理多部大車同時作業之各項實務性限制，效果不錯，本研究亦考量採用限制式規劃協助分析小車取櫃問題。

如圖 5b 所示，由於小車取櫃每次僅能取出最上層的貨櫃、或吊起最上層的貨櫃，並置入其他存放列的最上層，若能利用基本的線性數學式搭配若則邏輯條件式表達問題，可大幅簡化模式建立之複雜度，並可視需要加入或調整各組限制條件，增加模式處理問題之彈性。此外，實務上多為「取櫃」與「翻櫃」一併作業，即採第二類策略處理小車取櫃問題，故本文嘗試運用「限制式規劃」協助構建模式，並針對同時處理「取櫃」與「翻櫃」的第二類策略加以探討。

三、限制式規劃模式之建立

本節旨在根據第二節所述之問題特性建立限制式規劃模式，協助規劃出口儲區小車取櫃順序；3.1 節先分析問題特性，據以討論建立限制式規劃問題之處理程序，作為建立模式之依據；3.2 節則根據 3.1 節之處理程序，說明本研究利用限制式規劃所建立之出口儲區小車取櫃順序規劃模式。

3.1 小車取櫃之處理程序

本小節旨在針對第二節所述之出口儲區小車取櫃問題，釐清其中所涉及之求解目標、限制條件與決策因素，作為建立限制式規劃模式之依據。本質上，小車取櫃問題之規劃原則很簡單，其目的為將某存放排內的貨櫃完全取出，但受限於每次取櫃時，必須在存放排內目前堆積的貨櫃中取出最重者，若遇最重的貨櫃因「壓櫃」而無法取出，則必須持續執行「翻櫃」動作，直到最重的貨櫃可被取出為止，接著再於尚未取出的貨櫃中搜尋下一個最重的貨櫃，並考量是否可被順利取出，如此重複，直到所有的貨櫃皆被取出。

根據上述原則，本研究首先定義「取櫃」與「翻櫃」兩個事件 (event)，據以研提處理原則。所謂「取櫃」事件，指的是利用小車在存放排中取出一個貨櫃，交由拖車送至船邊裝船。此事件發生之前提為現有的貨櫃堆疊中，至少有一個存放列的最上層貨櫃屬於目前最重的重量等級。一旦發生「取櫃」事件，則有一個決策因素必須決定，即由何存放列取櫃；選定了取櫃存放列之後，僅有該存放列之最上層貨櫃將被吊離儲區，其餘貨櫃之數量與位置皆保持不變。至於「翻櫃」事件，指的是利用小車在存放排中執行「翻櫃」動作 (詳第二節)，其目的在於解除某存放列之「壓櫃」現象。一旦「翻櫃」事件發生，其決策因素涉及兩個存放列，即何存放列的最上層貨櫃被吊起，以及被吊起的貨櫃該堆置於何存放列的最上層；在翻櫃事件中，除了被翻動的貨櫃之外，其餘貨櫃之數量與位置皆保持不變。

在定義上述兩個事件之後，本研究所提出之處理原則乃將整個小車取櫃順序規劃問題分解成若干個步驟，每個步驟僅能發生「取櫃」事件或「翻櫃」事件。如圖 6 所述，若存放排中仍有貨櫃，則必須檢查目前最重的貨櫃是否可直接取出，若可以則逕行發生「取櫃」事件，將目前最重的貨櫃取出；若無法直接取出重櫃，則強迫發生「翻櫃」事件，用以變動一個貨櫃的堆疊位置，完成之後再次檢查目前最重的貨櫃是否可直接取出，若可以則發生「取櫃」事件取出重櫃，若仍無法取出重櫃，則須發生「翻櫃」事件並再次檢查，如此反覆遞迴，直到所有的貨櫃皆被取出為止。根據此一處理程序，本研究以限制式規劃搜尋所有的可行解，而以總翻櫃次數最少的取櫃方式作為模式之最佳解。

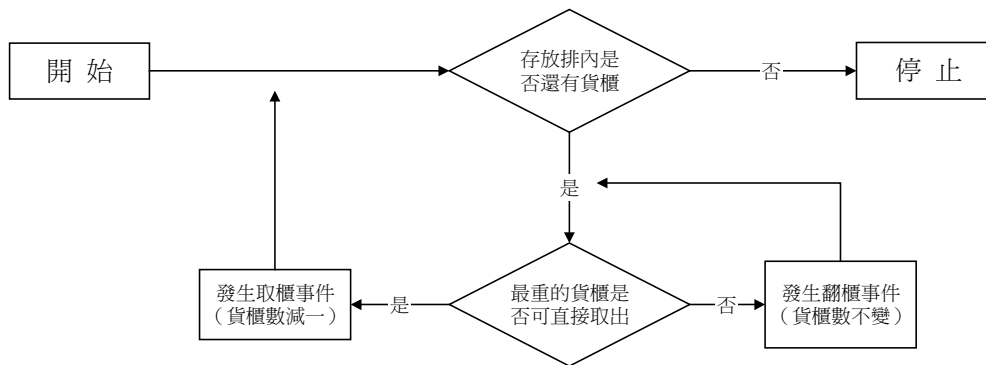


圖 6 小車取櫃順序規劃問題之處理程序

3.2 限制式規劃模式之建立

限制式規劃可分為限制式滿足問題 (constraint satisfaction problem) 與限制式最佳化問題 (constraint optimization problem) 兩大類，前者係利用電腦計算快速與儲存量大的特性，搜尋滿足限制式的所有可行解；後者則另需定義一目標函數，並針對所有可行解所對應之目標值進行試算比較，而對應目標值最佳的決策變數組合即為模式之最佳解^[9,10,11]。因本文所探討之小車取櫃問題除須滿足各項作業限制之外，尚須找出翻櫃次數最少的貨櫃取出順序，故屬於限制式最佳化問題，因此，建立模式時，除了定義變數之型態與值域以及限制式外，尚須定義目標函數，以利求解之進行。以下本文將根據限制式最佳化問題之要求，針對小車取櫃順序規劃問題定義變數，並研擬目標函數與限制式。

為利於說明，本文先設定 $\max_stage$, $\max_stack$, $\max_height$, $weight_class$ 四個參數，分別代表模式中所考慮的總步驟數、同一存放排中包含之存放列數、最大堆疊高度、以及貨櫃重量等級分類數。根據 3.1 節所建立的處理程序，並納入縮減值域空間以利列舉計算之考量，本文共設計三個決策變數與兩個紀錄變數，搭配目標函數與三組限制式，據以建立小車取櫃順序規劃問題之限制式規劃模式，以下分別就決策變數、紀錄變數、目標函數與限制式加以說明：

1. 決策變數：

- (1) $x(t, i, h) = \{0, 1, \dots, weight_class\}$ ：貨櫃存放變數，用以表示步驟 t 時，存放列 i 中，高度 h 之儲存位置所存放之貨櫃種類；數值越大代表越重的貨櫃，若其值為 0 表示該位置無貨櫃存放。以圖 7 為例，每一個步驟中的每一個儲存位置皆有其對應的貨櫃存放變數，如 $x(1, 3, 2) = 3$ 表示步驟 1 之存放列 3 的第 2 個存放層所堆儲的是重量等級 3 的貨櫃。
- (2) $pick_from(t) = \{0, 1, \dots, \max_stack\}$ ：取櫃決策變數，用以表示取櫃事件之決策因素；若此決策變數的值為 0，表示步驟 t 未發生取櫃事件；若此決策變數的值大於 0，表

示步驟 t 發生取櫃事件，且此決策變數的值即為步驟 t 選定的取櫃存放列。

- (3) $change(t, i, j) = binary$ ：翻櫃決策變數，用以表示翻櫃事件之決策因素；對任一個步驟 t 而言，均存在 $max_stack (max_stack - 1)$ 個 $change(t, i, j)$ ，若所有的 $change(t, i, j)$ 皆為 0，表示步驟 t 未發生翻櫃事件；若某一個且至多僅能有一個 $change(t, i, j)$ 為 1，表示步驟 t 發生翻櫃事件，即存放列 i 之最上層貨櫃將被吊出，而於步驟 $t+1$ 中置於存放列 j 之最上層。如圖 7 所示，在每個步驟中，任一存放列皆可將最上層的貨櫃翻至其他存放列，故每個步驟共有 6 個翻櫃決策變數。

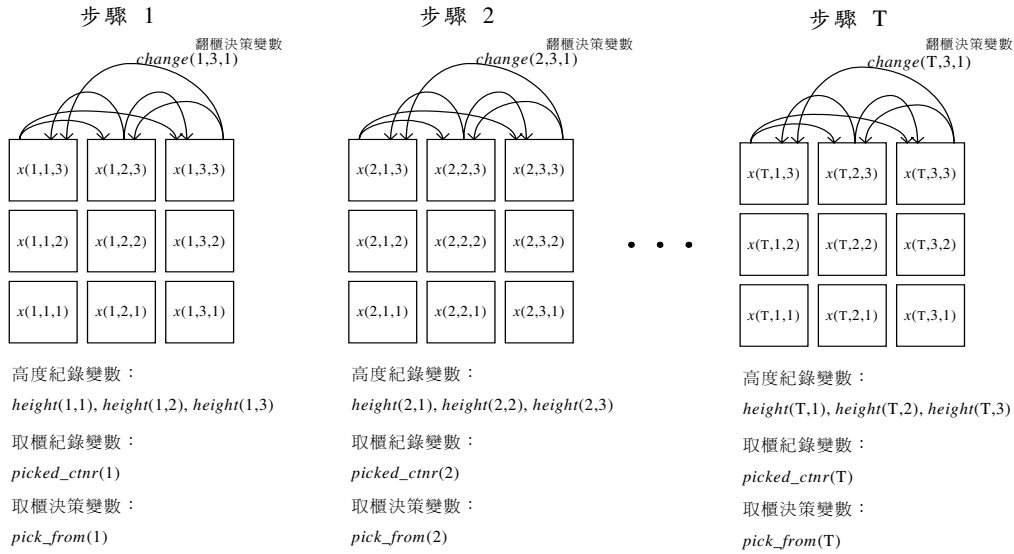


圖 7 小車取櫃問題之決策變數與紀錄變數 (設 $max_stack = 3, max_height = 3$)

2. 紀錄變數：

- (1) $picked_ctr(t) = \{0, 1, \dots, weight_class\}$ ：取櫃紀錄變數，用以紀錄步驟 t 時，取出貨櫃的重量等級；若步驟 t 未發生取櫃事件則其值為 0。
- (2) $height(t, i) = \{0, 1, \dots, max_height\}$ ：高度紀錄變數，用以紀錄步驟 t 時，各存放列之堆疊高度。

3. 目標函數：極小化所有步驟之翻櫃次數總和。

$$Minimize \sum_{t \in STEP} \sum_{i \in STACK} \sum_{j \in STACK} change(t, i, j) \quad (1)$$

其中： $STEP$ 為所有步驟所成的集合； $STACK$ 為所有存放列所成的集合。

4. 限制式：計分驅動限制式、取櫃限制式以及翻櫃限制式等三組，各組限制式之作用與撰

寫規則簡述如后：

- (1) 驅動限制式：用以控制各步驟事件之發生；對任一步驟而言，若已無貨櫃存在，則不發生任何事件，若仍有貨櫃尚未取出，則強迫發生取櫃或翻櫃事件，其撰寫規則為以下三項：
 - a. 對任一步驟 t 而言，若存放排中已無貨櫃，則不發生任何事件；
 - b. 對任一步驟 t 而言，若存放排中仍有貨櫃，且至少有一個存放列之最上層貨櫃為目前重量等級最高的貨櫃，則發生「取櫃」事件；
 - c. 對任一步驟 t 而言，若存放排中仍有貨櫃，且所有目前重量等級最高的貨櫃皆非最上層的貨櫃，則發生「翻櫃」事件。
- (2) 取櫃限制式：用以判斷是否允許發生取櫃事件，以及一旦步驟 t 發生取櫃事件，步驟 $t+1$ 各變數必須遵循之條件；因取櫃時僅由一個存放列取櫃，故本限制式之決策因素僅涉及一個存放列，其撰寫規則主要為以下四項：
 - a. 對任一步驟 t 而言，若存放列 i 中已無貨櫃，則不得由存放列 i 取櫃；
 - b. 對任一步驟 t 而言，若存放列 i 之最上層非步驟 t 中重量等級最高的貨櫃，則不得由存放列 i 取櫃；
 - c. 對任一步驟 t 而言，若選定由存放列 i 取櫃，則紀錄變數 $pick_ctnr(t)$ 等於存放列 i 之最上層貨櫃中的重量等級；
 - d. 對任一步驟 t 而言，若選定由存放列 i 取櫃，則步驟 $t+1$ 之決策變數與紀錄變數必須遵循下列條件：
 - (a) 存放列 i 之高度紀錄變數減 1；
 - (b) 存放列 i 之最上層貨櫃存放變數歸 0；
 - (c) 步驟 t 中，存放列 i 之非最上層貨櫃存放變數之值遞延至步驟 $t+1$ ；
 - (d) 步驟 t 中，除存放列 i 以外，所有存放列之所有貨櫃存放變數之值均遞延至步驟 $t+1$ 。
- (3) 翻櫃限制式：用以判斷是否允許發生翻櫃事件，以及一旦步驟 t 發生翻櫃事件，步驟 $t+1$ 各變數必須遵循之條件；因翻櫃時須由一個存放列吊出貨櫃，再置入另一個存放列中，故本限制式之決策因素涉及兩個存放列，其撰寫規則主要為以下四項：
 - a. 對任一步驟 t 而言，若存放列 i 中已無貨櫃，則不得由存放列 i 翻出貨櫃；
 - b. 對任一步驟 t 而言，若存放列 j 已達貨櫃高度上限，則不得將貨櫃翻入存放列 j 中；
 - c. 對任一步驟 t 而言，若選定由存放列 i 翻出貨櫃，則步驟 $t+1$ 之決策變數與紀錄變數必須遵循下列條件：
 - (a) 存放列 i 之高度紀錄變數減 1；
 - (b) 存放列 i 之最上層貨櫃存放變數歸 0；

- (c) 步驟 t 中，存放列 i 之非最上層貨櫃存放變數之值遞延至步驟 $t+1$ 。
- d. 對任一步驟 t 而言，若選定將貨櫃翻入存放列 j ，則步驟 $t+1$ 之決策變數與紀錄變數必須遵循下列條件：
 - (a) 存放列 j 之高度紀錄變數加 1；
 - (b) 存放列 j 之最上層貨櫃存放變數等於步驟 t 中，存放列 i 之最上層貨櫃存放變數；
 - (c) 步驟 t 中，存放列 j 之非最上層貨櫃存放變數之值遞延至步驟 $t+1$ 。
- e. 對任一步驟 t 而言，若選定由存放列 i 翻出貨櫃，並將貨櫃翻入存放列 j ，則步驟 t 中，除存放列 i, j 外之所有存放列之貨櫃存放變數之值均遞延至步驟 $t+1$ 。

在求解上，本文係利用軟體 OPL^[9] 撰寫限制式規劃模式並求解。限制式規劃係以「列舉」作為主要求解機制。因此在決策變數的設計上，必須納入盡量縮減變數個數與值域空間的考量，以利列舉求解，若決策變數的個數過多或值域空間過大，將因增加列舉所需時間而降低求解效率^[8]。例如，取櫃決策變數的設計可為 $pick_from(t)$ 或 $pick_from(t,i)$ ，前者每個步驟僅需一個決策變數，值域空間為 0 至 max_stack ，用以決定步驟 t 不取櫃或由何存放列取櫃；後者每個步驟則需 max_stack 個雙元 (binary) 決策變數，用以決定步驟 t 各存放列是否取出貨櫃，將增加列舉分支數目，較浪費記憶空間與求解時間，因此，基於求解效率之考量，建議採用 $pick_from(t)$ 作為取櫃決策變數。

四、案例分析

本節將進行案例分析，用以說明出口儲區小車取櫃順序規劃模式之建立與求解。4.1 節分別針對三個維度不同的案例進行模式建立與求解；4.2 節則根據 4.1 節之求解經驗，提出利用限制式規劃處理小車取櫃問題之心得。

4.1 案例計算－模式建立與求解

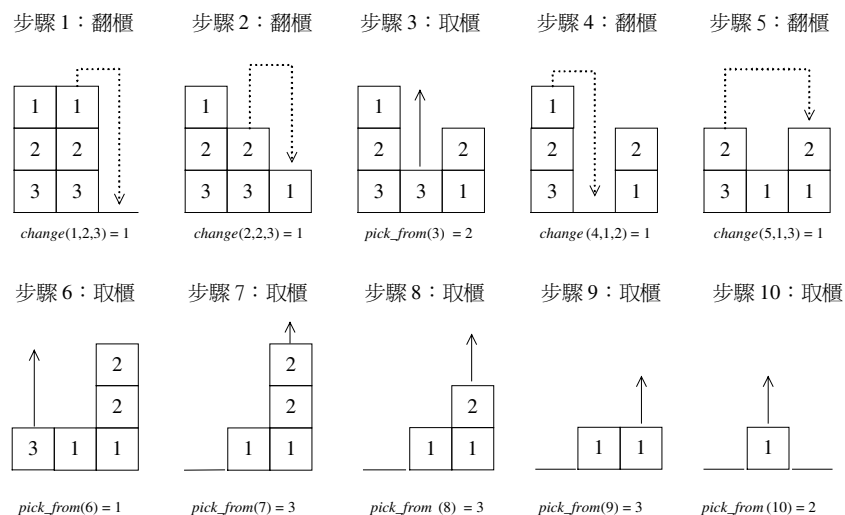
本小節共包含三個案例，用以說明如何利用本文所構建之限制式規劃模式，協助規劃出口儲區小車取櫃順序。案例一計有三個存放列與三個存放層，最多可堆儲九個貨櫃，在開始安排取櫃順序之前，已堆儲 6 個貨櫃，初始堆疊狀態如圖 8 之步驟 1。為測試模式之合理性，本例設計堆儲於存放列 1,2 之貨櫃均存在「輕櫃在上，重櫃在下」的壓櫃現象，以了解模式對於取櫃與翻櫃順序之安排。本文利用軟體 OPL 撰寫案例一之限制式規劃模式，其中包含決策變數與紀錄變數共計 252 個、限制式 2,323 組，經以 OPL 執行求解後，相關資料整理如表 1。由表 1 可知，案例一之求解共耗時 13 秒，獲得 896 組目標函數值相同的退化解，列舉求解依序納入決策變數時共產生分支點 2,509 個，比較列舉目標值時共試算失敗 1,614 次。

在求解結果方面，案例一共經過 10 個步驟將所有的貨櫃取出，圖 8 所示為最佳解中

之一組。由於在初始狀態 (步驟 1) 中, 存放列 1,2 之最重的貨櫃 (編號 3) 均為輕櫃 (編號 1,2) 阻擋而產生壓櫃現象, 無法直接取出, 故步驟 1,2 均發生翻櫃事件, 將存放列 2 上層之兩個輕櫃翻動至存放列 3, 以解除存放列 2 之壓櫃現象。求解過程直到步驟 3 始發生取櫃事件, 自存放列 2 中吊出重櫃 (編號 3), 完成之後, 所有貨櫃中最重者為堆儲於放列 1 之最下層貨櫃 (步驟 4), 為符合「重櫃優先」的取櫃原則, 步驟 4,5 均必須執行發生翻櫃事件, 以解除存放列 1 之壓櫃現象。自步驟 6 起, 整個問題已無壓櫃現象的存在, 故步驟 6 至 10 均發生取櫃事件, 依「重櫃優先」原則安排所有貨櫃之取出順序。值得一提, 事實上求解至步驟 6 即已完全解除問題中所有的壓櫃現象, 後續取櫃順序僅需依「重櫃優先」原則安排即可, 但因無法預知求解情形且問題規模較小, 故本例求解至步驟 10, 以了解模式對於小車取櫃問題之整體處理情形, 但亦同時增加了求解時間與退化解的數目。

表 1 案例一求解相關資料

求解步驟	退化解數目	求解時間	限制式	變數	分支點	試算失敗
10	896 組	13 秒	2,323 組	252 個	2,509 個	1,614 次



註：1. 實射線表示取櫃；虛射線表示翻櫃。

2. 圖中數字表貨櫃重量分級，數字越大代表重量越重。

圖 8 案例一求解結果

為了解本文模式處理規模較大問題之能力, 本節接續對案例二進行分析。案例二計有 4 個存放列與 4 個存放層, 最多可堆儲 16 個貨櫃, 在開始安排取櫃順序之前, 已堆儲 7

個貨櫃，初始堆疊狀態如圖 9 之步驟 1。由於存放列與存放層之數目較大，模式中每個步驟所對應之存貨、取櫃與翻櫃等三類決策變數亦將增加，此時若將求解步驟總數設定過多，將大幅增加決策變數之數目以及必須試算檢查的限制條件，降低列舉求解效率。有鑑於此，案例二首次求解時先嘗試設定求解至步驟 5，以觀察模式輸出情形。本例仍以軟體 OPL 撰寫限制式規劃模式，設定求解至步驟 5 後，共包含決策變數與紀錄變數共計 176 個、限制式 2,205 組，以 OPL 執行求解後，相關資料整理如表 2。由表 2 可知，案例二求解至步驟 5 共耗時 5 秒，獲得 720 組目標函數值相同的退化解，列舉求解依序納入決策變數時共產生分支點 1,427 個，比較列舉目標值時共試算失敗 708 次。

案例二首次求解結果整理如圖 9 (僅求解至步驟 5)。由圖 9 可知，初始狀態 (步驟 1) 中最重的貨櫃 (編號 3) 有兩個，分別堆疊於存放列 1,4 之最上層，可被順利取出。同時，存放列 1 存在兩個輕櫃 (編號 1) 堆疊於一個重櫃 (編號 2) 上方的壓櫃現象，其餘各存放列則無壓櫃現象的存在。經過步驟 1 至 3 連續執行取櫃動作後，步驟 4 中最重的貨櫃 (編號 2) 因壓櫃而無法取出，必須執行兩個翻櫃動作 (步驟 4,5)，解除存放排 1 之壓櫃現象後，至步驟 6 始可將編號 2 的重櫃取出。

表 2 案例二求解相關資料

求解步驟	退化解數目	求解時間	限制式	變數	分支點	試算失敗
5	720 組	5 秒	2,205 組	176 個	1,427 個	708 次
6	19,259 組	1,066 秒	2,751 組	215 個	25,512 個	10,340 次

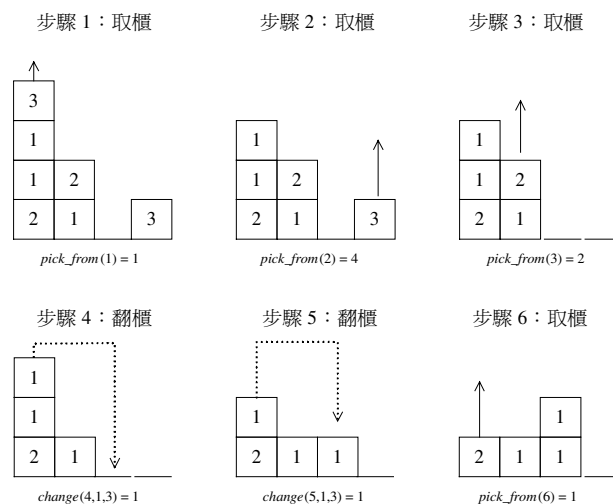


圖 9 案例二求解結果

值得注意的是，由於問題涉及之決策變數與限制式較多，案例二首先嘗試求解至步驟 5 為止，求解時間約 5 秒。若將求解步驟增加為 6，以軟體 OPL 撰寫限制式規劃模式後，決策變數與紀錄變數將增加為 215 個、限制式增加為 2,751 組，而退化解數、求解時間、分支點與試誤失敗次數等均大幅增加（表 2）；若進一步將求解步驟設定為 7，則會因決策變數與限制式太多，導致求解時間過長（超過十小時）而無法處理。

由案例二之分析結果可知，當問題規模較大時，不宜一次設定過多的求解步驟，否則將無法求解。然而，由於某些貨櫃（尤其是較底部的貨櫃）在求解過程中並不會改變儲存位置，因此，在開始求解大規模問題之前，可以預先檢視貨櫃儲存狀態，對於某些貨櫃的位置予以固定，以提升求解效率。為說明利用分段求解搭配預先固定某些貨櫃位置的啟發法，本節最後對一問題規模較大的案例進行分析。實務上，門型起重機係搭配「排列緊密化、堆疊高層化」的貨櫃儲存方式作業，門型起重機通常堆疊 4 至 5 層貨櫃高，寬度則為 4 至 5 個貨櫃寬（體積較大的軌道式門型起重機，其主體最大寬度雖可達 10 個貨櫃寬，但常設定 5 至 6 個貨櫃寬作為堆儲屬性相似貨櫃的基本單位），即 5×5 的維度為實務上常見的問題規模，故案例三係針對此維度所涉及的取櫃問題加以分析。

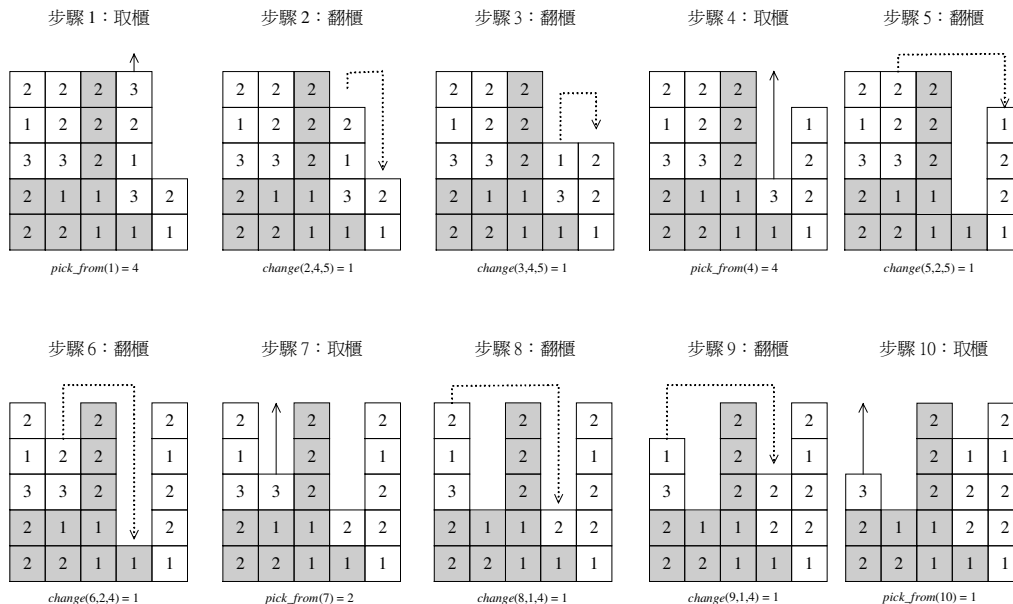
在開始安排取櫃順序之前，存放排中已堆儲 22 個貨櫃，初始堆疊狀態如圖 10a 之步驟 1。由於本例規模較大且貨櫃數目較多，不利於直接求解，故於求解之前先將某些貨櫃儲存位置予以固定，以減少不必要之列舉計算。本例之求解共分為兩個階段，第一階段先處理最重的貨櫃（編號 3），俟該等級的貨櫃全數被取出後，再釋放原來對於貨櫃位置固定的限制，繼續進行第二階段求解。

圖 10a 為第一階段求解結果，其中灰色方塊代表位置固定之貨櫃，在每個求解步驟中位置不會變動。因本階段僅需將編號 3 的貨櫃取出，故在步驟 1 中，靠近底部且位於編號 3 貨櫃下方的貨櫃均被固定位置。此外，存放列 3 已達堆儲上限（5 層），並因重櫃（編號 2）全數堆疊於輕櫃（編號 1）上方而無壓櫃現象，故將該列 5 個貨櫃均予固定位置。換言之，在求解開始之前，共將 10 個貨櫃的位置設為固定。本例第一階段設定求解至步驟 10，以 OPL 求解後，相關資料整理如表 3。由圖 10a 可知，初始狀態（步驟 1）中最重的貨櫃（編號 3）有四個，但僅有堆疊於存放列 4 之最上層者可被順利取出，故步驟 1 直接發生取櫃事件；步驟 2,3 均發生翻櫃事件，以利步驟 4 將編號 3 的貨櫃取出；步驟 5 至步驟 10 則依序發生兩次翻櫃搭配一次取櫃的事件，將所有編號 3 的貨櫃取出。

第一階段求解完成後，僅剩下編號 1 與 2 的貨櫃需安排取櫃順序。圖 10b 為第二階段求解結果，由於在求解開始前有 6 個編號 2 的貨櫃可直接取出，故先指定取出該 6 個貨櫃（步驟 0 中的灰色方塊），以縮減問題規模。第二階段設定求解至步驟 8，其中共進行三次翻櫃，將所有編號 2 的貨櫃取出；在步驟 8 中，僅剩下 7 個編號 1 的輕櫃，可不需翻櫃將之取出。

表 3 案例三求解相關資料

	求解時間	限制式	變數	分支點	試算失敗
第一階段	2,622 秒	7,685 組	454 個	180,994 個	180,983 次
第二階段	83,503 秒	7,912 組	436 個	134,660 個	134,655 次



註：1. 實射線表示取櫃；虛射線表示翻櫃。

2. 圖中數字代表貨櫃重量分級，數字越大代表重量越重。

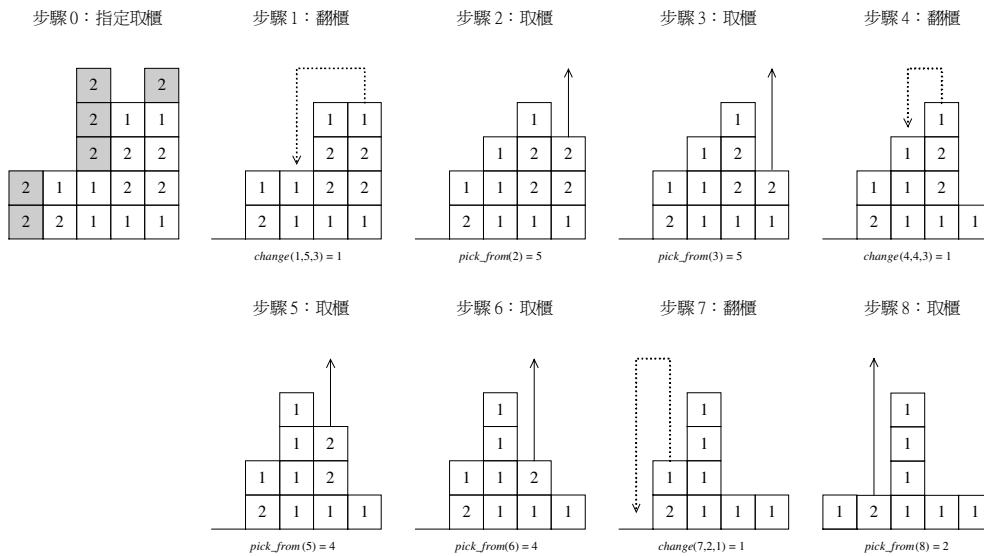
3. 灰色方塊代表位置固定之貨櫃，在每個求解步驟中位置不變動。

圖 10a 案例三求解結果（第一階段）

4.2 案例求解心得

經過上述三個案例分析之後，可歸納出幾點心得如下：

1. 在模式建立方面：本文利用軟體 OPL，根據 3.2 節所建立模式，分別就決策變數與紀錄決策變數之型態與值域加以定義，同時以式(1)作為目標函數，並根據 3.2 節所建立之三組限制式撰寫規則建立限制式，經案例分析計算後，求解結果均符合各項限制條件，並優先取出重櫃以供裝船，由此可證明本文以限制式規劃協助構建小車取櫃問題模式之可行性與合理性。



註：1. 實射線表示取櫃；虛射線表示翻櫃。

2. 圖中數字代表貨櫃重量分級，數字越大代表重量越重。

3. 灰色方塊代表指定取出之貨櫃。

圖 10b 案例三求解結果（第二階段）

- 在問題規模方面：由於「列舉」為限制式規劃之主要求解機制，故問題規模（如決策變數之數目與值域、限制式之數目）的大小會直接影響求解所需時間。如案例一僅涉及三個存放列與三個存放層，問題規模並不大，僅需 13 秒即可求解至步驟 10；案例二則將存放列與存放層各擴大為四，相較於案例一而言，任一個步驟 t 中，決策變數已大幅增加，如貨櫃存放變數 $x(t, s, h)$ 由 9 個增為 16 個；翻櫃決策變數 $change(t, i, j)$ 由 6 個增為 12 個；取櫃決策變數 $pick_from(t)$ 由 3 個增為 4 個。由此可知，當增加求解步驟時，決策變數與必須檢查之限制式亦將大幅增加，不利於限制式規劃進行列舉運算。
- 在求解效率方面：由案例分析可知，決策變數之個數以及相對應的值域空間對限制式規劃模式之求解有直接的影響。然而，除了決策變數的設計之外，問題規模的大小如存放列數目 (max_stack)、最大堆疊高度 (max_height) 以及總求解步驟 (max_stage) 等等，亦會影響求解效率，問題規模過大可能會導致求解時間過長而無法處理，以下提出三種減少問題規模之策略，用以提升模式求解效率，惟可能無法求得原問題之正確最佳解 (exact optimal solution)：

(1) 減少存放列數目 (max_stack) 與最大堆疊高度 (max_height)

由圖 7 可知，存放列數目 (max_stack) 與最大堆疊高度 (max_height) 直接決定小車取櫃問題之決策變數數目，包括取櫃決策變數 $pick_from(t) = \{0, 1, \dots, max_stack\}$ 、貨櫃存放變數 $x(t, i, h)$ 以及翻櫃決策變數 $change(t, i, j)$ 。實務上，同一存放排中之存放列

數目與最大堆疊高度隨門型起重機之形式而定，一般而言，輪胎式門型起重機之存放列數目與最大堆疊高度均為 4 左右；軌道式門型起重機之存放列數目則可達 10 左右，最大堆疊高度可達 5 層。在求解時若問題規模過大，可考慮將門型起重機之存放列批次分割，再行求解。

(2) 預先固定某些貨櫃的位置，減少問題之複雜度

本文所建立之小車取櫃問題模式旨在優先取出重櫃，並減少總翻櫃次數，根據此原則，可以在求解開始前預先檢視貨櫃堆疊狀態，若已有某些重量等級較高的貨櫃被堆置於某些存放列的最上層，即應先予取出，以減少後續列舉分支 (branch) 之數目；或者某些較底層的貨櫃位置亦可先予以固定，以提升求解效率。例如問題規模較大之案例三，即採用此一策略求解。

(3) 以分段求解代替一次求解，減少總求解步驟 (max_stage)

根據 4.1 節案例分析之求解經驗，小車取櫃問題涵蓋的步驟數目對求解效率之影響甚為敏感，若一次設定過多的步驟，常會導致求解時間過長 (超過數小時)，而無法獲得最佳解。因此，當問題規模較大而求解困難時，可嘗試先設定較少的步驟數目，並配合利用上述固定某些貨櫃位置的方式調整堆疊狀態，再行求解，惟此方式可能會與正確最佳解產生差距。

五、結論與建議

就採用門型起重機的儲區而言，出口貨櫃裝船是一個由門型起重機、拖車以及船邊橋式機三者所構成的動態性作業系統，藉由反覆進行儲區取櫃裝車、拖櫃至船邊、船邊吊櫃裝船以及空拖車返回儲區等工作程序，將儲區中的貨櫃裝入指定的船舶，若其中任何一個環節發生延滯，均會影響後續工作的進行，進而降低貨櫃裝船作業之整體效率。在追求船邊貨櫃裝卸效率時，除了上述各個實際作業環節必須正常運作外，更重要且更具影響力的關鍵因素在於作業前之取櫃順序規劃與安排。本文利用限制式規劃建立出口儲區小車取櫃順序規劃模式，期能在顧及小車作業特性與限制條件的前提下，協助規劃翻櫃次數最少的出口儲區取櫃順序。以下提出本文之結論與建議，以供實務單位及後續研究參考：

5.1 結論

1. 就問題特性而言，門型起重機出口儲區取櫃問題所涉及之決策因素相當多，除大車與小車的移動路徑與取櫃順序外，尚包括多部門型機之調派以及取櫃工作量之均化等等。本文從船舶積載規劃的角度，針對門型起重機小車取櫃子問題加以釐清，據以界定問題求解目標與限制條件，並利用限制式規劃建立模式，協助規劃出口儲區小車取櫃順序，可供進一步探討門型起重機出口儲區取櫃問題之參考。
2. 在模式價值方面，因實務上小車取櫃順序之安排取決於駕駛員的經驗，其取櫃順序雖然

可將貨櫃取出，但未必是總翻櫃次數最少的最佳解；本文旨在透過嚴謹的數理分析方法，構建模式協助規劃「總翻櫃次數最少」的取櫃順序，以期在實際執行取櫃時，可以盡量減少不具生產力的翻櫃動作，提升作業效率。

3. 在研究方法上，由於小車取櫃問題涉及許多邏輯性的限制條件，如「僅最上層貨櫃可被取出」、「貨櫃必須置於地面或堆疊其他貨櫃之上，不可懸空」以及「重櫃優先」取出等，故本文嘗試利用「限制式規劃」，表達此類限制條件；在決策變數的設計方面，因實務上對於貨櫃重量多僅區分為二至三類（貨櫃存放變數之值域），且存放列與存放層之規模亦有限，利於採用「限制式規劃」進行求解。由案例分析結果可證明以限制式規劃協助構建小車取櫃模式之合理性，惟當存放列與存放層之規模較大時，不宜一次設定過多的求解步驟，以避免影響求解效率。

5.2 建議

1. 實務上對於「取櫃」動作與「翻櫃」動作的處理策略主要可分成合併執行與分開執行兩類，各有其特性與優缺點。本文以合併執行「取櫃」動作與「翻櫃」動作為前提，建立小車取櫃順序規劃模式，建議未來可就兩種策略進行更深入的比較分析。
2. 從巨觀角度來看，出口貨櫃裝船作業係將分散堆儲於多個儲區存放排 (yard bay) 中的貨櫃裝入多個船艙存放排 (vessel bay) 中，屬於「多對多」規劃性課題，其中因涉及儲區起重機以及船邊橋式機之大、小車的移動與翻櫃等問題而十分複雜。本文將問題簡化為一個儲區存放排與一個船艙存放排的「一對一」規劃課題，並納入儲區起重機之小車作業特性加以探討。後續研究可進一步針對「多對多」的取櫃規劃課題加以探討，建立更接近實務作業的分析模式。

參考文獻

1. Kim, K. H. and Kim, K. Y., "An Optimal Routing Algorithm for a Transfer Crane in Port Container Terminals", *Transportation Science*, Vol. 33, No. 1, 1999, pp. 17-33.
2. 趙時樑、陳春益，「港區貨櫃場多部軌道式門型起重機移動路徑之研究」，*運輸計劃季刊*，第三十二卷，第四期，民國九十二年，頁 681-714。
3. [http:// www.kalmarind.de](http://www.kalmarind.de)。
4. Chen, C. Y. and Chao, S. L., "A Time-Space Model for Allocating Yard Space for Export Containers", *Transportation Planning Journal*, Vol. 33, No. 2, 2004, pp. 227-248.
5. Wilson, I. D., Roach, P. A., and Ware, J. A., "Container Stowage Pre-Planning: Using Search to Generate Solutions, A Case Study", *Knowledge-Based Systems*, Vol. 14, 2001, pp. 137-145.
6. Chen, T., "Yard Operations in the Container Terminal – A Study in the Unproductive Moves", *Maritime Policy and Management*, Vol. 26, No. 1, 1999, pp. 27-38.

7. 許乃云，「貨櫃儲區整櫃之最佳化網路模式」，國立成功大學土木研究所碩士論文，民國九十一年。
8. 謝玉霜，「限制式規劃應用於港區貨櫃場軌道式門型起重機移動路徑之研究」，國立成功大學交通管理科學研究所碩士論文，民國九十年。
9. ILOG, Inc., *ILOG OPL Studio 3.5 Reference Manual*, 2001.
10. Heipcke, S., “Comparing Constraint Programming and Mathematical Programming Approaches to Discrete Optimization – The Change Problem”, *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 50, 1999, pp. 581-595.
11. Barták, R., “Constraint Programming: In Pursuit of the Holy Grail”, *Proceedings of Week of Doctoral Students (WDS99)*, Part IV, MatFyzPress, Prague, 1999, pp. 555-564.

