

國立成功大學  
工業與資訊管理學系碩士在職專班  
碩 士 論 文

以模擬最佳化求解公共自行車共享系統  
之初始車輛配置策略

A Simulation Study on the Optimal Initial Bike Deployment  
for Public Bike Sharing Systems

研 究 生：劉宜青

指導教授：王逸琳 博士

中華民國一百零一年八月

國立成功大學

碩士在職專班論文

以模擬最佳化求解公共自行車共享系統之初始  
車輛配置策略

A Simulation Study on the Optimal Initial  
Bike Deployment for Public Bike Sharing  
Systems

研究生：劉宜青

本論文業經審查及口試合格特此證明

論文考試委員：王逸琳



蔡青志

李宇欣

指導教授：王逸琳

系(所)主管：黃宇和

中華民國 101 年 5 月 28 日

## 摘要

近年來，因為國際油價格高漲不下與溫室效應的影響，全球積極提倡節能減碳的活動，鼓勵民眾使用零污染或低污染之交通運輸工具，以減少交通工具帶給環境的衝擊，而為了能使環境能夠永續發展，標榜綠色交通的自行車租借系統，則於近幾年來在世界各大都會區蔚為風尚。以環保概念所設置的自行車租借系統，標榜騎乘者自助租還，倘若營運單位未針對各租借站配置適當的初始自行車總量，則租借者可能面臨「無車可借」或「無位可還」的情況，因而降低系統服務品質與使用率，甚而導致整個系統的失敗。

針對每日隨時變動的租還需求與不同的租借情境，本研究採用以一啟發式演算法結合模擬最佳化（Optimization via Simulation；OvS）的排序與選擇程序（Ranking and Selection；R&S）方式。在系統數龐大的空間中，搜尋最適解之集合，再以兩階段的選擇機制，先刪除表現值較差的系統，再從剩下的系統增加抽樣數，計算其平均績效表現值，並且考慮租借系統中之各站租借需求比例，從模擬實驗中找出在信心水準之下具有最佳期望績效的初始車輛配置方式與運補車數量，以減少顧客總等待時間或人次，進而提升租借系統整體服務水準。

關鍵字：自行車租借系統；啟發式演算法；模擬最佳化；排序與選擇程序

# Abstract

In order to catch the dynamic traffic of the real-world bike sharing systems in practice, this paper presents simulation models that mimic the movements of bikers generated based on historical rental data. Using these simulation models as a core, we further show how to calculate the optimal initial bike deployment for each rental site by techniques of Ranking and Selection in the fields of Optimization via Simulation. By integrating the procedures of ranking and selection into the Particle Swarm Optimization algorithmic framework, we can converge to a good solution within shorter time. In addition, we also evaluate the performance of the estimated initial bike deployment obtained by a simplified linear programming model, and conclude that our proposed technique gives better deployment, and should be useful for supporting the logistics decision in practice.

**Keywords** : Bike Sharing Systems, Ranking and Selection, Optimization via Simulation, Particle Swarm Optimization

## 致謝

本論文得以順利完成，首先要感謝指導教授王逸琳老師的指導，謝謝老師在這研究所兩年期間，無論是在學術研究或是課業知識上給予細心的指導，也讓學生學習到面對問題時的處事態度，在此謹致上由衷的感謝，感謝老師無私的付出。

在論文提案與口試期間，承蒙李宇欣老師、蔡青志老師與張裕清老師對本論文提供研究方向的建議，並指出本研究之缺失以及仍須改善之處，使本論文能夠更加嚴謹與完善，謹此表達學生的敬意與謝忱。

在研究所修業期間，感謝所有 LAB61205 夥伴們的照顧與幫助，也謝謝博班的燕楨學姐與其它研究室的同學們這一路上的協助與支持。而在課堂上也蒙受雅玲和進祥的幫助與指導，在此特別地感謝。在重拾課本的期間所需要投注的心力，不單單靠自己就能達成，所幸能夠認識了這群好朋友好同學，讓我在跨入資訊領域中助益良多，故再次感謝。

此外，還想對我的麻吉朋友—小喻說聲謝謝，謝謝你無論在工作上還有課業上都給予青仔無限的支持、協助與鼓勵。

最後，要特別感謝我最愛的家人，謝謝我的爸爸、媽媽、大哥、二哥、二嫂還有最可愛的亞亞，謝謝你們在我求學期間，一直支持我、鼓勵我，讓我能順利地完成學業與研究，我愛你們！

將此篇論文獻給我最尊敬的指導教授與我最愛的家人，誠心地感謝您們，謝謝！

劉宜青 謹致

2012.08

# 目錄

摘要 .....	i
Abstract .....	ii
致謝 .....	iii
目錄 .....	iv
表目錄 .....	vii
圖目錄 .....	viii
<b>第一章 緒論 .....</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景 .....	1
1.2 研究動機與目的 .....	4
1.3 論文架構 .....	5
<b>第二章 文獻探討 .....</b>	<b>6</b>
2.1 自行車租借系統建置策略 .....	6
2.1.1 確定型資料之租借系統 .....	7
2.1.2 不確定型資料之租借系統 .....	8
2.2 自行車車輛配置與運補 .....	9
2.3 模擬最佳化 .....	11
2.4 排序與選擇程序 .....	14
2.4.1 無差異程序 .....	15
2.4.2 子集合選擇程序 .....	16
2.5 粒子群演算法 .....	18
2.6 小結 .....	21

<b>第三章 公共自行車租借系統之初始車輛配置</b>	<b>22</b>
3.1 模擬最佳化之研究方法	22
3.2 問題描述與假設	24
3.3 自行車租借系統之模擬模式	25
3.3.1 無自行車運補策略模式	26
3.3.2 簡單自行車運補策略模式	28
3.4 以 PSO 結合 R&S 求解租借站之初始車輛配置問題	31
3.4.1 研究架構	31
3.4.2 排序與選擇程序之 NSGS 模式	32
3.4.3 模式範例說明	37
3.5 以需求比例求解租借站之初始車輛配置問題	41
3.6 小結	42
<b>第四章 模擬資料與數值分析</b>	<b>43</b>
4.1 模擬之情境設定與資料產生	43
4.1.1 模擬之情境設定	44
4.1.2 模擬之初始資料	45
4.2 數值分析	47
4.2.1 租借情境之 skewed distrubution	47
4.2.1.1 NR 模擬模式	48
4.2.1.2 SR 模擬模式	51
4.3 小結	55

第五章 結論與未來研究方向 .....	56
5.1 結論與貢獻 .....	56
5.2 未來研究方向 .....	58
參考文獻 .....	59





## 表目錄

表 3.1：租借站之資訊.....	38
表 3.2：租借者之需求資訊.....	38
表 3.3：租借站之資訊.....	39



## 圖目錄

圖 1.1：YouBike 微笑單車租借站點分佈圖 .....	3
圖 1.2：C-Bike 租借站點分佈圖 .....	3
圖 2.1：貨櫃調度決策流程 .....	10
圖 2.2：模擬最佳化之模型 .....	12
圖 2.3：模擬最佳化方法 .....	12
圖 2.4：模擬時間控制方法 .....	14
圖 2.5：粒子群演算法之流程圖 .....	20
圖 3.1：NR 模式之租借者抵達租借站點租車流程虛擬碼 .....	27
圖 3.2：NR 模式之租借者抵達租借站點還車流程虛擬碼 .....	28
圖 3.3：SR 模式之自行車租借系統執行運補作業流程虛擬碼 .....	29
圖 3.4：SR 模式之指派運補車去租借站放置自行車流程虛擬碼 .....	30
圖 3.5：SR 模式之指派運補車去租借站拿取自行車流程虛擬碼 .....	30
圖 3.6：NR 模式結合 NSGS 程序之 Screening 虛擬碼 .....	34
圖 3.7：NR 模式結合 NSGS 程序之 Screening 流程圖 .....	35
圖 3.8：NR 模式結合 NSGS 程序之 Selection 虛擬碼 .....	36
圖 3.9：NR 模式結合 NSGS 程序之 Selection 流程圖 .....	37
圖 4.1：法國巴黎 Velib 自行車租借系統規模示意圖 .....	44
圖 4.2：NR 模式之租車等待人數（需求比例 1：1） .....	49

圖 4.3：NR 模式之租車等待人數（需求比例 3：1） .....	49
圖 4.4：NR 模式之還車等待人數（需求比例 1：1） .....	50
圖 4.5：NR 模式之還車等待人數（需求比例 3：1） .....	50
圖 4.6：SR 模式之租車等待人數（需求比例 1：1） .....	52
圖 4.7：SR 模式之租車等待人數（需求比例 3：1） .....	52
圖 4.8：SR 模式之還車等待人數（需求比例 1：1） .....	53
圖 4.9：SR 模式之還車等待人數（需求比例 3：1） .....	53
圖 4.10：運補車之績效表現值 .....	54
圖 4.11：模擬方法之運補績效表現值 .....	54



# 第一章

## 緒論

### 1.1 研究背景

近年來因為汽機車所帶來的空氣污染導致的溫室效應逐漸擴大，對現今環境與生態造成衝擊；再加上國際石油價格的高漲，以及節能減碳的環保意識抬頭，為使環境能夠永續發展，全球許多都會區已積極地推廣綠色交通（Green Transportation）。而常見的綠色交通工具有捷運、公車、電動車、自行車與步行等，其中自行車能節除能減碳兼健身外，在都會區又能舒緩交通壅塞，因此近年來在世界各大都會區紛紛出現自行車租借系統。

依租借者租借自行車之目的，我們可將自行車租借系統區分為「休憩型」和「通勤型」等兩大類型。其中，休憩型自行車租借系統之租借站通常設置於觀光旅遊景點附近，其租站站的數量較少，且必須於原地租還自行車；而通勤型自行車租借系統之租借站則大多採用無人化管理之自助租還車方式，旨在提供通勤族短程接駁之服務，並允許租借者可異地租還（甲地租，乙地還），通常其租借站的分佈位置會被設置成足夠密集（例如：平均 300 至 500 公尺即有一個租借站），以方便租借者能夠就近租還自行車，此外，在大眾運輸工具轉乘站（例如：捷運站、公車站）、住宅區或辦公大樓的附近，更應設置自行車租借站以供通勤族使用。本研究重點將針對「通勤型」之自行車租借系統做相關研究與探討。

自行車租借系統的發展歷程，大致上可分為三個世代（DeMaio, 2009；Shaheen et al., 2010）。第一代自行車租借系統始於 1965 年，其設置目的主要是提供公共大眾免費使用且無固定擺放位置，租借者可隨時隨地租還自行車，但在此經營模式下常發現自行車遺失或被民眾佔為己用的情況，其衍生的問題難以有效地解決，因而導致第一代自行車租借系統失敗。而 1991 年開始的第二代自行車租借系統改進許多第一代系統的缺點，並提供固定位址的自行車租借站以租還自行車，但匿名租借自行車的方式，仍無法處理自行車車失竊問題。為此，目前最先進的第三代自行車租借系統結合了新科技產品，諸如 RFID、晶片等，以防止自行車被竊。舉例來說，法國巴黎的 Velib 提供電子化磁卡會員制，可追蹤自行車之位置。

第三代自行車租借系統中，以法國 Velib 最有規模且最具有代表性，共有 1,800 個租借站點和 20,000 多輛自行車（資料來源：<http://en.velib.paris.fr/>），並且提供民眾前 30 分鐘免費騎乘的優惠。而台灣目前的自行車租借系統，以台北的「YouBike 微笑單車」和高雄的「C-Bike」為代表。前者主要以通勤為目的，在台北市信義區共設置 11 個租借站（如圖 1.1 所示），提供 500 輛自行車供民眾租借（資料來源：<http://www.youbike.com.tw/>）；後者則結合通勤與觀光旅遊，總共有 74 個租借站（如圖 1.2 所示）、800 輛自行車可供租借使用（資料來源：<http://www.c-bike.com.tw/>）。此兩大自行車租借系統皆屬於第三世代自行車租借系統，其營運模式亦仿效法國巴黎的 Velib，皆提供前 30 分鐘免費騎乘的優惠方案。

與自行車租借系統同屬租借性質（異地租還）的汽車租借系統，其租借者若無同等級之車輛可租，則可享以相同租金租到更高級的汽車，並以最大化租車利潤為目標來考慮其汽車之車輛配置方式，因此與以環保、節能減碳為目的之自行車租借系統有所不同。自行車租借系統不僅可發展為大眾交通工具，還可降低噪音、空氣等污染，以利環境與生態永續發展。



圖 1.1：YouBike 微笑單車租借站點分佈圖

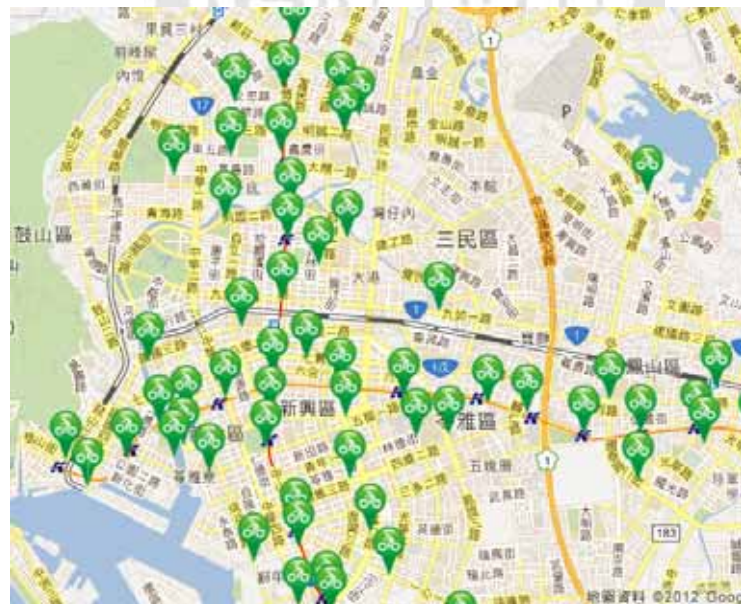


圖 1.2：C-Bike 租借站點分佈圖

## 1.2 研究動機與目的

近年來，世界各地積極地推廣綠色交通運輸工具，而自行車租借系統的推行為其重要指標之一。現實中，民眾的自行車租還需求都是隨機產生，因此有可能在某些時段、某幾個租借站的租借者特別多，導致這些租借者抵達租借站時，可能面臨無車可借或無位可還之情形，以致自行車租借營運系統的服務水準下降。然而，當租借站的需求不大時，則閒置的自行車或空停車柱亦是一種系統資源的浪費。針對上述的供需失衡的問題，目前業者通常藉由執行自行車運補作業，將某些租借站的閒置車輛運送至其他有補車需求的租借站，妥善地調度閒置的自行車，以避免租借者無車可借或無位可還，進而提升自行車租借系統之使用率與服務品質。

然而營運單位在執行自行車運補作業時，不僅要考量系統使用率與服務品質，還必須要考量整個系統運作的相關花費成本(運補車固定成本、人事成本、油費及相關耗材成本...等等)。由於此類系統的自行車租還需求極具變動性，導致管理者難以及時做出正確的決策反應。舉例來說，當租借需求變動較大的某些時刻或租借站，有可能發生運補車抵達該租借站進行補車或移車時，才發現需求已變動，無須再補車或移車；此外，若運補車行走距離及時間過長，該時段內新發生的租還需求可能改變了原本運補需求的緊急程度，導致運補車「白跑一趟」或「供不應求」，不僅增加運補成本也影響自行車租借系統整體的營運品質。因此，若能精確地掌握即時變動的租借情況並結合租借需求的歷史趨勢，配置可滿足於各租借站需求變動的自行車數量，則不僅可以降低運補成本，亦可提升自行車租借系統的整體滿意度。

針對這類富變動性的自行車租借系統，透過「模擬」可讓決策者預先為可能發生的情境做沙盤推演，進而擬定合宜的因應決策，而本研究即以建構一自行車租借模擬系統為核心，探討各租借站的期初車輛配置與系統之總運補車數

等決策。由於整體自行車租借系統過於龐大，難以在有限的時間與成本下，快速找出最佳之配置策略，因此本研究將採用一啟發式演算法，再結合模擬最佳化（Optimization via Simulation；OvS）的排序與選擇程序（Ranking and Selection；R&S）方式，根據各時段、各租借站的變動租借需求，在龐大的解空間中，以啟發式演算法找出最適解之集合，再以篩選與無差異區間的選擇機制，從集合中找出在信心水準之下具有最佳期望績效的初始車輛配置方式與系統中最佳之運補車數，以減少顧客總等待時間或人次，進而提升租借系統整體服務水準。其中的篩選機制係將表現值較差之系統刪除，保留較佳系統之集合；而無差異區間則為使用者欲偵測之最小接受範圍，亦即最佳系統之表現值與次佳系統之表現值的差距須在此區間內。

### 1.3 論文架構

本論文之架構如下：第二章為文獻探討，先針對自行車租借系統回顧系統建置的相關文獻；再針對自行車配置與運補問題，回顧收送貨、存貨途程問題等相關文獻。由於本研究將採用啟發式演算法以模擬的方式處理自行車租借系統等問題，因此會回顧啟發式演算法與模擬最佳化的相關文獻；最後針對最佳初始車輛配置問題回顧排序與選擇程序（Ranking and Selection；R&S）方法的相關文獻。第三章為介紹基本系統模擬（無自行車運補策略模式）和進階系統模擬（自行車運補策略模式）與加入排序與選擇程序和需求比例模式之間的差異。第四章將數組模擬資料代入模式運算，以實驗數據來探討租借站之期初車輛配置對整體自行車租借系統營運品質的影響。最後，於第五章總結本研究並建議未來值得繼續探討之研究議題與方向。



## 第二章

### 文獻探討

本章中，我們會先針對建置自行車租借系統之相關文獻做回顧，並依照整個租借系統的租借參數假設、條件來將系統區分為「確定」與「不確定」型資料兩種類別。由於現實的自行車租還需求都是隨機產生的，而模擬便成為驗證所建置的模型是否適用的一種有效工具，因此我們亦將回顧模擬最佳化的相關文獻。隨著租借系統規模的擴大，求解的時間也逐漸增加，本研究會在模擬程式中加入排序與選擇程序（Ranking and Selection；R&S）的方法，以縮短求得最佳解的時間，在此也將介紹 R&S 的方法及相關文獻。

此外，對於自行車配置與運補、調度問題的直接相關文獻並不多見，因此本研究亦回顧了諸如存貨途程問題、收送貨問題等相關文獻，並比較其差異處。

### 2.1 自行車租借系統建置策略

在現今提倡綠色交通的時代，自行車租借系統已成為一項新興熱門的大眾運輸系統。Laporte et al. (2001) 指出大眾運輸站點設置需考慮的因素有旅行時間、運輸總成本、設施可及性、環境影響評估、轉乘運輸的配合和都市發展。Chien and Qin (2004) 提出設置公車站點時，需將乘客之需求分佈與等候時間

納入考量，並簡化乘客之需求分佈，在最小化營運成本下，考慮旅行時間、司機、乘客費用、車站間距離和固定路線等因子，以決定公車站之設置位址。

依上述之站點設置因素，以旅行時間、設施可及性、轉乘運輸的配合和等候時間與自行車租借系統較為相關。其中設施可及性即考慮租借站點距離租借者需求起訖點是否在 500 公尺內，而等候時間即考慮租借者於租還車所等待時間，且等候時間長短將是影響租借者租借自行車與否之重要因素。

Owen and Daskin (1998) 將設施區位模式與理論依特性之不同分成三大類問題：「靜態與確定性之區位問題」、「動態的區位問題」與「隨機的區位問題」。在自行車租借系統的相關建置文獻中，我們依整個自行車租借系統相關設置條件與租借者需求狀態，將之暫分為「確定型之租借系統」與「不確定型之租借系統」兩大類。

### 2.1.1 確定型資料之租借系統

「確定型資料之租借系統」屬於靜態與確定性之區位問題，假設所有狀態是確定的，即問題假設輸入之參數（例如需求、距離等）都是已知確定之數值，且所要進行之決策為一次性不會變動的決策，常見的靜態與確定性的區位模式有 P 中位問題 (P-median Problem)、區位範圍覆蓋問題 (Location Set Covering Problem)、固定費用設施區位問題 (Fixed Charge Location Problem) 等。

Groß et al. (2006) 應用 P 中位問題於公共運輸網路下設立新公車站，在給定現有固定公車路線之公車位置與固有軌道路線之火車站位置，先找出旅客總加權旅行成本下 P 個合適的新公車站設置位址；再以相同情境，找出最小且覆蓋最多需求量之新公車站設置數目。

張立蓁(2010)綜合過去文獻對運輸站點設置問題的處理方式，建立較符合自行車租借之模式。以靜態之歷史租借資訊作為已知之租借需求(包括租借者起訖點需求、各起訖點至各候選租借站之步行距離、各候選租借站吸收租借需求的情況等)，發展整數規劃模式求解最小設置成本及租還車便利性高的租借站個數、位址還有各租借站應設置之停車柱數。

洪菁蓬(2011)參考選擇運輸站點問題的相關文獻，挑選合適於自行車系統建置之因素，再將之前自行車租借站位址設置的相關研究尚未考慮實際租借情境的部分加以重新規劃，加入了租借者在各路段行走或騎乘時間為服從特定機率分配的條件，進而發展一隨機型整數規劃模式，並設計 Particle Swarm Optimization (PSO) 演算法求解最佳租借站的位址、容量及自行車配置運補模式。

上述相關文獻都是先將租借者起訖點的需求情形、各租借站之間的距離以及營運單位的服務水準門檻…等等相關自行車租借系統資訊假設為已知，或是服從該模型所設定的情境與限制。然而現實情況下，租借者的需求與狀態都是隨機發生，而營運單位的決策也會隨著每天租借情形而有所調整，因此下一節將介紹的不確定型資料之租借系統較符合現實，但也更加困難。

## 2.1.2 不確定型資料之租借系統

「不確定型資料之租借系統」屬於一種隨機性區位設置問題，考慮不確定因子，如需求、旅途時間的變動等，這些因子在真實世界中可能受到外在其他的因子影響，而使資料有所變動。

Lin and Yang(2011)和Yang et al.(2010)針對自行車租借系統設計的問題，提出了隨機模式，考慮租借需求為隨機參數，分別以Normal分配和Poisson分配

來推估各時段之租借需求，並可滿足某一既定的服務水準。除了考慮租借站的位址外，亦將租借站的存貨水準（自行車數量）列入考慮。因此，其模式會在存貨水準、租借站及自行車車道設置的數量與位址，還有顧客使用的方便性之間做「取捨」，在滿足既定的服務水準下，求解最小的總設置成本、路徑成本及期望存貨成本。

Shu et al. (2010) 亦針對隨機之租借需求求解自行車租借系統設置問題。該研究先制定自行車之使用率為特定時間內每輛自行車的平​​均使用次數，假設租借站間在各時段的租借需求為已知，以與需求成正比的方式將自行車配給各起訖點需求，在滿足自行車使用率下限的條件下，提出一線性規劃模式求解租借站在期初時應擺放的自行車數。

## 2.2 自行車車輛配置與運補

本研究是以「通勤型」自行車租借系統為主體，此類型的租借系統通常以服務民眾為本質，並採用無人化之自助租還方式管理。自行車租借系統是近幾年才逐漸發展成型，也因為如此，在自行車車輛配置與運補的相關文獻較少。本小節會綜合概念類似的文獻（空櫃調度、存貨途程與收送貨問題等）來比較此系統與類似系統之相似與相異處。

若將自行車運補問題中的自行車比擬為空櫃調度問題中的空櫃，自行車租借站比擬為港口，則空櫃調度問題（如圖2.1所示）的港口缺櫃情境，可被類比為租借站的自行車數量不足，需從其他租借站運補自行車至該站；反之，港口多櫃之情境，則可視為該租借站之自行車數過多，導致空停車柱數量不夠，必須將該站之自行車運送至其他租借站。因此，空櫃調度與自行車運補的概念極為相似。

張立蓁（2010）參考空櫃調度問題之求解方法，提出一兩階段求解自行車之運補模式。其第一階段在考量不同之權重以衡量顧客服務成本與運補成本下，建構一以權重衡量的單車種最小成本之多元商品網路流量模式；而第二階段則決定運補車數量與運補路線。

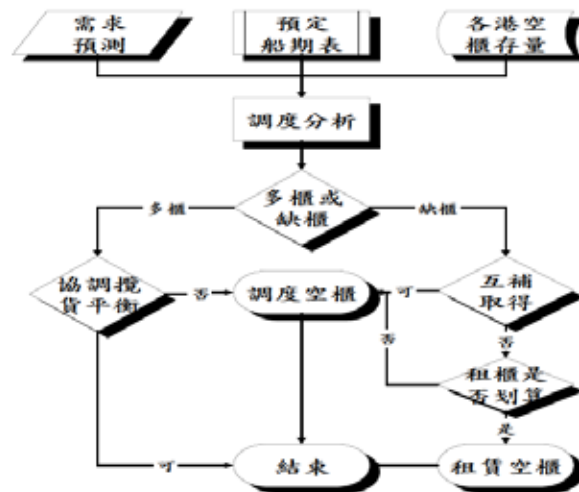


圖 2.1：貨櫃調度決策流程

資料來源：謝東緯（2000）

洪菁蓬（2011）將租借者的方便性與租借站的缺貨情況，限制在營運者所能提供的服務門檻條件內，推導出符合自行車租借行為的數學模式，以一階段的整數規劃方式，求解最小化營運者的運輸成本之多元商品流量模式。

自動販賣機的補貨作業亦與本研究的自行車運補模式有部分類似之處，其補貨作業是業者透過補貨車將商品從倉庫運補至各販賣機以供販售，是存貨途程問題應用之一。而存貨途程問題（Inventory Routing Problem, IRP），主要是考量在最小化總成本下，供應商應如何規劃商品的配送模式以避免缺貨情況。若將自動販賣機與倉庫視為自行車租借站，而販賣機兜售的商品視為自行車，則自行車運補問題可類比為自動販賣機補貨問題。自動販賣機補貨問題，主要考慮的三項決策如下：

(1) 何時需對販賣機補貨？(2) 各機台補貨量為多少？(3) 補貨車行走路徑為何？劉奕青（2003）針對了單一產品與多產品在配送點已知情形下，規劃補貨車行走路線與應裝載商品數量。其研究中亦探討需求不確定下的貨途程問題，針對多產品在配送點未知的情形下，規劃補貨車的配送途程（對哪些販賣機補貨以及補貨順序），並考量各產品應裝載之數量，使得補貨作業總成本最小。對比自行車租借系統的問題中，由於租借者的需求都是隨機產生，租借站的自行車數變動亦是無法預測，因此要如何準確、及時地運送自行車數量，並且考量運送車行走路線之成本為該研究重點之一。

收送貨問題（Pickup and Delivery Problem, PDP）亦與自行車運補相關，因為補貨（Delivery）作業可視為在租借站增加自行車，此時該租借站可被視為送貨之需求點；反之，若租借站需要增加空停車柱，則該租借站可被視為收貨（Pickup）之需求點。就如同於收送貨問題，配送載具必須從顧客中收取貨物並且送往至其他顧客的路線。而在本問題中，配送載具就是自行車租借系統的運補車。

## 2.3 模擬最佳化

模擬最佳化（Optimization via Simulation；OvS），是指在無法明確評估所有可能的情況下，從整個模擬過程中找到有機會可達到最佳效益的輸入變數。而模擬的用意，是為了能夠降低資源與成本的浪費，可在模擬的過程中獲得想知道的資訊，有利於決策。在 Carson, Y. and Maria, A.（1997）提出最佳化模擬的運作模式，是藉由每一次模擬所得知的訊息來提高下一次模擬的準確度（如圖 2.2 所示）。模擬最佳化問題一直被廣泛地討論與研究，而在該文獻中，

歸納了六種主要的模擬策略與方法（如圖 2.3 所示），近年來快速發展的模擬軟體也以其概念延伸，不僅減少了求解時間、降低成本，提升了決策的便利性。

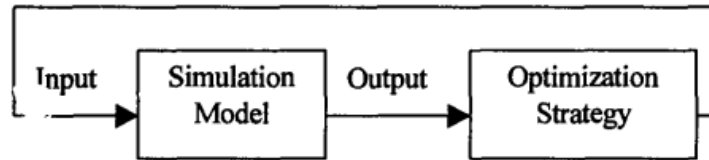


圖 2.2：模擬最佳化之模型

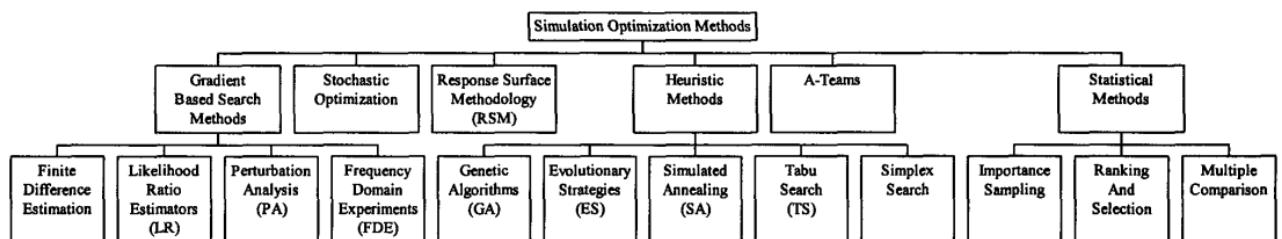


圖 2.3：模擬最佳化方法

資料來源：Carson, Y. and Maria, A. (1997)

雖然自行車租借的議題在近年來廣泛地被討論與研究，但其相關租借系統建置的設計問題並未普遍。因此本研究採用模擬的方式，來提供另一自行車租借模擬系統建置的參考。模擬的方法依模擬事件之連續或離散可區分成：「離散事件導向模擬法」（Discrete-event, Orientation Simulation）、「連續事件導向模擬法」（Continuous-event Orientation Simulation）以及「離散-連續混合模擬法」（Combined Discrete-Continuous Simulation）等三大類別。其中離散事件導向模擬法在建構模式中，只會模擬會改變系統狀態的離散時間點，也就是模式從開始到結束只會著重在改變系統狀態的事件及其造成之影響。

由於本研究是探討自行車租借系統的初始車輛配置方式是否會影響整體系統的服務品質，其模擬步驟是根據需求時間的先後，依序處理該租借者的租還狀態與租借站的自行車數量。而離散事件導向模擬模式，亦是將整個系統中的物件按照執行步驟的先後次序，一一完成模擬的動作。因此，根據本研究的主題與特性，較適用於離散事件導向模擬模式。

在模擬過程中，模擬時間的控制方法可分為「變動時間增量法」和「固定增量時間法」(如圖2.4 所示)此兩大類。前者又可稱為一次事件時間前進法，時間的增加是依發生下一個事件所需的時間來增加；而在固定增量時間法中，首先需指定固定的時間增量(例：分鐘、小時)，是由一個時段進行至下一個時段，而在時脈中的每一個時點，將檢視系統以確認是否有任何的事件發生，若有，便模擬一個事件，並據以增加時間；反之，時間則仍以一個單位來增加。而在本研究中，則是採用變動時間增量法，記錄需求產生時間以及當時租借者狀態改變的時間，完成整個租借動作後，以等候時間來評估自行車租借系統的服務品質。

雖然隨著電腦技術的快速發展，模擬套裝軟體已越常被用來輔助決策，但針對需求變動大的複雜系統(如本研究所討論的自行車租借系統)，則不易將市面上的模擬軟體加以客製化來做決策。針對自行車租借系統的問題，王俊偉(2011)以系統模擬的方法，考量租借者隨時變動的租還需求，結合不同程度的租借資訊，模擬數種自行車租借系統的營運策略，並分析各種策略對租借系統服務品質的影響與差異。但該模擬方法在期初的自行車數採隨機方式配置，因此可能得到變異性較大的結果，以致參考性及可信度較不足。因此，本研究將針對這部分再重新規劃與設計，以模擬方式找出最佳的期初車輛配置，提升整體服務品質。



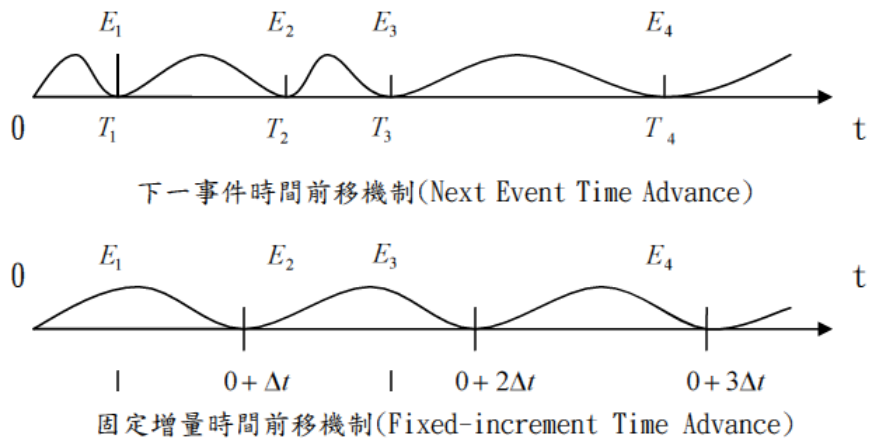


圖 2.4：模擬時間控制方法

資料來源：Law and Kelton(1991)

## 2.4 排序與選擇程序

模擬最佳化（Optimization via Simulation；OvS）的方式於自行車租借系統中，確實可以快速模擬各種租借情境，但隨著租借系統規模的擴大，再加上為了模擬出最佳的期初配置車輛數，必須反覆模擬、測試多組數據，其求解時間會逐漸增加，相對地成本亦會上升。

本研究擬採用模擬最佳化中的排序與選擇程序（Ranking and Selection；R&S）方法來加速模擬的求解過程，R&S是在符合某信賴水準下，根據各系統之表現值，從眾多的候選系統中選出績效指標最佳的系統。共有「篩選程序」（Screening Procedure）和「選擇程序」（Selection Procedure）兩大步驟。其中的篩選程序係將表現較差的系統予以刪除，僅保留表現較佳的系統；而選擇程序則是從表現較佳的系統中，再挑選出最好的系統。結合這兩種方法則為「兩階段選擇程序」（Two-stage Selection Procedure）、「完全連續選擇程序」（Fully Sequential Procedure）。

R&S 是由 Bechhofer (1954) 提出之無差異程序 (indifference zone formulation ; IZ) 與 Gupta (1956) 提出之子集合選擇程序 (subset selection formulation) 發展而來，以下將對上述兩文獻簡略介紹之。

### 2.4.1 無差異程序 (IZ)

Bechhofer(1954)提出無差異程序，目的是在  $k$  個系統中選出最佳之系統。以  $X_{ij}$  為第  $i$  個系統中第  $j$  個抽樣值且獨立，令  $\mu_i = E(X_{ij})$ ，假設目標函數是求取最大值，則  $k$  個系統之抽樣平均值分別為  $\mu_1 \leq \mu_2 \leq \dots \leq \mu_k$ 。首先設定一參數  $\delta$  為最小差異值，並保證其正確選擇機率(Probability of Correct Selection; PCS)大於信心水準  $1-\alpha$  (函式 2.1)，再計算各系統之變異數  $\sigma^2$  以及樣本數  $n$  (函式 2.2)。

然而，IZ 是以最少效益結構 (Least Favorable Configuration ; LFC) 的概念下，保守地估算系統之樣本抽樣數，因此若系統數量過大，會導致抽樣數過多，成本增加。

$$\Pr\{\text{select } k | \mu_k - \mu_{k-1} \geq \delta\} \geq 1 - \alpha \quad (2.1)$$

$$n = \left\lceil \frac{2h^2\sigma^2}{\delta^2} \right\rceil \quad (2.2)$$

其中， $h = h(k, 1-\alpha, n)$  為 Rinott's 常數，是由系統數  $k$ 、信心水準  $1-\alpha$  與第一階段樣本數  $n$  所產生的參數值。

## 2.4.2 子集合選擇程序

Gupta(1956)提出子集合選擇程序，目的是希望選出一集合  $I \subseteq \{1, 2, \dots, k\}$ ，並使這集合能包含最佳解的機率大於信心水準  $1-\alpha$ （函式 2.3），而  $k^*$  表示為最佳系統。若集合  $I$  內只有一個系統，則該系統即為最佳系統。

$$\Pr\{k^* \subseteq I\} \geq 1-\alpha \quad (2.3)$$

然而，通常集合  $I$  內不只一個系統。因此，子集合選擇程序僅能保證集合  $I$  內之系統滿足（函式 2.4）與補集合  $I^c$  之系統滿足（函式 2.5），並沒有辦法從集合中挑選出最佳之系統。

$$\bar{X}_j(n) \geq \max_{i \neq j} \bar{X}_i(n) - h\sigma_i \sqrt{\frac{2}{n}} \quad \text{for } i, j \in I \quad (2.4)$$

$$\max_{j \in I} \mu_j + \delta > \mu_i \quad \text{for } i \in I^c \quad (2.5)$$

其中， $\bar{X}_i(n)$  表示第  $i$  個系統之抽樣數為  $n$  時的樣本平均值， $\sigma_i$  為系統之標準差。

鑑於上述程序之缺點，Nelson et al. (2001) 提出合併程序 (Combined Procedure)，用於如何在系統數很大時選出最佳系統之模擬最佳化問題。首先，第一階段先透過子集合選擇程序，設定信心水準  $1-\alpha$  與最小差異值  $\delta$ ，將表現較差的系統剔除，較佳的系統納入集合  $I$ 。接著，第二階段根據 IZ 程序與 Rinott's 常數，求出第二階段的樣本數  $N_i$ ，並計算集合  $I$  各系統之樣本平均值  $\bar{X}_i^{(2)}$ ，再從中挑選表現最佳之系統。

### Combined Procedure

Step 1 : Select overall confidence level  $1-\alpha$ , practically significant difference

$\delta$ , first-stage sample size  $n_0 \geq 2$ , and number of systems  $k$ .

Set  $t = t_{\frac{1}{(1-\alpha_0)^{k-1}}, n_0-1}$  and  $h = h(1-\alpha, n_0, k)$ , where  $h$  is the Rinott's

constant, and  $\alpha_0 + \alpha_1 = \alpha$ . (文獻中多數設定  $\alpha_0 = \frac{\alpha}{2}$ )

Step 2 : Sample  $X_{ij}$ ,  $i = 1, 2, \dots, k; j = 1, 2, \dots, n_0$ .

Step 3 : Compute the first-stage sample means and variances  $\bar{X}_i^{(1)}$  and  $S_i^2$

for  $i = 1, 2, \dots, k$ . Let  $W_{ij} = t \left( \frac{S_i^2}{n_0} + \frac{S_j^2}{n_0} \right)^{1/2}$ , for all  $i \neq j$

Step 4 : Set  $I = \{i : 1 \leq i \leq k \text{ and } \bar{X}_i^{(1)} \geq \bar{X}_j^{(1)} - (W_{ij} - \delta)^+, \forall j \neq i\}$ .

Step 5 : If  $I$  contains a single index, then stop and return that system as the best.

Otherwise, for all  $i \in I$  compute the second-stage sample size

$$N_i = \max \left\{ n_0, \left\lceil \left( \frac{h S_i}{\delta} \right)^2 \right\rceil \right\}.$$

Step 6 : Take  $N_i - n_0$  additional observations from all systems  $i \in I$  and compute

the overall sample means

$$\bar{X}_i^{(2)} = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} X_{ij}, \text{ for } i \in I.$$

Step 7 : Select the  $i \in I$  with the largest  $\bar{X}_i^{(2)}$  as the best system.

針對上述程序，試簡易說明如下：假設目標函數為求得利潤最大化，要在  $k$  個方案中（即  $k$  個系統）找出最佳之方案。首先，決定信心水準  $1-\alpha$  以及系統的抽樣數  $n_0$ ，並設定整體系統所能容忍的差異值  $\delta$ ，接著根據公式計算  $t$  分配之值與 Rinott 常數  $h$ 。完成相關參數後，計算各系統  $i$  之抽樣平均值  $\bar{X}_i^{(1)}$  與變異數  $S_i^2$ ，再依據  $W_{ij}$  係數的計算公式，算出兩兩系統比對值  $W_{ij}$ ，挑選符合差異夠大條件之系統令其集合為  $I$ ，若集合  $I$  內只有一個系統，則該系統即為最佳系統。若集合內有兩個以上的系統，則根據各系統  $i$  之第一次的抽樣數  $n_0$ 、Rinott 常數  $h$ 、差異值  $\delta$  與各自的變異數，計算第二階段之系統抽樣數  $N_i$ ，再根據第二階段之樣本平均值  $\bar{X}_i^{(2)}$  挑選出最佳的系統。

此合併程序為 Nelson, Swann, Goldsman and Song 等學者（Nelson et al., 2001）提出，簡稱為 NSGS 程序，此方法須做到各系統的抽樣獨立，其之所以可以處理大量系統數的問題，是因為在第一階段的集合  $I$  之篩選規則非常嚴謹，並且可使系統數大量減少，以減少第二階段之系統抽樣數的計算，如此一來，不僅可縮短模擬時間也可降低成本，提高整體效益。

## 2.5 粒子群演算法

運用系統模擬的方式於自行車租借系統中，確實可以快速地模擬各種租借情境，找出各租借站之最佳車輛配置數，但隨著租借系統規模的擴大，再加上為了模擬出最佳的期初配置車輛數，必須反覆模擬、測試多組數據，其求解時間會逐漸增加，相對地成本亦會上升。因此，本研究欲採用啟發式演算法來加速模擬的求解過程。

在過去研究中，已經有許多文獻採用粒子群演算法（Particle Swarm Optimization, PSO）求解問題，並且獲得不錯的結果。Guner and Sevkli (2006) 經實驗過後，發現 PSO 演算法比起其他演算法較容易使用並且能夠快速收斂，而張立蓁 (2010) 與洪菁蓬 (2011) 同樣利用 PSO 演算法分別求解靜態型與隨機性之車站選址問題亦獲得不錯的結果。因此，本研究將加入 PSO 演算法於模擬程式中，以期望能加速求得最佳解並節省營運成本。

PSO，由 Kennedy and Eberhart (1995) 提出，其概念源自群體行為理論，啟發自觀察鳥群或魚群行動時，能透過個體間特別的訊息傳遞方式，使整個團體朝同一方向、目標而去，是模仿此類生物行為反應來尋求完成群體最大利益的方法。在 PSO 演算法中，粒子群內每一個粒子（particle）皆有其代表目前所在的位置（position）與引導粒子移動的速度，其中每個粒子在迭代過程中會找尋目前個別最佳的位置（personal best position）以及全部粒子中最佳的位置（global best position）。當粒子移動至一個新位置時，會計算其適應值（fitness），若目前的適應值較佳，則更新目前的位置；若是有粒子的適應值比之前群體最佳位置的適應值還要好，即更新為群體的最佳位置。以下為粒子群演算法的步驟與流程圖（如圖 2.5 所示）：

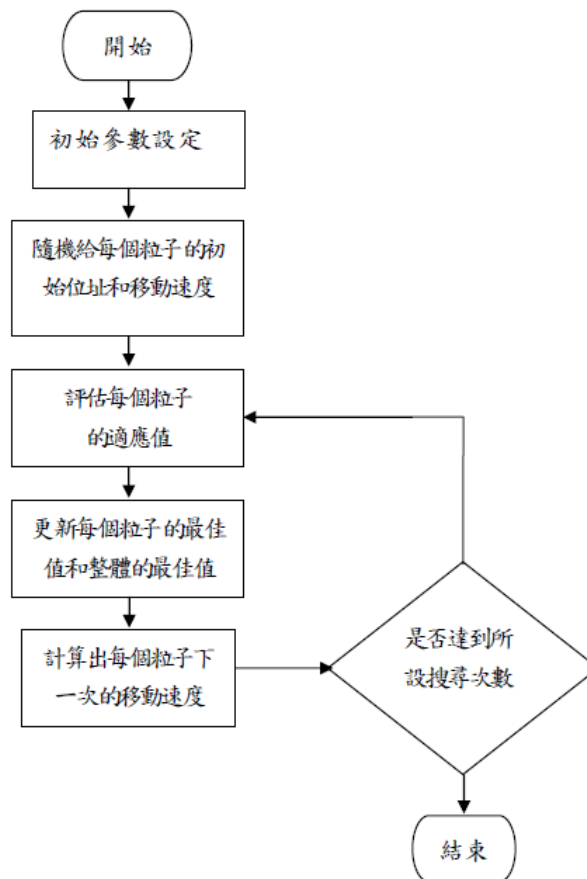


圖 2.5：粒子群演算法之流程圖

步驟 1：設定初始參數，以隨機方式設定每個粒子的位置，而初始移動速度設定為零。

步驟 2：將粒子位置代入求解問題函數以求得每個粒子的適應值。

步驟 3：每一個粒子的適應值與該粒子所經歷的最佳適應值比較，假若新的適應值比粒子的最佳適應值佳，則以新的位置及適應值取代粒子的最佳解位置及適應值。

步驟 4：每一個粒子的最佳適應值與群體的最佳適應值比較，假若粒子的最佳適應值比群體的最佳適應值佳，則以粒子的最佳解位置及適應值取代所有粒子的最佳解位置及適應值。

步驟 5：根據 PSO 公式，更新每一次迭代的速度和位置。

步驟 6：重複步驟 2~步驟 5，直到群體的最佳適應值符合問題需求。

## 2.6 小結

從文獻回顧得知，運補空櫃或自動販賣機等相關文獻並未考量類似本研究中租借者自行租還車的行為；而探討自行車車輛配置的相關文獻，又大多假設需求資料為靜態不變動，此與現實情況中租借者的需求多為隨機發生相差許多。若要正確地評估自行車租借系統的運作，應採用系統模擬的方式來處理系統中隨機產生的租借需求，不僅可模擬多種租借情境，其參數設定也較易更改。然而，目前的自行車租借模擬系統文獻僅採用隨機方式來設定各站的初始自行車車輛配置，容易使其模擬結果失準。如何在大型自行車租借系統中，快速且有效地求得最佳的車輛配置為本文的研究重點，因此我們將運用模擬最佳化的選擇與排序程序，以模擬最佳化之方式找尋最佳的營運策略，提升整體系統之服務品質。



## 第三章

### 公共自行車租借系統之初始車輛配置

本研究將針對王俊偉(2011)在公共自行車租借系統之初始車輛配置問題中，尚未考慮周全的部分再重新規劃。本章第一小節將介紹我們如何以模擬最佳化(OvS)之概念為主，加入粒子群演算法(PSO)並結合排序與選擇程序(R&S)。接著於第二小節，針對自行車租借系統之車輛配置問題稍做描述，並提出假設與限制。由於本研究會以王俊偉(2011)所提出的數個租借系統模式為模擬系統之基本概念，然後再做延伸、調整，因此第三小節會介紹模擬租借系統之模式。最後，將該模擬之模式導入 PSO 演算法與 R&S 程序，結合不同需求比例之模式，以快速求得最佳初始車輛數與運補車數量，提升自行車租借系統的服務品質。

#### 3.1 模擬最佳化之研究方法

模擬最佳化(OvS)即是整合模擬技術與最佳系統之概念。在統計理論的保證下，從不同的模擬系統中，挑選出表現最佳之系統。

在 Fu (2002) 提出模擬最佳化問題之數學結構：

$$\text{目標函式：} \quad \min_{\theta \in \Theta} J(\theta) \quad (3.1)$$

其中， $\theta$  是  $p$  維度向量的決策變數， $\Theta$  是可行解空間。

$$J(\theta) \equiv E[L(\theta, \omega)] \quad (3.2)$$

$L(\theta, \omega)$  代表每次抽樣之樣本績效值， $\omega$  為系統中的隨機變數。

為了找到最佳之系統，因此我們必須將模擬實驗中之樣本績效值，透過統計之期望值概念，來估計未知目標函數之績效值，並從中找出目標函數值最小之系統。

$$\bar{J}(\theta) \equiv \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N L(\theta, \omega_j) \quad (3.3)$$

$\omega_j$  是  $j$ -th 樣本的隨機值。

從上述之數學模式，可以知道模擬最佳化是透過樣本統計量去估計母體未知資料。因此，為了使預測值能更貼近實際情形，必須增加樣本數與抽樣數。若系統數過大，則會導致成本過高，求得最佳解的效率降低。有鑑於此，在模擬最佳化的概念下，加入排序與選擇 (R&S) 程序，以期能在有限的系統數下，找出最佳的系統，提升整體模擬系統之品質。

然而，本研究問題屬於大規模之模擬問題，因此本文將參考 Nelson et al. (2001) 所提出合併程序 (Combined Procedure)，以兩階段 (Two-stage) 的方法，並結合粒子群演算法 (PSO)，模擬公共自行車租借系統的租借行為，找出各租借之最佳車輛配置，提升系統之租借使用率與服務水準。

### 3.2 問題描述與假設

為了探討自行車租借系統中的初始車輛配置是否會影響營運品質，本研究採系統模擬的方式，以自行車租借系統在執行時會產生的租借資訊為模擬的相關參數設計。租借資訊包括 (1) 動態的即時租借資訊：各租借站即時之自行車數與空位數。(2) 靜態的歷史租借記錄：租借者在各時段、各租借站之租借需求概況。首先，為得知各租借站的初始車輛配置是否為影響自行車租借系統營運品質的因素，本研究會先以王俊偉 (2011) 所提出無自行車運補策略模式 (No Repositioning, NR) 與簡單自行車運補策略模式 (Simple Repositioning, SR) 為基本模擬概念，再修正適合於本研究的模擬方式。

為了簡化問題，本研究提出幾點假設與限制：

1. 各租借站之總停車柱數量為已知。
2. 租借者之起訖點方圓 500 公尺內必存在一個以上之租借站。
3. 租借者對起訖點至租借站之距離有充分之資訊 (張立蓁, 2010)。
4. 租借者之需求產生時間呈 Poisson( $\lambda$ ) 分配，其中  $\lambda$  為單位時間內產生需求的個數。
5. 當租借需求產生時，將以 Uniform 分配或 Skewed 分配決定其租車站。
6. 各租借站間存在一顧客流動比率，而此流動率會因時段不同而有所差異。
7. 租借者之起訖點方圓 500 公尺內若存在 2 個以上之租借站點，租借者選擇租或還車站之機率和租借站與起訖點之間的距離成反比。即距離遠，則選擇至該租借站租還車的機率就較低；反之亦然。
8. 租借站間之距離以直線方式計算。
9. 租借者必定能在 30 分鐘內從租車站騎往還車站。

10. 無車可借狀態：租借者可選擇是否願意在該租借站等待其他租借者還車。  
若是，則必須等待有自行車被歸還；反之，租借者可步行至鄰近租借站租車或直接放棄租車。然而，若租借者決定步行至鄰近租借站租車，卻又發生無車可租之情形時，則放棄租借自行車。
11. 無位可還狀態：租借者可選擇是否願意在該租借站等待其他租借者借車。  
若是，則必須等待有自行車被租借；反之，租借者可騎乘自行車至鄰近租借站還車。然而，若租借者至鄰近租借站還車時，又發生無位可還之情形，則必須在該租借站等待至有其他租借者來租車。
12. 租借者之步行速率皆相同。
13. 租借者之自行車騎乘速率皆相同。
14. 租借者於租借與歸還自行車所花費之時間忽略不計。

### 3.3 自行車租借系統之模擬模式

由於本研究是以王俊偉（2011）提出之無自行車運補策略模式（No Repositioning, NR）與簡單自行車運補策略模式（Simple Repositioning, SR）為新模擬方式的基礎概念，因此會先針對各模式簡略說明其模擬運作的概念。

本研究提出下列衡量指標以評估自行車租借系統營運服務水準之指標：

- (1) 無法即時租/還自行車之人數。
- (2) 租借者於租/還自行車過程中所等待之時間。
- (3) 放棄租借自行車之人數。

本研究會將租借者於租還車之過程中所等待的人次或時間，來當作採用排序與選擇程序與需求比例模式之目標函數。因此，等待的人次及時間長短皆是越小越好。

### 3.3.1 無自行車運補策略模式 (NR)

無自行車運補策略模式 (NR)，是模擬自行車租借系統在無執行運補作業下之營運情形，亦即租借系統中的自行車僅藉由租借者之租還過程在站點間移動。我們將其模式情境，分為租車與還車兩大部分，並簡單描述其流程運作如下。

當租借者抵達租借站要租車時，若該租借站尚有自行車未被租借（即自行車數量 $>0$ ），則租借者即可租借一輛自行車並騎往欲歸還自行車之站點，此時租借站的自行車數將減少一台，亦即多了一個空停車位；反之，若租借站沒有自行車，則有三種可能的情境：（1）租借者願意一直等待至其他租借者於該站還車，才能租借自行車騎往還車站點；（2）租借者不願意等待，直接放棄租借；（3）當租借者願意至鄰近租借站借車，若有車則租之，否則放棄，亦即租借者頂多只會嘗試一次它站租車。為避免不公平之情形，本模式採用先到者先租借之準則。

當租借者抵達租借站要還車時，若該租借站尚有空停車位（即空停車位數量 $>0$ ），則租借者隨即完成還車流程，再步行前往目的地，此時租借站的空停車位數量將減少一個，亦即多了一輛自行車；反之，若租借站沒有空停車位，則有兩種可能的情境：（1）租借者願意等待至其他租借者於該站租車，才能完成還車流程而離開；（2）租借者不願意等待，必須自行至其他鄰近租借站並待在該站直至有空位可歸還自行車為止。同樣為了避免不公平之情形，本模式採用先到者先歸還之準則。

本文將租借者於 NR 模式中之租車與還車流程以虛擬碼表示（如圖 3.1 及圖 3.2 所示）。在 NR 模式模擬完成後，藉由每位租借者之抵達租車站點之時間和自行車租借時間，以及抵達還車站點之時間和自行車歸還時間，即可得知租借者於租借自行車以及歸還自行車時所等待之時間。

---

```
if (顧客 a 抵達租借站 A 進行租車) then
    if (租借站 A 的自行車數大於零) then
        顧客 a 即可騎乘自行車至租借站 B 進行還車，
        然後再步行至目的地；
    if (若此時有顧客 b 在等待還車) then
        先讓顧客 b 先還車後，顧客 a 隨即借車。
    else
        租借站 A 的自行車數少一台；
        租借站 A 的空停車柱數多一個；
    End if
Else
    隨機選擇以下三種情境：
    (1) 原站一直等待直至有車可租為止
    (2) 不等待，還行放棄租車
    (3) 至鄰站，有車則租之，無車則還行放棄不再等待
End if
End if
```

---

圖 3.1：NR 模式之租借者抵達租借站點租車流程虛擬碼

---

```

if (顧客 a 抵達租借站 B 進行還車) then
    if (租借站 B 的空停車柱數大於零) then
        顧客 a 即可歸還自行車並步行至目的地，
        if (若此時有顧客 c 在等待租車) then
            先讓顧客 a 先還車後，顧客 c 隨即租車。
        else
            租借站 B 的自行車數多一台；
            租借站 B 的空停車柱數少一個；
        End if
    Else
        隨機選擇以下兩種情境：
        (1) 原站一直等待直至有位可還為止
        (2) 至鄰站，一直等待直至有位可還為止
    End if
End if

```

---

圖 3.2：NR 模式之租借者抵達租借站點還車流程虛擬碼

### 3.3.2 簡單自行車運補策略模式 (SR)

簡單自行車運補策略模式 (SR)，是加入運補車之模擬模式，旨在降低各租借站之間置自行車數與空停車柱數，以提高租借系統之使用率。當該租借站之自行車數或空位數低於該站所設定之庫存量（即運補門檻值），租借系統將指派運補車於該租借站進行運補作業。若租借站之自行車數低於車輛庫存量時，運補車至該站放車（即卸載，unload）；而租借站之空車位數若低於空車位庫存量時，運補車即至該站拿車（即裝載，load）。其模式情境，暫分為卸載自行車與裝載自行車兩大部分，並簡單描述其流程運作（如圖 3.3 所示）。

---

```
當租借者於租借站 A 完成租借或歸還自行車後
  if (租借站 A 之自行車輛數 < 租借站 A 之自行車運補門檻值) then
    指派運補車至租借站點 A 補車
  else if (租借站 A 之空停車柱數 < 租借站 A 之空車位運補門檻) then
    指派運補車至租借站點 A 拿車
  End if
```

---

圖 3.3：SR 模式之自行車租借系統執行運補作業流程虛擬碼

當租借站需要運補自行車時，其運補數量為該站之自行車運補門檻減掉該站之現有自行車輛數。若被指派前往該站的運補車，其車上現有之自行車數量足以供給該站，則立即前往該租借站放置所需運補之車輛數；反之，若運補車上之自行車數量不夠，系統將檢查該租借站以外的租借站之自行車數，若有租借站的車輛數不僅符合本身之門檻值限定，還有多餘的車輛數可供給所需運補的數量，則以距離做判斷，挑選運補車行走距離（即運補車至拿車站後，再至放車站所行走之距離）最短之租借站。倘若，租借系統中暫時無符合運補條件之租借站，則運補車將在原處休息，直至有符合運補條件的租借站出現為止。

當租借站需要增加空停車位時（即拿走自行車），其欲拿走的自行車數量為該站之空停車柱門檻減掉該站之現有空停車柱數。若被指派前往該站的運補車有足夠的空位，則立即前往該租借站拿取所需之車輛數，使該站之空車位數符合門檻設定值；反之，若運補車上之空位數不夠，則系統將檢查其鄰近的租借站是否有更多的空位可供運補車先放一些車，以挪出足夠的空位去其目的站拿車，而該鄰近站的選法則以距離做判斷，挑選運補車行走距離（即運補車至放車站後，再至拿車站所行走之距離）最短之租借站。倘若，租借系統中暫時無符合運補條件之租借站，則運補車將在原處休息，直至有符合運補條件的租借站出現為止。



本文亦將運補車於 SR 模式中之卸載自行車與裝載自行車流程以虛擬碼表示於圖 3.4 及圖 3.5。在 SR 模式模擬完成後，即可得知衡量指標，如等待時間與等待人數與 NR 模式之間的差異，並將運補車的運補成本納入考量。

---

```
當指派運補車至租借站 A 補車時
  if (運補車上的車輛數大於或等於該租借站所需運補的數量) then
    運補車則前往該租借站補車
  Else
    找尋車輛數不僅可滿足本身的門檻值，
    並且有多餘的車輛數可供給所需運補的數量之租借站。
    if (找不到符合條件的租借站) then
      運補車須等待至有符合條件之租借站出現，再進行運補作業
    Else
      找尋總距離最短之中間租借站，
      即運補車至中間租借站拿車，再至放車站放車。
    End if
  End if
End if
```

---

圖 3.4：SR 模式之指派運補車運補自行車流程虛擬碼

---

```
當指派運補車至租借站 A 拿車時
  if (運補車上的空位數大於或等於該租借站所需運補的數量) then
    運補車則前往該租借站拿車
  Else
    找尋空位數不僅可滿足本身的門檻值，
    並且有多餘的空位數可供給所需運補的數量之租借站。
    if (找不到符合條件的租借站) then
      運補車須等待至有符合條件之租借站出現，再進行運補作業
    Else
      找尋總距離最短之中間租借站，
      即運補車至中間租借站拿車，再至拿車站拿車。
    End if
  End if
End if
```

---

圖 3.5：SR 模式之指派運補車運補停車柱流程虛擬碼

### 3.4 以 PSO 結合 R&S 求解租借站之初始車輛配置問題

王俊偉（2011）所提出之無自行車運補策略模式(No Repositioning , NR) 為最原始之自行車租借系統的營運方式；而簡單自行車運補策略模式 (Simple Repositioning , SR) 則採用運補車來運補各站所需之車輛與空位數。執行各模擬模式時，必須輸入大量相關的模擬資料，例如：租借系統資訊（各租借站位置、自行車數、空車位數…等）、租借需求（需求發生時間、位置、租還車站點…等），以及歷史租借記錄。其研究是以法國巴黎 Velib 自行車租借系統為模擬參考對象，而自行車租借系統中之各租借站的自行車數，皆是隨機配置數量。根據租借站規模大小，依比例來分配自行車數量，規模較大的租借站分配較多的自行車數，而規模較小的租借站則分配較少的自行車數。因此，在該模擬過程中，無法明確地得知各租借站的最佳期初之自行車數。為了能提升自行車租借系統的服務品質與自行車租借率，本研究之目標函數為最小化總等待人數，其總等待人數為租車等待之人數與還車等待之人數。

本研究將以王俊偉（2011）的 NR 模式與 SR 模式為基礎，以 PSO 演算法結合 R&S 程序，再以 Poisson 分配產生需求時間、Uniform 分配或 Skewed 分配決定其租車站，反覆產生租借資訊作為系統模擬之資料，求解期初之最佳配置自行車數。以下將簡述本模式的模擬方式與步驟。

#### 3.4.1 研究架構

本研究是以法國巴黎 Velib 為研究參考對象，在面對解空間龐大的模擬系統時，我們必須先剔除績效表現較差之系統，再從已篩選完畢之較佳的系統中，挑選出最佳之系統。

因為本研究問題屬於大規模之模擬問題，所以先採用啟發式演算法中的 PSO 演算法，挑選出經過多次更新、迭代之後的粒子（即表現較佳的系統），再結合 Nelson et al. (2001) 所提出之合併程序，進行兩階段之 R&S 程序，在有限的成本與時間下，快速求出初始車輛配置，提升整體模擬效率。在文獻已描述 PSO 演算法的步驟與流程，接著將介紹本研究參考 NSGS 程序後的篩選步驟。

### 3.4.2 排序與選擇程序之 NSGS

#### Screen-to-the-Best Procedure

參數定義：

$k$  : the number of systems

$1-\alpha_0$  : the confidence level of the screening procedure

$\delta$  : the significant difference

$n_0$  : sample sizes (  $n_0 \geq 2$  )

$t_{\beta, v}$  : the  $\beta$  quantile of the  $t$  distribution with  $v$  degrees of freedom

**【  $\beta : (1-\alpha_0)^{\frac{1}{k-1}}$  ;  $v : n_0 - 1$  】**

$X_{i,j}$  : sample ,  $i = 1, 2, \dots, k$  ;  $j = 1, 2, \dots, n_0$

$\bar{X}_i$  : the sample means ,  $i = 1, 2, \dots, k$

$S_i^2$  : the sample variances ,  $i = 1, 2, \dots, k$

$$W_{ij} : \text{constant} \quad \left[ W_{ij} = t \left( \frac{S_i^2}{n_0} + \frac{S_j^2}{n_0} \right)^{1/2}, \text{ for all } i \neq j \right]$$

$$y^+ : \max\{0, y\}$$

$$\text{Set } I = \{i : 1 \leq i \leq k \text{ and } \bar{X}_i^{(1)} \leq \bar{X}_j^{(1)} + (W_{ij} - \delta)^+, \forall j \neq i\}$$

首先，我們先採用 PSO 產生特定數量的粒子數與迭代次數，接著再將各粒子的 P\_Best（即 R&S 的系統）進行 NSGS 之 Screening 程序，除了已知的粒子數（系統數），還需決定各系統之抽樣數，以便後續進行模擬最佳化之篩選。雖然文獻指出理論上只要執行兩次以上的抽樣即可，但根據實際實驗的結果，若抽樣數增加至 20 次，其圖表表現值會更具代表性、更明顯。此外，各系統中的租借站數量可由決策者決定。接著，再決定此篩選階段的信心水準，還有本系統於模擬時能容許之差異值。然後，再根據上述之參數，依序算出  $t$  分配之值、各系統之樣本平均值與變異數和  $W$  係數。

本文將 NR 模式與 SR 模式結合 NSGS 程序之 Screen-to-the-Best Procedure 以虛擬碼表示之（圖 3.6）。以上步驟完成 NSGS 程序之第一階段，將符合集合  $I$  條件之系統納入，若集合  $I$  內只有一個系統，則該系統即為最佳之系統，結束模擬。但實際模擬的操作結果，在集合  $I$  內不可能只有一個系統。因此，必須再進入 NSGS 程序之第二階段，利用 Rinott's 係數，計算第二階段之各系統抽樣數並計算其樣本平均值，再根據第二階段的樣本平均數，選出績效表現值最佳之系統。其模擬程序之流程圖，如圖 3.7 所示。

---

```

Set 系統數
Set 樣本數
Set 篩選之信心水準
Set 最小差異值
Set  $t$  分配

Input 站點數
Input 尖峰與離峰之比例

For k=1 Step1 to 系統數
    For n=1 Step1 to 抽樣數
        Function-產生需求時間
        Function-產生租借需求
        Function-NR model
    End For
End For

Set 各系統之樣本平均值
Set 各系統之樣本變異數
Set  $W$  constant

For n=1 Step1 to 抽樣數
    If (系統  $i$  的平均值  $\leq$  系統  $j$  的平均值 + ( $W$  係數 - 最小差異值)  $^+$ )
        Return 系統  $i$ 
    End if
End for

```

---

圖 3.6：NR 模式結合 NSGS 程序之 Screening 虛擬碼

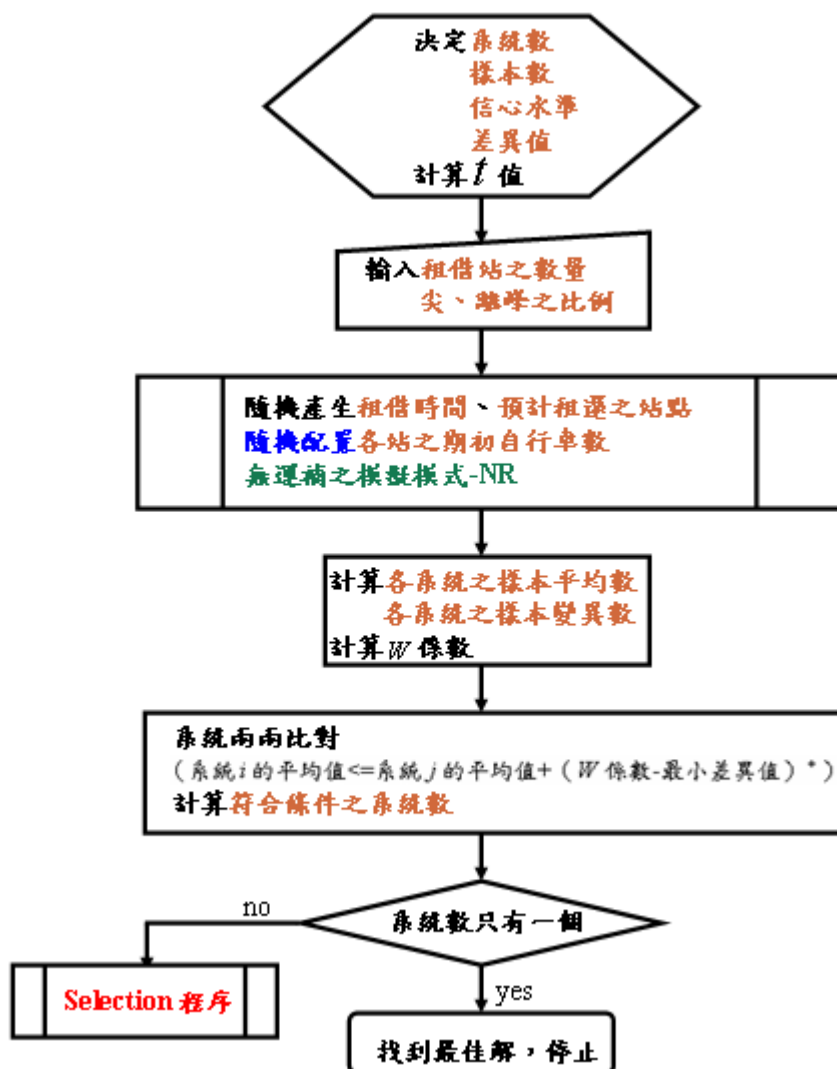


圖 3.7：NR 模式結合 NSGS 程序之 Screening 流程圖

## IZ Selection Procedure

參數定義：

$1 - \alpha_1$  : the confidence level of the selection procedure

$h$  : Rinott's constant   【  $h = h(1 - \alpha_1, n_0, k)$  】

$N_i$  : the second-stage sample sizes ,  $i \in I$  .       $N_i = \max \left\{ n_0, \left\lceil \left( \frac{hS_i}{\delta} \right)^2 \right\rceil \right\}$

$\bar{X}_i^{(2)}$  : the second-stage sample means.       $\bar{X}_i^{(2)} = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} X_{ij}$

在 NSGS 的第一階段之 Screening 過程中，若篩選符合條件之系統數大於 1，則必須進入到第二階段，利用 IZ 程序與 Rinott's 係數，再次計算各系統之樣本抽樣數。接著根據第二階段的樣本數求出第二階段之樣本平均值，再根據此值挑選出表現最佳之系統。此模擬步驟與程序分別以虛擬碼與流程圖表示之，如圖 3.8 與圖 3.9 所示。

---

```
Set 選擇之信心水準
Set Rinott's 係數

If (集合 I 內的系統數 > 1) Then
    計算各系統之樣本數
    計算各系統之樣本平均值
End if

選出績效表現值最佳之系統
```

---

圖 3.8：NR 模式結合 NSGS 程序之 Selection 虛擬碼

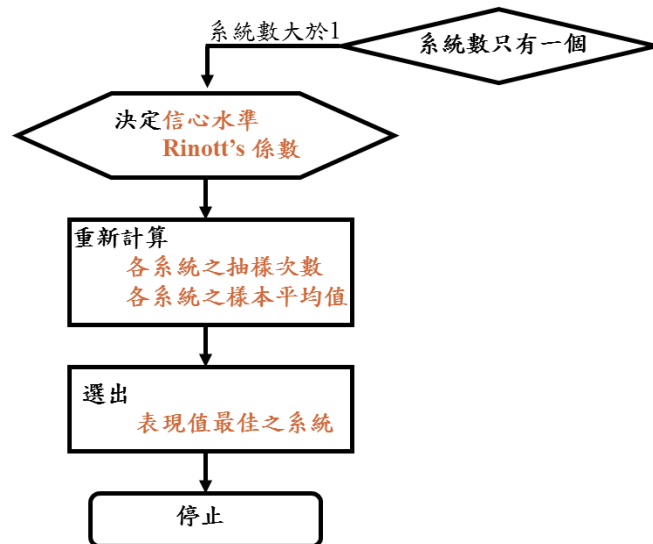


圖 3.9：NR 模式結合 NSGS 程序之 Selection 流程圖

### 3.4.3 範例模式說明

為了闡述 3.4.2 小節所提出之 NR 模式與 SR 模式結合 PSO 演算法與 NSGS 程序之特色，在此小節以一簡略範例說明各模擬模式之運用過程。在第 3.2 小節所提出的假設中，主要的假設是各租借站之停車柱數量為已知，而所有的需求資料皆遵循所給定的歷史租借資訊來隨機產生。各租借站之期初自行車數擺放量是由該站之總停車柱數乘以一隨機值而得，而總停車柱數減掉自行車數，即為該站之空位數。接著，設定模擬步驟中所需之相關參數：系統數、抽樣次數、信心水準以及最小差異值。將各系統的自行車數與空位數，加入模擬資料（需求產生時間、步行至租還站時間與租借者之等待意願等），代入本研究之模擬模式求得各租借站之初始配置車輛數及總等待人數或時間，找出績效表現值最佳之系統，即可知道該系統中各租借站之初始車輛配置數量。



以下將簡述模擬過程中所需要的模擬資料：

(1) 租借站之資訊 (表 3.1、表 3.2)

(2) 租借者之需求資訊 (表 3.3)

表 3.1：租借站之資訊

站點編號	自行車輛數	空位數
# 1	6	7
# 2	10	13
# 3	11	19
# 4	8	8
# 5	9	14

表 3.2：租借站距離之資訊(單位：公尺)

站點編號	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
# 1	0	314	519	633	407
# 2	314	0	349	298	161
# 3	519	349	0	217	378
# 4	633	298	217	0	104
# 5	407	161	378	104	0

表 3.3：租借者之需求資訊

租借者 編號	需求產生 時間(ms)	起點至租站 之時間(ms)	租站 編號	租站至還站 之時間(ms)	還站 編號	還站至終點 之時間(ms)	等待 意願
# 1	7	480	0	4589	2	3000	1
# 2	19	500	3	2871	2	1199	1
# 3	29	339	0	12024	5	3500	0
# 4	41	270	1	6857	3	4700	0
# 5	53	310	2	3424	1	1699	0
# 6	63	160	2	8675	4	4599	0
# 7	71	289	3	6543	6	2800	1
# 8	85	129	2	4355	4	4100	0
# 9	100	500	6	5456	7	4522	1
# 10	109	365	7	8905	1	2653	0

以下簡述表 3.2 所列出的某個隨機產生之租借者需求資訊：假設有 10 位租借者之租借需求產生，其中第八欄表示租借者面臨無車可租或無位可還時，是否願意等待至該租借站有空車或空位可租還車。1：代表願意等待、0：代表不願意等待，要步行前往至其他租借站租還車、-1：代表租借者不願意等待並且放棄租借自行車。

此範例中，我們規劃整個自行車租借系統中共有 5 個租借站，而 5 個租借站即代表一組系統（如表 3.1 所示），而租借者之需求資訊會反覆隨機產生，產生的次數為該系統之抽樣數，即系統需抽樣 2 次進行模擬模式，此需求資訊會產生兩次，每次數值皆會不同。接著再將模擬所需之資訊代入模式，計算每

次抽樣後的表現值與該系統之樣本平均值和變異數。

此範例之模擬情境，設定系統之總停車柱為已知且固定、總自行車輛數不變、各租借者之步行速度與騎乘速度皆相同。將測試三組系統，即有三組租借站之資訊；各組系統抽樣兩次，即每組系統皆測試兩次租借者之需求資訊。

### 合併程序 (Combined Procedure)

Step 1：設定信心水準 95%、系統數 3 組、抽樣數 2 次、最小差異值、 $t$  值。

其中  $t$  分配之統計值是根據信心水準、系統數與抽樣數計算得出。而最小差異值即為差異容忍度，由決策者決定，本範例設定系統中租借總人數的 5%。

Step 2：各系統進行抽樣

$X_{11}$  第一組系統的第一次抽樣值， $X_{12}$  第一組系統的第二次抽樣值

$X_{21}$  第二組系統的第一次抽樣值， $X_{22}$  第二組系統的第二次抽樣值

$X_{31}$  第三組系統的第一次抽樣值， $X_{32}$  第三組系統的第二次抽樣值

Step 3：計算每組系統之抽樣平均值與變異數

$\bar{X}_1^{(1)}$  第一組系統的抽樣平均值， $S_1^2$  第一組系統的變異數

$\bar{X}_2^{(1)}$  第二組系統的抽樣平均值， $S_2^2$  第二組系統的變異數

$\bar{X}_3^{(1)}$  第三組系統的抽樣平均值， $S_3^2$  第三組系統的變異數

計算  $W$  係數， $W_{12}$ 、 $W_{13}$ 、 $W_{23}$

Step 4：根據集合  $I$  之條件，挑選符合的系統。

Step 5：集合內之系統數若大於 1，計算第二階段之抽樣數。

Step 6：重新計算集合內之系統平均值，挑選出等待人數最少之系統。

將 NR 模式與 SR 模式結合此模擬程序，依上述六個步驟挑選出最佳之系統，亦即自行車租借系統中各站之自行車數量。然而，SR 模式是加入運補車的模擬策略，旨在提高整體租借系統之使用率與滿意度，因此，本研究亦會探討運補車數量的多寡於自行車租借系統之影響程度。

### 3.5 以需求比例求解租借站之初始車輛配置問題

在前一節採用的 R&S 程序所輸入的模擬資料，是反覆依歷史租借資訊產生租借者之需求資訊，再由其中找出平均值表現最佳的系統（亦即總等待人數最少之各租借站車輛數）。然而，此方法須在有限的系統數內，找出績效表現值較佳之系統，有可能導致在所取樣的系統並非最佳解，甚至需花費大量時間與成本。因此，本節擬根據給定的歷史租借資訊，以 Shu et al. (2010) 依需求比例所提出之線性規劃模式來估算各站期初的自行車配置量，當成 PSO 的一個粒子，希望能加快模擬最佳化的收斂速度。

由於 Shu et al. (2010) 的線性規劃模式必須假設停車柱無上限（亦即一定可以還車，不會有無位可還的情況出現），因此我們先模擬一個無停車柱上限的系統（Demand Profile with Uncapacitated Station, DPU），以驗證其線性規劃的估算品質；之後，我們再將原本設定已知的租借站停車柱個數列入考慮來設定模擬系統（Demand Profile with Capacitated Station, DPC），對每一租借站檢查線性規劃模式建議配置的自行車數是否超過其停車柱個數，若超過的話，則將超額之自行車再隨機分配給仍有空停車柱的租借站。由於這種方式可能導致期初的自行車配置量有多種數值，因此必須多隨機產生幾組系統當 PSO 的初始粒子。

### 3.6 小結

為了降低「無車可借」與「無位可還」之自行車租借問題，在本章中提出結合粒子群演算法（PSO）以及排序與選擇程序中的 NSGS 程序，來處理自行車租借系統之車輛配置問題，以篩選與無差異區間的選擇機制取代原先隨機分配各租借站之初始車輛數，在特定的信心水準之下，從模擬實驗中找出具有最佳期望績效的初始車輛配置方式。然而，此方式有系統數之模擬限制，倘若模擬之系統數過大，其表現值可能不盡理想。因此，本研究再提出依需求比例為原則的 DPC 與 DPU 方式來配置各租借站之期初車輛，可根據歷史租借資料來決定各站之車輛配置數，此模擬方式則不受限系統數之影響，可將多期之歷史資料代入模擬模式中，選擇各租借站之期初車輛數，但此方式雖可找出較佳的車輛配置，但隨著模擬次數的增加，求得最佳解的時間與成本亦會增加。因此，決策者可根據自行車租借系統之整體營運規劃，選擇適合之模擬模式。

## 第四章

### 模擬資料與數值分析

本章將描述模擬的設定方式與結果，並將各模擬方法一一分析比較。

#### 4.1 模擬之情境設定與資料產生

由於本研究是以法國巴黎自行車租借系統 Velib（如圖 4.1 所示）為研究參考對象，因此在本節中將會描述模擬模式之情境設定與如何產生、使用模擬等相關租借資料。本研究所採用的自行車租借系統之規模共有 968 個租借站、14000 輛自行車，以及平均每日約有 45000 個租借需求。

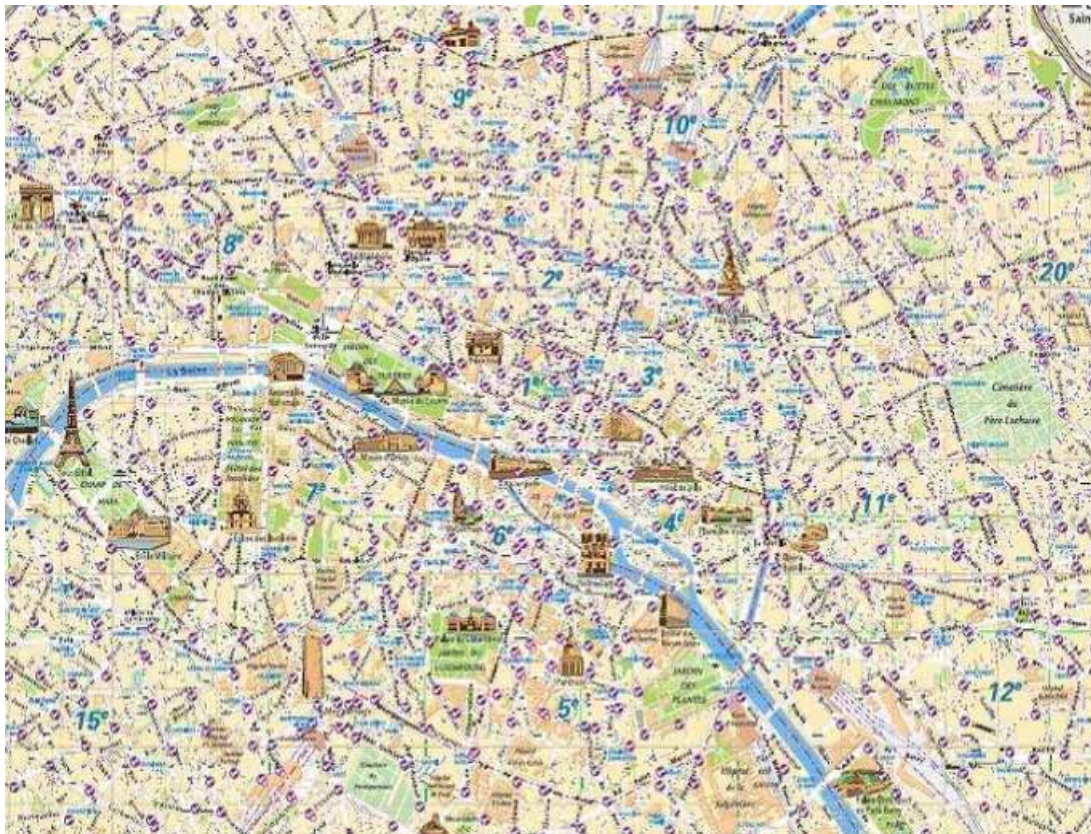


圖 4.1：法國巴黎 Velib 自行車租借系統規模示意圖

#### 4.1.1 模擬之情境設定

因本研究所探討之租借對象為每日的通勤族，所以為了使模擬結果更接近現實情況，本研究將時間依使用情形區分為尖峰時段與離峰時段。每日模擬時段為 6：00 至 22：00（共 16 小時）。尖峰時段即有較多的租借需求產生，例如：上班（課）、下班（課）時間與中午外出用餐、處理事務，其餘則為離峰時段，即租借需求較少的時段。而本模擬模式可供決策者設定尖峰時段與離峰時段彼此之相對需求比例，例如：若尖峰與離峰為 2：1，即表示在單位時間內，離峰時段的平均租借需求個數為尖峰時段租借需求個數的一半。

除了產生租借需求的時間可以有不同的需求比例，本研究的模擬實驗為了更貼近現實，將設定租借者之租借需求狀態為 skewed distribution，亦即租借需求發生之機率隨著租借站之容量大小而成正比變化，也就是當某租借站之停車柱數量越多，則租借者前往該站租還車的機率就越高。

為使模擬結果更一致，模式中設定租借者可接受之步行距離為 500 公尺，租借者之步行速率為 1m/s，騎乘自行車之速率為 4m/s。每台運補車最多只能承載 20 輛自行車。此外，每次裝（卸）自行車的時間忽略不計，而運補門檻為其租借站所設置之停車柱個數的 0.05 倍（小數點後無條件捨去）。

#### 4.1.2 模擬之初始資料

本小節將介紹諸如租借站之資訊（各租借站位置、停車柱總數...等）、租借需求（需求發生時間、起訖點位置、租還車站...等），等各類模擬資料之產生方式。

本研究假設整個自行車租借系統共有 968 個租借站，並且將租借站區分為三種等級：113 個大租借站、171 個中租借站以及 684 個小租借站，接著將系統中 14000 輛自行車隨機分配，大的租借站配置較多的自行車，小的租借站則配置較少，然後再根據該站所分配的自行車數，乘以一介於 0.5 至 1.5 之隨機值（小數點後四捨五入至整數），即為該站之停車柱數。而整個租借區域範圍 6.93 公里×7.64 公里，其站點位置採棋盤式分佈（王俊偉，2011）。另一模擬資料為租借者之租借需求，根據不同情境有不同的租借需求時間與租還站之選擇，則參考王俊偉（2011）之產生租借需求的方式來產生模擬所需資料。



而租借需求之歷史資訊，本研究以 Poisson( $\lambda$ ) distribution 來產生每日約有 45000 個租借需求的租借時間，再以 skewed distribution 將這些需求配置給 968 租借站，亦即停車柱數較多的租借站會有較多的租還需求。本研究產生 100 組歷史租借資訊（如表 3.4 所示），接著計算各租借站之平均租借需求數量。

進行租借系統模擬測試之實驗，以 PSO 結合 R&S 程序而言，本研究採用 1000 個粒子（即 1000 組不同的 968 個租借站之期初車輛數），迭代 500 次之後，記錄 1000 個粒子各自的 P\_Best，再將此 1000 個粒子（即 1000 組系統）代入 R&S 中的 NSGS 程序，從 1000 組系統中，找出一組績效表現值最佳之系統，即等待租車與還車之總等待人數最少之系統。此外，為了避免粒子數過多導致運算時間增加，本研究亦設計另一套模擬方式：採用粒子數 100 個，經過 50 次迭代之後，將 100 組資料代入 R&S 程序，選出表現較佳的前 50 組，接著再以此 50 組資料代入 PSO 中再次進行迭代，之後再代入 R&S 程序，反覆以此步驟選出最佳解。此兩種模擬方式之平均表現值皆相近，差異為模擬時間的長短。

然而，若以需求比例之模式進行模擬測試，則參考歷史租借資訊，本研究採用 100 期之歷史租借資訊，代入模擬模式中，找出各租借站之最佳期初車輛配置數。為了驗證停車柱數對整體自行車租借系統是否有顯著的影響，本研究參考 Shu et al. (2010) 文獻後，再提出一有停車柱數限制之模式。其兩種模式分別為：放鬆停車柱上限（Demand Profile with Uncapacitated Station，DPU）與配合具停車柱上限而調整（Demand Profile with Capacitated Station，DPC）。

## 4.2 數值分析

根據前一節的方式所產生之各租借站之初始車輛數，將其模擬等相關所需資料代入以 R&S 模式和需求比例模式進行模擬最佳化，並以盒鬚圖 (Box Plot) 來表示各模式與各情境之間的績效差異。由於現實中「無位可還」比「無車可租」更容易招致對系統服務的不滿意，因此本節中會再加入以停車柱無上限之模式與本研究所提出以停車柱為已知之模式相互比較。為了使每個模式之比較值能更準確，不會因為模擬次數的差異導致結果不客觀，因此各模式的模擬次數設為相等，即 R&S 模式之總抽樣數（系統數 $\times$ 抽樣數）等於需求比例模式的迭代次數。

### 4.2.1 租借情境之 skewed distribution

此小節以租借情境為 skewed distribution 的設定來模擬，亦即停車柱較多的租借站將有較多租借者至該站進行租還車動作。本研究以兩大模擬模型：無自行車運補策略模式 (NR) 與簡單自行車運補策略模式 (SR) 結合兩種模擬方法，依序為排序與選擇程序 (R&S) 與依需求比例配置兩種方法 (DPU 與 DPC)，用 1:1 和 3:1 此 2 種不同的尖峰時段與離峰時段之租借需求比率進來行模擬實驗。而本研究之重要假設為各站之停車柱為已知，為了與 Shu et al. (2010) 文獻作比較，在以需求比例配置的方法中，會加入無停車柱限制的條件設定（即 DPU 方法假設各站有極多停車柱）。其中採用 R&S 的模擬模式，信心水準設定為 95%，系統數 1000 組。圖 4.2 至圖 4.10 為模擬結果。

#### 4.2.1.1 NR 模擬模式

首先，NR 模式使用了三種模擬方法，圖表中 R&S 代表 PSO 演算法結合 NSGS 程序、DPC 代表依需求比例但有停車柱限制、DPU 代表依需求比例但無停車柱限制。圖表中 ⊗ 符號表示中位數。

以租車等待人數來看(圖 4.2 與圖 4.3)，無論是在需求比例為 1:1 或是 3:1 的時候，可以看出採用 R&S 模擬程序來配置自行車數量，有助於降低等待人數。然而在需求比例差異更大的時候，R&S 模擬程序與根據歷史租借資料來配置車輛的 DPC 程序和 DPU 程序之間的表現差異更明顯。以還車等待人數來看，採用 R&S 模擬程序的表現值亦較佳。從圖 4.4 與圖 4.5 來看，依需求比例的方法將使還車的等待人數明顯增加，這可能是因為這種做法以租車之歷史資料為主要依據，因此較能有效地改善租車的等待人數，但卻無法改善還車的等待人數。而無停車柱限制(DPU)的方法，則沒有等待還車的困擾，因此等待還車人數為零。在圖 4.2 至圖 4.5 來觀察 NR 模式下的租車與還車之等待人數，以啟發式演算法結合模擬最佳化中的 NSGS 程序表現較佳。然而，又以還車之等待人數的差距又更明顯，由此可見 R&S 模擬程序可以有效地降低租車與還車的等待人數。

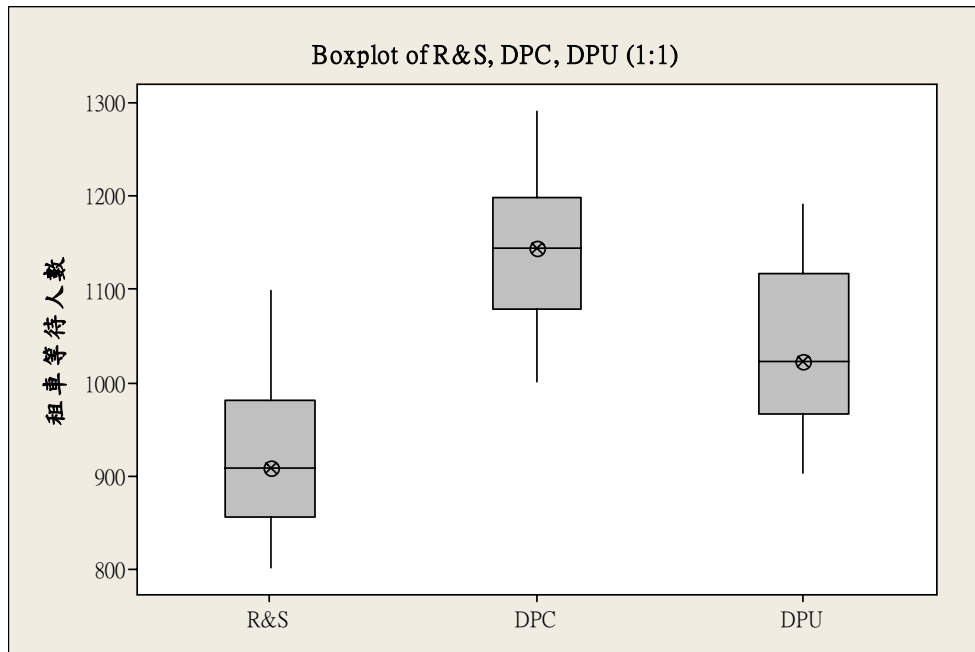


圖 4.2：NR 模式之租車等待人數（需求比例 1：1）

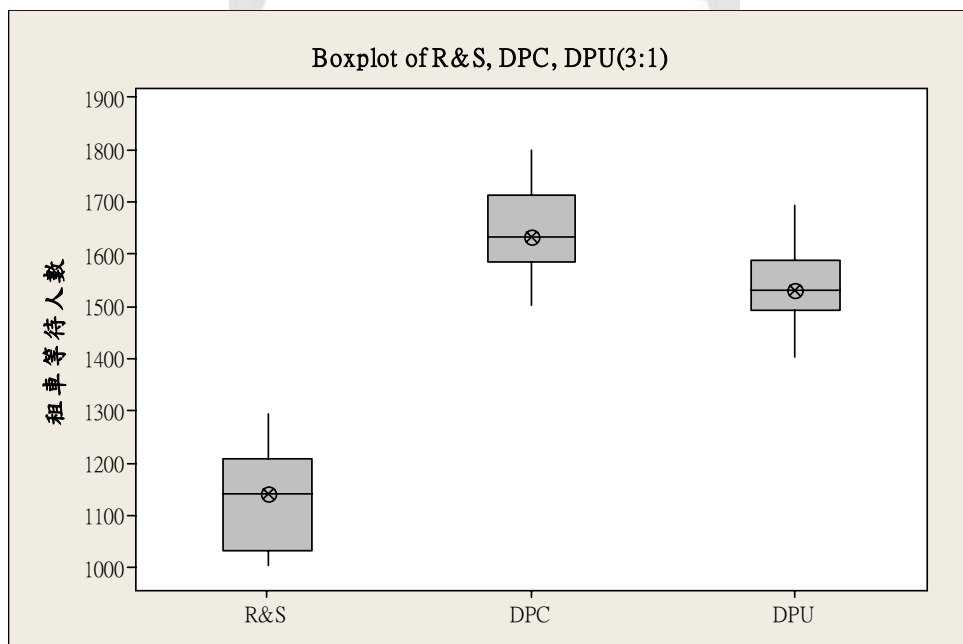


圖 4.3：NR 模式之租車等待人數（需求比例 3：1）

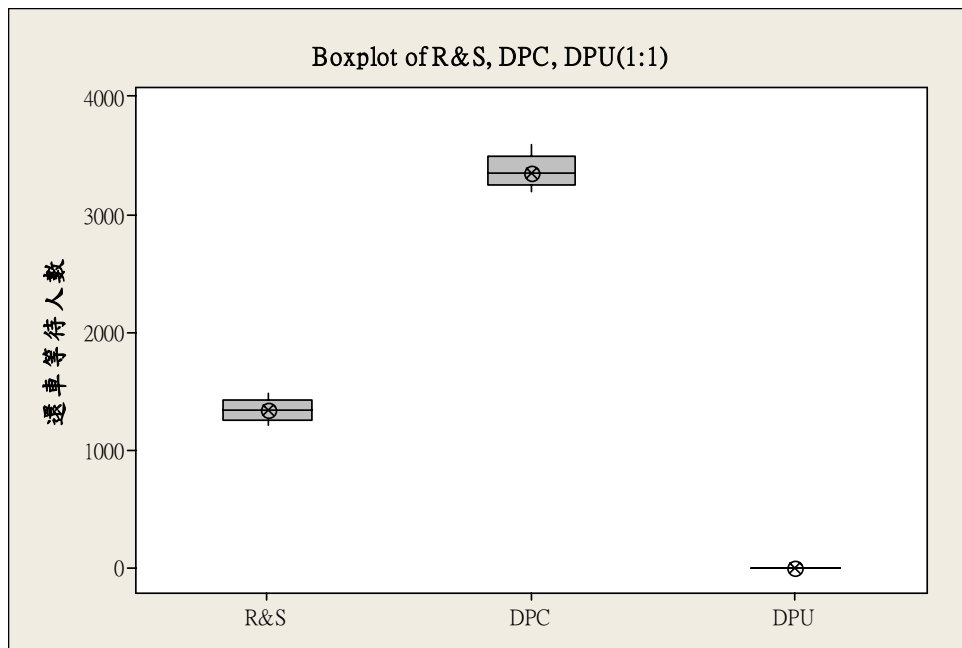


圖 4.4：NR 模式之還車等待人數（需求比例 1：1）

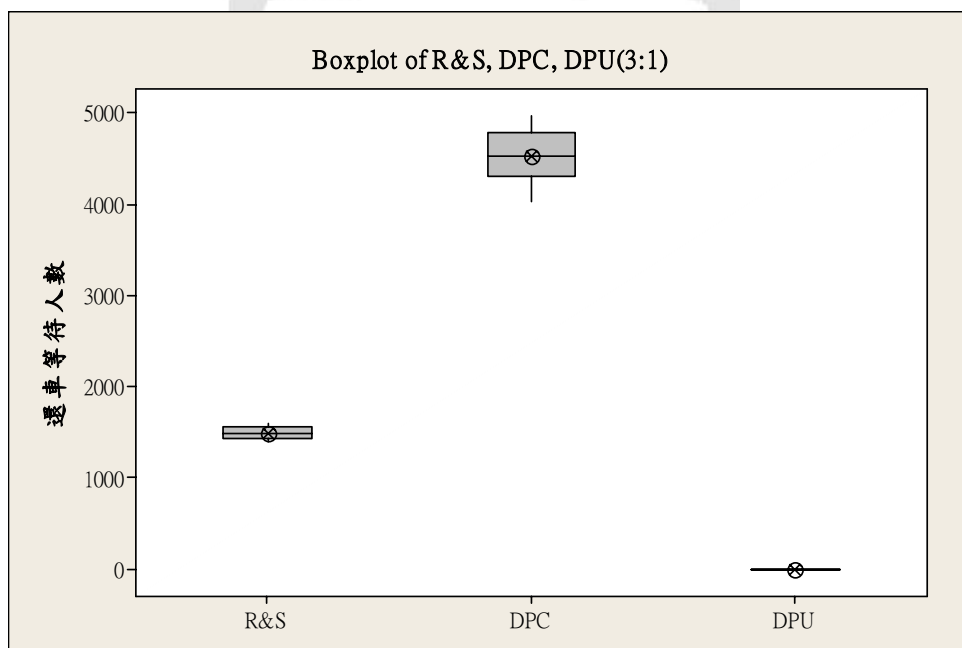


圖 4.5：NR 模式之還車等待人數（需求比例 3：1）

#### 4.2.1.2 SR 模擬模式

SR 模式是有運補車的自行車租借模擬模式，亦使用了三種模擬方法，圖表中 R&S 代表 PSO 演算法結合 NSGS 程序、DPC 代表依需求比例但有停車柱限制、DPU 代表依需求比例但無停車柱限制。圖表中⊗符號表示中位數。為了表示運補車的數量是否影響整體自行車租借系統之表現值，本研究以 5 台運補車、10 台運補車、15 台運補車與 20 台運補車，分析運補車個數的影響。

SR 模式所採用的三種模擬方法皆以 10 台運補車做分析。從租車狀態之盒鬚圖（圖 4.6 與圖 4.7）可得知，採用 SR 模式有助於改善 NR 模式（圖 4.2 與圖 4.3）之等待人數。而在還車狀態之盒鬚圖（圖 4.8 與圖 4.9）同樣也與 NR 模式（圖 4.4 與圖 4.5）的表現一樣，等待還車的人數也是依需求比例配置車輛的方法比較多，但比 NR 模式的租車等待人數還少。因此，採用 SR 模式有助於整體自行車租借系統之營運品質。

由於 SR 模式是採用運補車的模式，根據圖 4.10 顯示，運補車數量的增加是有助於降低總等待人數。在圖 4.11 中，本研究比較了 SR 模式的三種模擬方法（R&S、DPC 與 DPU）的運補成本，可以知道以 R&S 程序來配置車輛數，其效果最好。

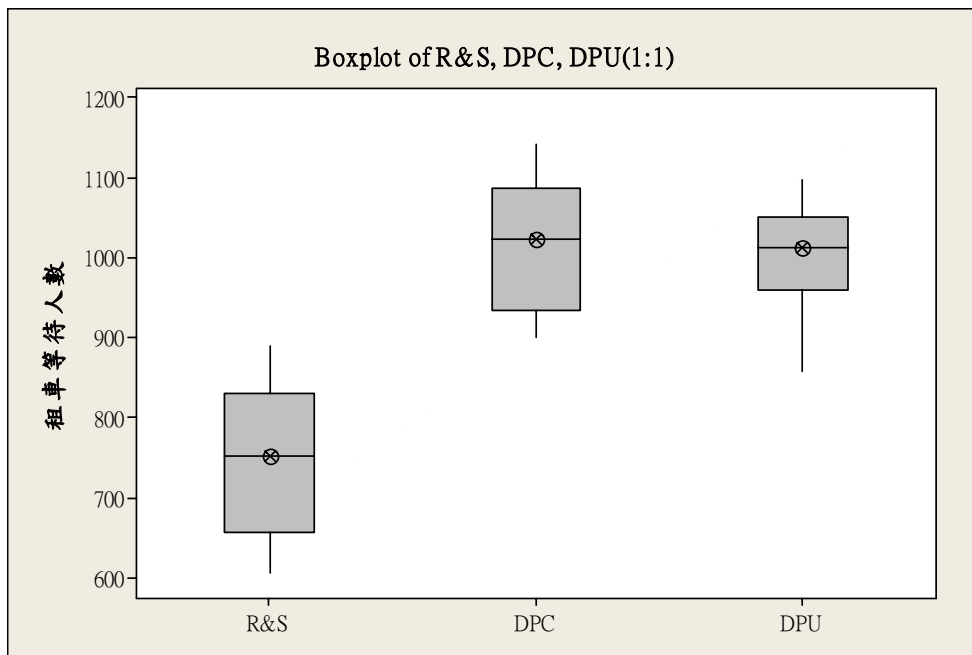


圖 4.6：SR 模式之租車等待人數（需求比例 1：1）

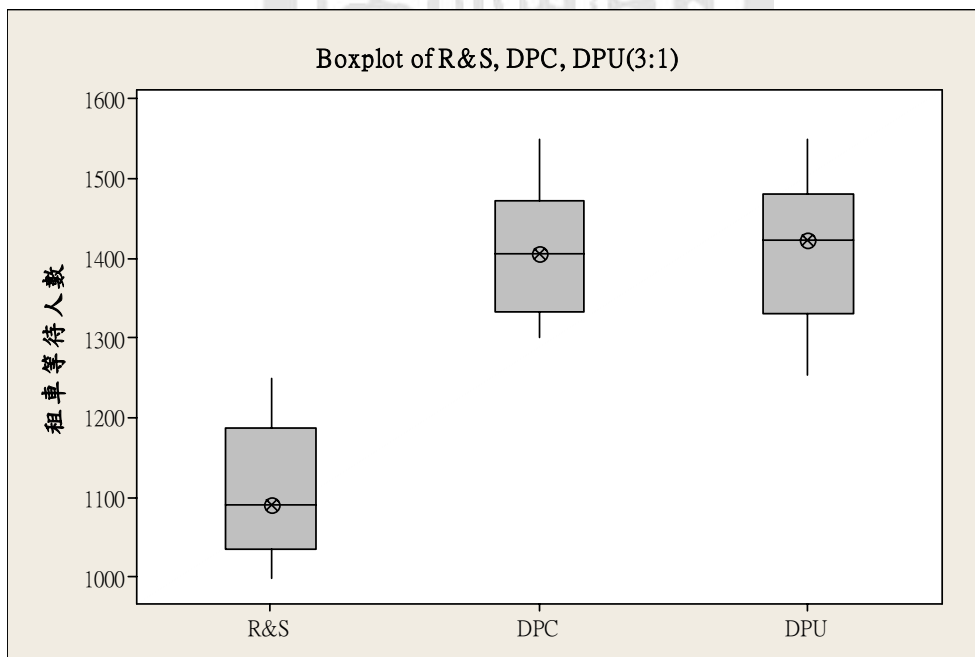


圖 4.7：SR 模式之租車等待人數（需求比例 3：1）

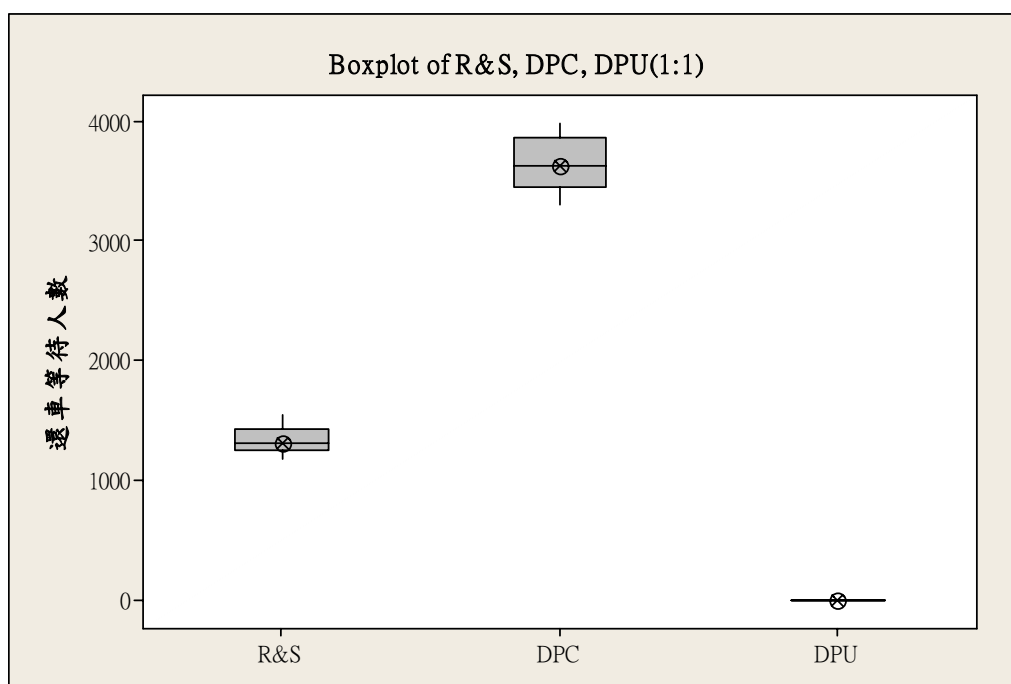


圖 4.8：SR 模式之還車等待人數（需求比例 1：1）

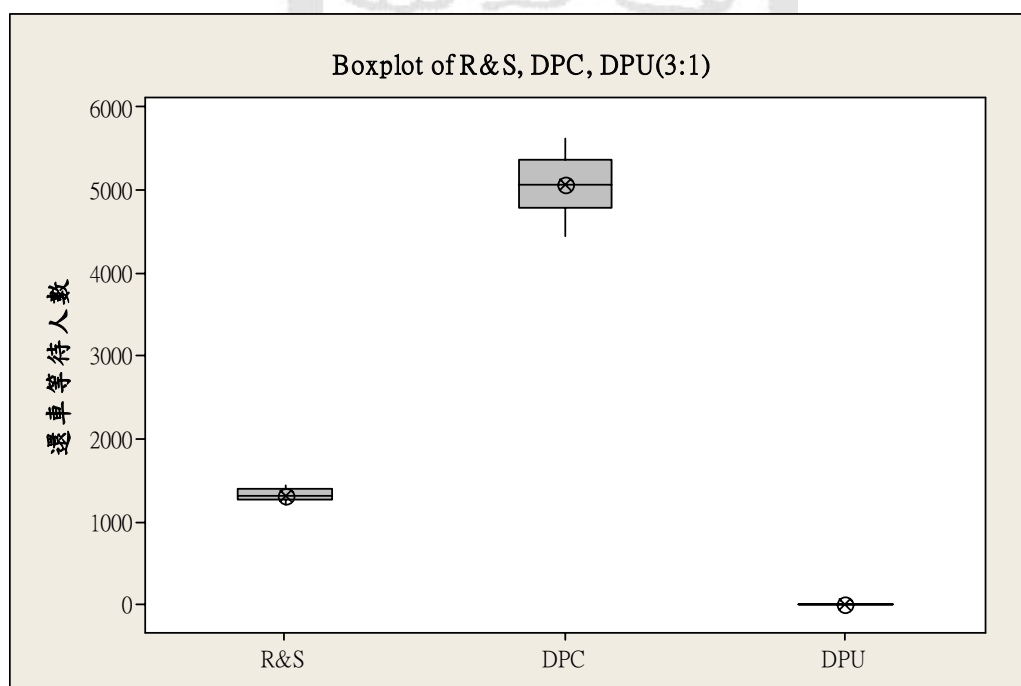


圖 4.9：SR 模式之還車等待人數（需求比例 3：1）



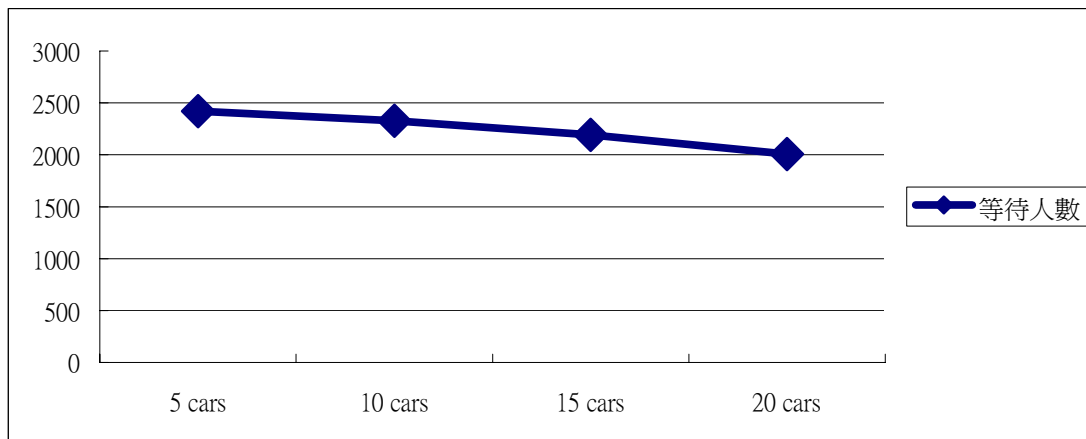


圖 4.10：運補車之績效表現值

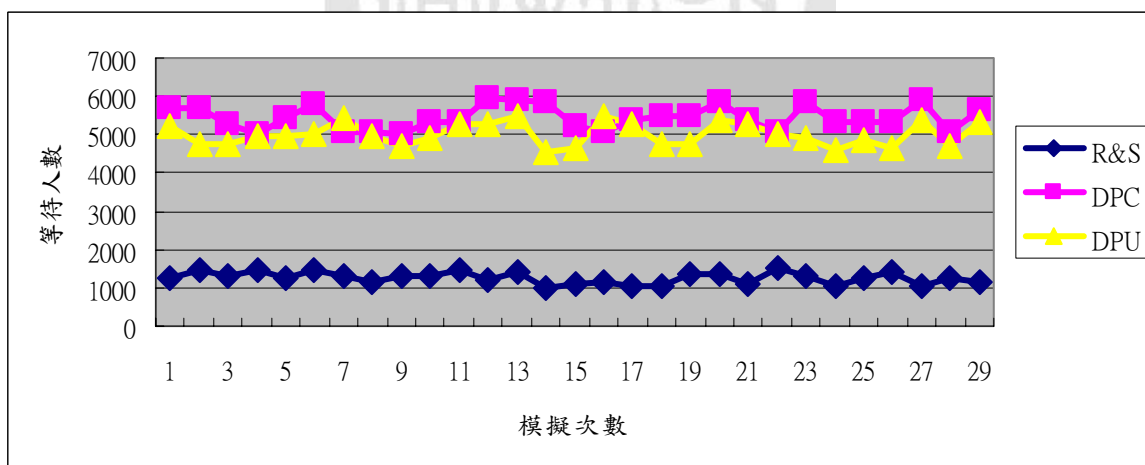


圖 4.11：模擬方法之運補績效表現值

### 4.3 小結

在本章中，我們參考法國巴黎 Velib 自行車租借系統之規模，等比例地建置一個規模較小之自行車租借系統為本研究模擬對象，以貼近現實租借之境，以及隨機產生之需求時間，在提高服務品質與低成本的前提下，採用模擬最佳化的方式找出最適當之初始自行車配置與系統中所需之運補車。從前一小節的盒鬚圖的分析，可得知若採用啟發式演算法結合模擬最佳化之 NSGS 程序來配置期初車輛數，其總等待人數較少。單以租車人數而言，以需求比例的方法表現較佳，若以還車人數而言，則以 R&S 模擬方式較佳。加入運補車的運補模式，可以知道運補車的增加，不僅可降低總等待人數，對於整體租借系統之服務品質有呈線性提升的趨勢。



## 第五章

### 結論與未來研究方向

本章在 5.1 小節總結本論文之研究概念，並列出具體貢獻。5.2 小節建議後續可能研究之方向，包括模擬最佳化之模型建置。

#### 5.1 結論與貢獻

在全球各大都會區蔚為風尚的自行車租借系統，不僅僅是在觀光旅遊上，現已成為全球人民共同的休閒運動，更成為通勤族主要使用的交通工具之一。然而，在每日租借需求隨時變動的情形下，租借系統在建置之初除了考量租借站之位置與容量，還必須針對各租借站之車輛配置與整體租借系統之運補車數作最佳化的決策，以提升租借系統之服務品質，讓租借者能隨時「有車可借」且「有位可還」。由於租借者之需求狀態與租借需求之產生時間皆為不確定之情境，難以數學理論之模型分析租借系統之建置與營運決策，因此本論文採用模擬最佳化之模式，以及根據歷史租借需求資訊提出數個模擬模式。

本研究於第三章提出以啟發式演算法中的粒子群演算法結合模擬最佳化中的排序與選擇程序來發展一模擬模式，以找出各期初之車輛配置數，並決定整體租借系統之最佳運補車數。為了能更有效地達成「有車可借」且「有位可

還」的情境，本研究亦提出根據歷史資料以租借需求比例來配置各租借站之期初車輛數及總運補車數。為了更明確得知租借站之停車柱數對整體營運效率是否有顯著的影響，在以需求比例配置自行車數的模擬方法中，分別加入有停車柱數限制與無停車柱數限制的區別。

本研究參考法國巴黎 Velib 自行車租借系統之規模，以等比例之方式自行建置一自行車租借系統為模擬測試之對象。為貼近現實，本研究將容量較大的租借站配置較多的自行車數與租借需求，並設定 2 種不同的租借需求時間比例。從模擬的表現可知道，本研究所提出的模擬方法有助於改善整體租借之表現值，又以 PSO 演算法結合 NSGS 程序來配置自行車數的績效表現值更佳。在模擬實驗的過程中，可得知即使在租借需求比例高之情境，R&S 程序亦可更有效地提升整體租借系統之服務品質，而運補車的增加有助於整體租借系統之表現值有線性的正向改善。

綜合上述，本研究的具體貢獻歸納如下：

1. 以數學期望值與統計之信心水準的條件下，採用啟發式演算法結合模擬最佳化之排序與選擇程序模擬租借系統之運作，使其結果能更有參考依據。
2. 利用歷史租借資訊作為決策租借系統之營運模式參考，從模擬的實驗數據可得知依需求比例來配置各站之期初車輛數與系統之運補車數，能有效地改善整體租借系統之無車可借的問題。而停車柱數的多寡亦影響整體租借系統之還車狀況。
3. 以各模擬模式結合不同的租借需求與租借情境，可得知對整體租借系統之運補最有效的運補車數。

## 5.2 未來研究方向

本節將針對未來可能的研究主題及方向作討論，主要分成五個部份。

第一部份：**站點位址選擇**，營運者規劃租借系統之租借站位址，除了須考慮建置成本，亦須將租借者之租借需求比例分佈情形納入考量。對營運者而言，希望建置總成本越小越好；對租借者而言，租借站位置離租借起訖點越近越好，提升租借之便利性。而本研究所提出之模擬模式，可在限定的區域內找出滿足最多租借需求之站點位址，但其分佈方式為等距離之棋盤式方法。是否有其他租借站之位址設置方法，值得後續討論。

第二部份：**站點容量設定**，本研究根據法國巴黎 Velib 為參考對象，假設各租借站之停車柱為已知，以各站之自行車數來決定該站之容量大小，自行車數量多則空停車柱也多。因此，各租借站之總停車柱數應如何合理地設定應為一重要議題。

第三部份：**運補之門檻值設定**，從 4.2 節的盒鬚圖分析中，可以知道雖然本研究所提出的模擬方法與運補車數的增加是有助於改善等待人數，但以還車等待人數而言，無法更明顯地改善，為了有效地處理「無位可還」的情況，如何設定運補門檻亦是另一重要研究議題。

第四部份：**運補車或人力配置**，從 4.2 節的圖表分析中，可以知道運補車數的增加，有助於提升租借系統之整體績效。但是，運補車的成本也是需要考量的因素之一，倘若能再考慮同時配置人力於自行車租借站，是否更能降低營運成本、提升租借品質。

第五部份：**運補車之行走路線**，由於租借者之租借需求為隨機產生，在運補車接獲運補任務時，若有數個租借站需要運補自行車或是移車，則如何決定運補車之最佳行走路徑，為一個非常困難而值得探討的議題。

## 參考文獻

- 王俊偉. 2011. 以系統模擬探討公共自行車租借系統之建置及營運策略. 資訊管理學系碩士論文, 國立成功大學.
- 洪菁蓬. 2011. 公共自行車租借系統之最佳租借站位址設置及車輛運補策略之研究. 工業與資訊管理學系碩士論文, 國立成功大學.
- 傅聖揚. 2011. 考慮單一隨機限制式下之離散型模擬最佳化演算法. 工業與資訊管理學系碩士論文, 國立成功大學.
- 張立蓁. 2010. 都會區公共自行車租借系統之設計與營運方式研究. 工業與資訊管理學系碩士論文, 國立成功大學.
- 龔建宇. 2007. 國軍油料補給管理模式之建構與分析. 資訊管理學系碩士論文, 國防大學.
- 劉奕青. 2003. 自動販賣機存貨途程問題之研究. 工業工程與管理研究所碩士論文, 元智大學.
- 謝東緯. 2000. 遠洋航商空櫃調度問題之研究. 交通管理科學研究所碩士論文, 國立成功大學.
- Alshamrani, A., Mathur, K., and Ballou, R.H. Reverse logistics: simultaneous design of delivery routes and returns strategies. *Computers & Operations Research*, **34**, 595-619, 2007.
- Ai, J. and Kachitvichyanukul, V. A particle swarm optimization for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. *Computers & Operations Research*, **36**(5), 1693-1702, 2009.

- Bard, J.F. and Nananukul, N. Heuristics for a multiperiod inventory routing problem with production decisions. *Computers & Industrial Engineering*, **57**, 713-723, 2009.
- Branks, J., Chick, S.E., and Schmidt, C. Selecting a selection procedure. *Management Science*, **53**, 1916-1932, 2007.
- Boesel, J., Nelson, B.L., and Kim, S.H. Using Ranking and Selection To “Clean Up” After Simulation Optimization. *Operations Research*, **51**(5), 814-825, 2003.
- Bechhofer, R.E., Santner, T.J., and Goldsman, D. Design and Analysis of Experiments for Statistical Selection, Screening and Multiple Comparisons. John Wiley & Sons, New York, 1995.
- Bechhofer, R.E. A single-sample multiple decision procedure for ranking means of normal populations with known variances. *Annals of Mathematical Statistics*, **25**, 16-39, 1954.
- Chen, C.H., Lee, L.H., Stochastic Simulation Optimization – An Optimal Computing Budget Allocation. World Scientific, Singapore, 2011.
- Crainic, T., Gendreau, M. and Dejax, P. Dynamic and stochastic models for the allocation of empty containers. *Operations Research*, **41**(1), 102-126, 1993.
- Carson, Y. and Maria, A. Simulation Optimization: Methods and Applications. In *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*, 118- 126, 1997.
- DeMaio, P. Bike-Sharing: History, Impacts, Models of Provision, and Future. *Journal of Public Transportation*, **12**(4), 41-56, 2009.
- Fu, M., Optimization for Simulation: Theory vs. Practice, *INFORMS Journal on Computing*, **14**(3), 192-215, 2002.

- Guner, A. R. and Sevkli, M. A continuous particle swarm optimization algorithm for uncapacitated facility location problem. *Ant Colony Optimization and Swarm*, **4150**, 316-323, 2006.
- Goldsman, D., and Nelson, B.L. Comparing systems via simulation. *The Handbook of Simulation*. John Wiley, New York, 273-306, 1998.
- Golden, B.L., Baker, E.K., Alfaro, J.L. and Schaffer, J.R. The vehicle routing problem with backhauling: two approaches. *Working paper MS/S 85-017*, University of Maryland, College Park, 1985.
- Goldsman D. Ranking And Selection In Simulation. *Proceedings of the 1983 Winter Simulation Conference*, 387-394.
- Gupta, S.S. On a decision rule for a problem in ranking means. Doctoral dissertation, Institute of Statistics, Univ. of North Carolina, Chapel Hill, NC., 1956.
- Hong, L.J., and Nelson, B.L. A Brief Introduction to Optimization via Simulation. *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*, 75-85.
- Kim, S.H., Nelson, B.L., Selecting the best system, Chapter 17 in Elsevier Handbook in Operation Research and Management Science: Simulation, Elsevier., 2005.
- Kennedy, J. and Eberhart, R. Particle swarm optimization. *IEEE International Conference on Neural Networks*, 1942-1948, 1995.
- Law, A.M. and Kelton, W.D. *Simulation Modeling & Analysis*. McGraw-Hill, 1991.
- Li, Z. and Tao, F. On determining optimal fleetsize and vehicle transfer policy for a car rental company. *Computers and Operations Research*, **37**, 341-350, 2010.



- Lin, J.R. and Yang, T.H. Strategic design of public bicycle sharing systems with service level constraints. *Transportation Research Part E*, **47**(2), 284-294, 2011.
- Magoulas, G.D., Eldabi, T., and Paul, R.J. Global search for simulation optimisation. *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, 1978-1985.
- Min, H. The multiple vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup points. *Transportation Research A*, **23**, 377-386, 1989.
- Nelson, B.L. Optimization via Simulation Over Discrete Decision Variables. *Operations Research*, **7**, 193-207, 2010.
- Nelson, B.L., Swann, J., Goldsman, D., and Song, W. Simple Procedures for Selecting the Best Simulated System When the Number of Alternatives Is Large. *Operations Research*, **49**, 950-963, 2001.
- Rinott, Y. On Two-Stage Selection Procedures and Related Probability-Inequalities. *Communications in Statistics – Theory and Methods*, **7**, 799-811, 1978.
- Shaheen, S., Guzman, S., and Zhang, H. Bikesharing in Europe, the Americas, and Asia: past, present, and future. *Transportation Research Record*, 2010.
- Shu, J., Chou, M., Liu, Q., Teo, C.P. and Wang, I.-L. Bicycle-sharing system: deployment, utilization and the value of re-distribution. *Working paper*, 2010.
- Santner, T.J., and Goldsman D. Design and Analysis of Experiments for Statistical Selection, Screening and Multiple Comparisons. John Wiley, New York., 1995.
- Wilcox, R.R. A table for Rinott's selection procedure. *Journal of Quality Technology*. **16**, 97-100, 1984.

- Yang, T.H., Lin, J.R. and Chang, Y.C. Strategic Design of Public Bicycle Sharing Systems Incorporating with Bicycle Stocks Considerations. *Proceeding of The 40<sup>th</sup> International Conference on Computers and Industrial Engineering*, 25-28, 2010.
- Zhang, H., Tam, C.M., Li, H., Shi, J.J., Particle swarm optimization-supported simulation for construction operations. *Construction Engineering and Management*, **132** (12), 1267–1274, 2006.

