

系統模擬之運用於紐約環保局與交通大隊之合作

紐約市衛生局擁有 12,000 名員工，一年的預算超過 15 億美金。紐約市衛生局最重要的例行性職責就是清掃紐約市長達 6000 英哩的街道。根據估計，紐約市的街道每天約產生超過 100 噸的垃圾，也就是 400 到 500 萬件的垃圾。由於街道整潔與否大大影響紐約市民的生活品質以及紐約市的城市形象(Riccio 1985)，紐約市衛生局必須盡力作好清掃街道的重要工作。

紐約市衛生局目前有大約 2,200 名街道清掃的人力，其中約有四分之一的人力部署於機械式清掃車這些大型而昂貴的機器無疑的是最有效率也最有效果的街道清掃工具。一名部署於機械式清掃車的清潔隊員，每個工作日能夠清掃約十英哩的街道。使用掃把畚箕並且搭配小型垃圾車的隊員，最多也只能每天清掃一英哩。因此，維持這些機械清掃工具的效率便十分重要。

約 95%的街道垃圾聚集在人行道路緣的十八英吋之內(Fleming 1978)，因此讓機械式清掃車能夠接近這些路緣的鑲邊石進行清掃便十分重要。為了配合機械式清掃車，在 1950 年代早期紐約市政府便下令，每天的特定時段實施街道停車管制。這些管制被稱為輪流換邊停管制(Alternate-Side Parking, ASP)，因為這項管制的內容要求街道每天只開放一側停車，而開放側則每日輪流更換。紐約市衛生局在尖峰時段部署 354 台機械式清掃車，其中 259 台被指派清掃那些配合 ASP 管制的無車輛側街道。

當時紐約市交通局(並不隸屬於紐約市衛生局)的主要任務則是確保 ASP 管制的確實執行。一般而言，維持交通流量的順暢在一定的可接受程度，是紐約市交通局的第一要務。既然執行 ASP 管制所帶來的好處大部分都歸屬紐約市衛生局，紐約市衛生局必須設法說服交通局配合派遣人員，以達成整體的最佳效果。

維持順暢的交通大大的影響紐約市民的生活品質，因此不難理解紐約市交通局並不把重視執行 ASP 管制並取締違規者。然而，衛生局相信而不能夠只依賴衛生局清潔隊員與機械式清掃車。只要透過兩個單位的互相配合與彼此支援，就能夠顯著提升衛生局有效清掃街道的機率，並且不會嚴重干擾交通局的營運活動。

顯而易見的是，路邊的違規停車會擋住機械式清掃車，降低衛生局清掃街道的效率。然而，在官僚體系運作當中，這樣子的質化陳述並不足以說服當局，要求交通局重新配置其人力資源以配合衛生局的計畫。衛生局希望交通局在指派一名 SAP 執行人員，配合一台機械式清掃車與一名清潔隊員，一前一後在指定區域執行任務。交通局取締人員可對於違反 ASP 規定並且造成最嚴重妨礙的車輛開出罰單。這種方式將能夠將罰單的威嚇程度最大化。這種行為與後果之間的直接關聯，將能讓懲罰收到最強的效果。

爲了讓交通局配合該計畫，衛生局必須證明兩件事情：第一，開發單取締能夠減少汽車阻擋機械式清掃車的情況。第二，用可衡量的方式證明停靠街道車輛的減少能夠讓街道更整潔。若無法提供以上的資訊，衛生局無法證明此計畫能夠成功。在此之前，衛生局曾嘗試與交通局協商，最後仍以失敗收場。

因此本研究進行了實地調查，實際計算街道車輛的數目，以證明此問題的關鍵性。本研究發現，一般而言民眾對於 ASP 的配合程度十分良好。然而，約有 20% 的區域配合程度並不高，導致機械式清掃車在十英哩的清掃路徑上，可能遭遇高達八百輛路邊停車的阻擋，也就是每隔七十英尺就有一輛車擋住機械式清掃車使其無法清掃路邊!!!當機械式清掃車被路邊停車阻擋，就必須退至道路的中央，因此便無法清掃街道與人行道之間的凹槽縫隙。這種現象會對於衛生局清掃街道的能力產生什麼影響?如果 ASP 配合程度改善 10%，20%，甚至 50%，衛生局的街道清掃能力又能夠提升多少?

先前的研究曾經計算路邊停車的數量，並且衡量過清掃前與清掃後的街道垃圾量，因此本研究能夠據此計算出，在沒有車輛阻擋機械式清掃車的情況下，機械式清掃車效能的增加幅度(清潔程度的計算方式，乃根據稍後會提及的計分卡方式進行)。由於這路邊停車數量以及街道整潔程度，這兩者之間並不必然呈現線性的關係，因此無法透過輕微的配合程度改變估計其成效。而針對所有可能的影響因子進行實地調查的方式太過困難且成本過高。因此本研究決定採取電腦模擬的方式，評估違規停車與衛生局街道清潔能力之間的關係。

此模擬需要建立四個層面的模型。首先，必須建立「於街道上隨機丟棄垃圾」模型。第二，建立「於街道上隨機停車」模型。第三，根據違規停車的數量與停放模式，建立「機械式清掃車的路徑選擇」模型。第四，建立清潔程度的計分卡評分制度。

垃圾分布模型

垃圾以零星散落或成堆的方式出現。爲了建立垃圾分布模型，本研究必須將每條街道以停車格爲單位劃分，而停車格則畫分爲 8 單位的垃圾位置。本研究假設平均街道長度約爲 400 英尺並且劃有 24 個停車格。因此，每條街道將有 192 單位的垃圾位置。每單位的垃圾位置足以容納零星散落的單一垃圾或一堆垃圾，但並不足以容納兩件垃圾或兩堆垃圾。這樣的設計簡化模型而又不犧牲估計的準確性。

在每回的模擬過程中，模型以下述的方式指派一件或一堆垃圾到每一個垃圾位

置。採 0 到 1 之間的兩個隨機數字，設定為 x 與 y ，並指定 x 小於 y 。同時指派另一個隨機數字 R 。若 R 小於 x ，則該垃圾位置沒有任何垃圾。若 R 介於 x 與 y ，則該垃圾位置存放一件垃圾。若 R 大於 y ，則該垃圾位置存放一堆垃圾。本研究透過以上的方式衡量街道的清潔程度。大部分的情形下， x 與 y 的切點(cutoff point)在街道的每一個區域都保持一致，而垃圾平均分布在街道上，不過有些街道的情況例外。舉例來說，某些街道的兩側有地下鐵入口，因此垃圾量較高。本研究將這些街道的垃圾分布設定為不平均分配，亦即一條街道上， x 與 y 將有三個不同的切點。

汽車停放模型

透過實地調查，本研究得到了每條街道違規停車的機率分配。因此很容易決定在每一回模擬過程中，阻擋機械式清掃車的汽車數量。然而這只是模型的一部分。車輛停放的模式與車輛停放的數量一樣重要。四台停放在一起的汽車，對於機械式清掃車的妨礙程度，遠低於四台分散停放的車輛。為了決定汽車停放的模式，本研究將 0 到 1 的隨機數字區分為 24 個數線上等距的區間，亦即 0~1 之間 24 個等差的數字，代表街道上的停車格位置。每次模擬過程中，將有 x 台的車輛，被指派在一條街道上。每一台車輛被指派到上述 24 個特定數字中的某一個，代表車輛停在某一個停車格。若兩台車指派到同一個數字(停車格)，則另外挑選一個數字。這 x 台車輛的停車模式將經過十次的模擬過程，也就是改變車輛的停車模式，但同時配合垃圾分布模型，讓垃圾丟棄的模式保持相同。

機械式清掃車模型

先前的研究已經針對機械式清掃車的有效程度(American Public Works 1977, Public Technology 1982)以及行為模式(Destafano and Levis 1982)建立模型並加以測試。機械式清掃車的有效程度被定義為「在沒有阻礙(如路邊停車)的情形下以標準速度巡邏，街道垃圾被機械式清掃車拾起的百分比」。上述的研究證實，機械式清掃車的能夠拾起 90%到 98%的街道垃圾。本研究中，模擬過程將使用上述的研究結果，機械式清掃車的有效性設定為 90%。舉例而言，在十次的模擬當中，機械式清掃車會有一次無法拾起該垃圾位置中的單一件垃圾。至於成堆的垃圾，機械式清掃車亦有 10%的機會，無法拾起所有的垃圾。這種情形下，電腦假設機械式清掃車能夠拾起大部分的垃圾，只留下一件在該垃圾位置。

Destafano 與 Levis 發展出一套分析模型，能夠透過違規停車的數量，準確預估街道被清掃的百分比。在該研究中，作者提出關於機械式清掃車行為模式的規則，請參見 Figure 1 與下文：

- 單一車輛違規停車，則機械式清掃車將無法清掃車體兩側，約車長一半的範圍。(Figure 1. A)
- 兩台汽車緊鄰違規停車，則機械式清掃車將無法清掃該停車區域兩側，約兩台車總車長一半的範圍。(Figure 1.B)
- 兩台汽車違規停車且中間隔著一個停車格，則機械式清掃車將無法清掃該停車格。(Figure 1.C)
- 兩台汽車違規停車且中間隔著兩個停車格，則機械式清掃車將無法清除第一個空停車格的後半部以及第二個空停車格的前半部(Figure 1.D)

機械式清掃車模型的模擬過程，將根據以上的規則進行。

計分卡模型

很幸運地，紐約市擁有稱作為「計分卡」的垃圾量衡量系統(Riccio 1984)。此系統根據客觀的評分量表，每月一次衡量街道的垃圾量。1分表示街道上無垃圾，3分表示整條街道，包括人行道的凸緣，都佈滿大大小小的垃圾。Table 1 列出詳細的評分以及衡量標準。本研究實際進行街道垃圾量衡量時，將街道區分為兩到三個區塊，利用計分卡的衡量標準判斷每一個區塊的分數，並且採取平均分數做為該街道的垃圾量衡量分數。若分數小於 1.5，則該街道的乾淨程度就在可接受範圍之內。

既然計分卡垃圾量衡量系統已經用於衛生局的工作績效評估，本研究的模型必須能夠顯示，違規停車數量的減少如何影響計分卡系統的表現。只計算違規停車量減少所增加的機械式清掃車可接觸街道凸緣面積是不夠的。

本模型以下述的方式建構了一套評分系統。將街道區分為三個區塊(如同先前的衡量方式)，每個區塊有 8 個停車位以及 64 個垃圾位置。電腦掃描這 64 個垃圾位置，並且計算含一件垃圾以及含一堆垃圾的垃圾位置個數。接著以 Table II 的規則決定該區塊的乾淨程度評分。(Table II 之規則乃根據實際的垃圾清點與街道評分完成)。

執行模型

本研究以 FORTRAN 程式語言寫成，隨機變數包括違規停車數量以及原始街道清潔程度(未清掃前)。模型以分時大型主機(timeshare mainframe)執行，每一回模擬約耗時十分鐘。該程式的邏輯如下：首先，在街道上隨機分配垃圾，以提供原始的街道清潔程度。接下來使用迴圈的方式，令每條街道上的違規停車數量由 3 道 17 台不等。(因為在模型測試階段，違規停車數量少於 3 台的情況下，街道

必須非常骯髒，才能夠在違規停車數量減少時，看出明顯的街道清潔效果。而在實際調查中發現沒有任何街道的違規停車數量大於 17 台)。每次 x 台的車輛，都經過十次的隨機模擬過程以決定停車的模式。

接著給定街道清潔程度與停車數量，執行模擬讓機械式清掃車清理街道。總共進行 140,000 次的模擬，街道清潔程度與違規停車數量的組合總計 140 種，每種執行 1000 次。每次模擬之後，本研究計算計分卡評分，以決定該次的街道清理是否讓街道恢復可接受的乾淨程度。

結果

Table III 為模擬的結果，機械式清潔車的有效性為 90%。格子中的百分比代表，在某個違規停車數量與清潔程度的組合，在機械式清潔車清掃之後，街道能夠恢復可接受清潔程度(1.5)的百分比。由於 1.5 就視為可接受的清潔程度，原始的街道清潔程度設定為 1.6。由於超過 10 輛違規停車的街道就很難回到可接受的清潔程度，因此統計的上限為 10 輛違規停車。即使 ASP 配合情況只有小幅度的改善，機械式清掃車清潔街道的能力都有顯著的提昇。只要街道上減少一台違規停車，就可讓街道回到可接受清潔程度的比例上升 27%。(參見 Table III，原始街道清潔程度 1.9 的街道，在機械式清掃車清掃過後，能夠回到可接受清潔程度(1.5)的機率，從 4 輛違規停車的 53%成長到 3 台違規停車的 80%)。而原始街道清潔程度 1.8 的街道，在機械式清掃車清掃過後，能夠回到可接受清潔程度(1.5)的機率，從 6 輛違規停車的 40%，成長到 5 輛違規停車的 65%，上升幅度為 25%。在每一種原始街道清潔程度的情形下，其街道恢復清潔機率在減少 2~3 輛車的區間內，有明顯的提昇。在這個區間之外，違規停車數量的減少或增加，對於街道恢復清潔的機率都沒有顯著的影響。顯而易見的，若違規停車數量落在在這個區間之內，則違規停車數量越高時，越應該採取強力的取締手段，包括拖吊 – 也就是停車業者口中的「死刑」。

由於實際上大部分的區域，違規停車數量都在 3 到五輛的區間，因此絕大部分的清掃作業都在 Table III 所指出的重要範圍內。根據本研究模擬模型所得到的資訊，紐約市衛生局能夠提出相當有利的證據，證明若將違規停車的數量降低至一定數量以下，將能夠大幅度增加機械式清掃車的清潔能力。原先對於本提案採取懷疑態度的交通局，也無法反對這項研究結果所提出的有利論點。於是交通局與本研究合作，針對 ASP 違規停車採取罰單取締的策略進行實地測試。以上的測試透過第三方獨立單位，紐約市長營運辦公室(Office of Operation)，證實在罰單取締的策略之下，原先阻擋機械式清掃車工作的違規停車數量已經顯著的減少。一般而言，違規停車數量的比例下降 10%~15%，在某些特定的區域則達到 25%，而這個比例也符合先前的模擬結果(2~3 輛車)。實地測試的結果也證明街

道清潔程度明顯提昇，其清潔程度的上升比例與違規停車數量下降的比例相關，且與本研究的預測相似。

模擬模型的成功預測以及實地測試的成功結果，讓交通局同意擴大原計劃規模，將八個行政區域納入計劃範圍，並調派 30% 的街道機動人力投入本計劃。本研究十分感謝交通局的幫助，也相信本研究的成果能夠協助這兩個部門達成其任務。

若無法對於街道清潔程度的改善幅度做出有效的預測，本研究就無法說服交通局以及市長營運辦公室，這項計劃會是一個聰明的投資。既然該計劃牽涉其他政府部門營運活動的重大改變，自然會遭遇許多官僚體系的壓力。本研究無意暗示交通局的管理不良，工作人員懶散打混，或是工作無效率。事實上正好相反，本研究給予交通局很高的評價，並且希望利用其能力協助我們解決這個棘手的問題。畢竟這個問題是我們的大麻煩，但不是他們的大麻煩。所以事實上是本單位對交通局提出很多要求，希望交通局配合計劃並且在營運上做出重大改變，因此本單位必須說服交通局以及其他單位，這項計劃能夠提昇公共利益。事實上本研究是讓衛生局與交通局改變其營運策略的關鍵。

本模型的其他運用

本研究發現此模擬模型對於其他類型的街道清潔問題同樣有用，例如比較各種不同人力清掃方式的效率，或是不同新式清掃機器設備的效率。另一個使用本模擬模型進行分析的重要議題，是紐約市的可回收容器法案，又稱為瓶子法案(Bottle Bill)。

爲了測試這項法案的成效，由一個獨立單位(Fund 1984)進行實地調查，提供本研究在法案通過前後，街道上的可回收容器數量與百分比。本研究希望透過計分卡系統，將街道上大規模的可回收容器減少量，轉換成百分比。

本研究從上述的實地調查中，採用了法案執行前的資料。本研究計算出，街道上某件垃圾是可回收容器的機率，以及一堆垃圾中含有至少一個可回收瓶罐的機率。運用此資料，本研究設定模擬模型指定垃圾到街道位置上，接著指定這些垃圾爲可回收容器或一般垃圾。透過法案執行後的實地調查資料，本研究掌握了可回收容器的減少百分比，並且運用此資料，利用隨機抽取亂數並且參考可回收容器減少百分比，決定移除可回收容器或讓可回收容器繼續停留在街道位置上。若一堆垃圾中的可回收瓶罐被移除，該垃圾仍停留在街道位置上。

本研究藉由電腦完成法案執行前後的計分卡評分。雖然可回收容器的減少量十分

可觀，減少量已經達到 80%，也就是每天紐約市的街道上減少 541,000 個可回收容器，計分卡系統顯示其實際街道清潔效果依然不顯著。

原始清潔程度在可接受程度(1.5)左右的街道，在法案實施之後，其清潔程度有改善，但原始清潔程度大於 1.6 的街道，即使可回收容器大幅度減少，街道依然無法恢復可接受的清潔程度。有兩個原因造成這個結果。第一，大幅度的可回收容器減少量，通常來自於最骯髒的區域，這些區域的其他垃圾量依然很高。第二，可回收容器僅佔街道垃圾量的 17.7%。80%的可回收容器減少量，事實上只造成 14.4%的總垃圾減少量。然而 14.4%的垃圾減少量，已經是這個城市任何單一垃圾減量計劃的最高值。除此之外，減少可回收容器也讓紐約市變得更安全。由於街道上的金屬與玻璃減少，因此也降低了玻璃割傷或汽車爆胎的可能性。因此，雖然該法案的效果在計分卡系統的評估下，並不如一般預期的顯著，但該法案對於紐約市整體環境的改善仍是非常重要的。

該模型讓本研究人員能夠將預期數量化，即使在計分卡系統上並沒有顯示出大量的可回收容器減量。這項研究成果在兩方面顯得非常重要。

第一，聯邦政府認為該法案能夠降低清掃街道的人力需要，因此大幅度降低地方政府的預算。然而本研究卻顯示，即使該法案能夠大量減少街道上的可回收垃圾，但卻無法在計分卡系統上表現出使街道恢復清潔的效果。因此本研究能夠提出有力的論點，證明減少清掃人力的決策並不恰當。

第二，地方政府認為由於該法案能夠有效提昇街道清潔程度，因此不需要加派清潔人力就能夠達到衛生局要求的街道清潔目標。本研究證明該法案雖然能夠有效降低可回收容器數量，但卻無法有效提昇街道清潔程度，因此該法案並不影響加派額外清掃人力的請求。

結論

對於紐約市衛生局來說，模擬已經成為重要且有效率的決策工具。重要的決策都必須參考該模型所提供的資訊。