

中華民國第 62 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

高級中等學校組 電腦與資訊學科

第三名

052510

人人人 人人 人人人門 - 以程式模擬人群疏散

學校名稱：桃園市立武陵高級中等學校

作者：  高二 吳昭泓  高二 蔡宏杰  高二 楊棋為	指導老師：  賴悅聖
---	------------------

關鍵詞：細胞自動機、社會力、博弈論

# 摘要

本研究旨在透過自行撰寫程式，探討人群如何盡快脫離狹小空間，主要模擬個體所受各種吸引力與排斥力、設立衝突處理規則，分析疏散效率並比較優劣。經過測試得知減少鑽空行為、排斥人群、略為排斥牆壁或障礙、不失自身判斷追隨他人足跡，有利整體疏散。另外，若人群出現移動模式異於他人的少數者，將不利整體疏散，但少數者人數不多下，愛好爭搶、鑽入空隙、較不排斥人群有助其個體疏散。

無論是否將疏散場域外廣場人群移動納入考慮，角落出口疏散效率皆較邊上優，且出口個數呈邊際效益遞減。但廣場中人群若步行六步內便停下休息，將導致邊上廣場入口堵塞。最後，逃離疏散場域後即往廣場邊界者，疏散效率表現相當於在廣場步行十步便佇足休息。

## 壹、前言

### 一、研究動機

2021年11月5日，打開電視機，便是一則可怕的新聞映入眼簾，「美國饒舌歌手崔維斯史考特在德州休士頓舉辦天文音樂祭，卻爆火人踏事故，造成十人身亡、逾百人受傷…」看完此則新聞後，研究者為之驚嘆，看似平靜而歡愉的夜色，卻因人群的爭先恐後，加上主辦方未規畫合適動線，而染成了緋紅的瑪瑙，人群的力量真不可忽視！

近幾年，人群疏散議題逐漸成為炙手可熱的討論焦點，國外不乏關於人群疏散的研究，反觀國內卻較為少見。然而台灣人口密度極高，在超市、演唱會、學校的人群移動可謂無所不在，因此執行有關人群疏散之實驗成為當務之急的課題。

但因為直接以真實人群做實體實驗，所耗費的時間與人力成本過於龐大，因此研究者希望能夠憑藉著已發表的論文為基礎，再搭配生活實地觀察人群移動的趨勢，藉由自行設計模型並撰寫程式模擬，事先預測不同人群移動模式下的結果，並提出改善方案。

## 二、研究目的

- (一) 探討人群爭搶趨勢與鑽空行為對疏散效率的影響。
- (二) 探討不同力量大小與感知範圍對疏散效率的影響。
- (三) 探討少數不合群者對整體及個人疏散效率的影響。
- (四) 探討疏散場域出口個數與位置對疏散效率的影響。
- (五) 探討疏散場域外廣場面積對場內疏散效率的影響。
- (六) 探討疏散場域外廣場人群移動對場內疏散效率的影響。

## 三、文獻回顧

本研究一開始由 Dirk H. & Peter M. (1998) 論文中的社會力模型開始延伸。但在參考謝積鑿、薛鬱 (2012) 的研究後，決定以細胞自動機為基礎，因其較為簡單且容易擴充規則。論文中細胞自動機的個體僅會往出口移動，為了更符合現實，研究者加入了前篇論文中的社會力模型公式，計算合力的方向即為細胞移動方向。

後來研究者又參考了西成活裕所著之《壅塞學》，內文敘述了動場與靜場的觀念。動場即類似社會力模型；靜場則是有關人群所留下的足跡，以供他人參考之用。因此研究者將文中提到跟隨人群的模式簡化成前文社會力模型中的一種力量。

由於一單位時間內，所有人都是同時移動，沒有先後次序之分，因此細胞的爭搶規則以博弈論中的靜態賽局為基礎進行修正，但仍然蘊含部分賽局理論的精神。

最後研究者以陳亮、郭仁擁、塔娜 (2012) 研究中的實驗數據來初步檢驗模型是否合理，並發現結果大致符合真實情況。

## 貳、研究設備及器材

### 一、硬體設備

- (一) 作業系統：Windows 10 (64 位元)
- (二) CPU：intel(R) Core(TM) i5-2430M 2.40 GHz
- (三) 記憶體：8 GB

### 二、程式語言：python 3.9 (64-bit)

### 三、使用模組：numpy, openpyxl 等

## 參、研究過程或方法

### 一、建立疏散場域地圖

本實驗採取細胞自動機，以類似棋盤方格的方式建立地圖，每個方格將儲存人的編號與足跡等資訊供他人參考。所有人移動一步的單位時間即視為一時步，而移動規則如下：

- (一) 一個時步內，每人只可移動至四周八個方格，或停留於原本位置。
- (二) 一個時步內，若兩人以上位置相同或軌跡交錯，即視為發生衝突。
- (三) 一個時步結束時，每個人的位置不可位於障礙物或牆壁的方格。
- (四) 一個時步結束時，若出口方格被人佔據，則該人視為疏散完畢。
- (五) 每個人的起始位置除了須符合第三點規則外，亦不可位於出口。

### 二、疏散場域外廣場地圖

現實生活的疏散場域外多半有廣場，因此嚴謹而言，不能單以人群抵達出口視為疏散完畢。研究者藉由改變廣場面積、連結疏散場域之出口位置及個數、與廣場中人群移動模式（是否因疲勞而行走幾步後便停下休息），觀察這些操縱變因如何影響疏散場域內的人群移動。而廣場地圖除了須符合上述（一）到（三）點規則外，尚須符合以下原則：

- (一) 逃離房間者，若對應之廣場入口無人，下一時步前進廣場。
- (二) 一個時步結束時，位於廣場邊界的人群將自動被移出廣場。

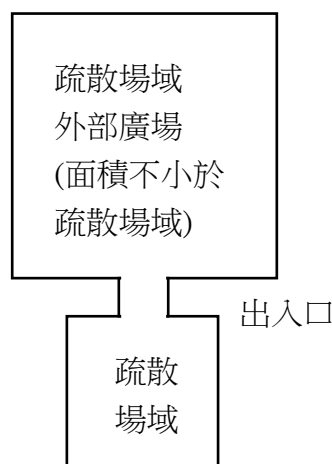


圖 1：疏散場域外廣場示意圖

### 三、疏散場域內決定移動方式順序的機制

一個時步開始時，所有人必須決定移動方式的優先次序。考量因素如下：

#### (一) 混亂模型

考量現實生活中，面臨緊急情況的人們時常驚慌失措，失去自身判斷力地胡亂移動，故設此模型。實現方式為：隨機產生移動方式的優先順序。

#### (二) 鑽空模型

考量現實生活中，部分人士愛好尋找人群中的空隙並鑽入其中，故設此模型。實現方式為：觀察自身周圍八個方格目前是否有人，沒有人的方格會被列為優先選擇。

#### (三) 社會力模型

每個人可參採以下三種力量，計算完合力後，若合力為 0，則最佳移動方式為保持原本位置，其餘 8 種移動方式將以亂數決定優先次序；若合力不為 0，則選擇與合力方向角相差最小者為優先。由於地圖規則設定每人於一個時步內只可移動一步，因此合力大小將不影響移動方式順序。所有實驗皆設自驅動力常數為 10，單一力常數大的意義，在於其參考的比重較大。

##### 1. 自驅動力

若有多個出口，將以距離最近的出口為優先考量，並產生往出口方向的力量，此力量大小固定為自驅動力常數，不隨著與出口距離而改變大小。

##### 2. 足跡力

若一時步結束時有人離開某方格並前往他處，即視為成功通過，將在此設足跡紀錄。逃生過程中，部分的人會觀察他人足跡，欲追隨成功者腳步，故設此力。若過去一定時步（感知時步）內觀察到他人足跡，則加入合力計算，公式如下。

$$(x, y) = \left(k \frac{x}{d}, k \frac{y}{d}\right), k: \text{足跡力常數}, d: \text{距離現在多少時步前。}$$

##### 3. 排斥力

種類分為排斥人群力、排斥障礙物力與排斥牆壁力。若感知範圍內有目標物（人、障礙物或牆壁），則累計合力，公式如下。

$$(x, y) = \left(-k \frac{x}{d}, -k \frac{y}{d}\right), k: \text{各種力量常數}, d: \text{距離。}$$

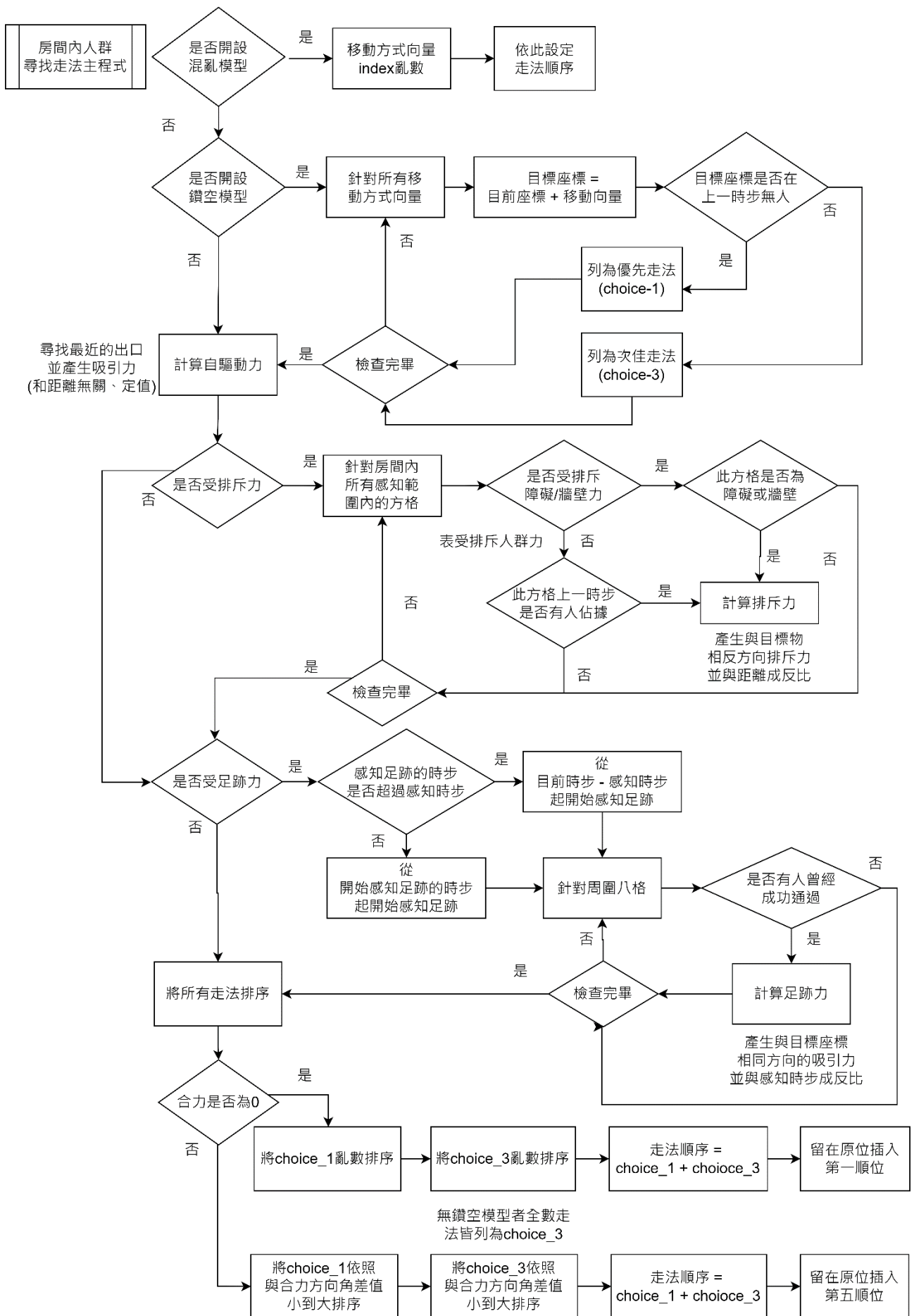


圖 2：疏散場域內決定移動方式順序機制流程圖

#### 四、疏散場域外廣場內決定移動方式順序的機制

疏散場域外廣場的人群主要可分為以下兩大類：

##### (一) 開設疲勞模式

考量現實生活中，逃離疏散場域的人們可能會因為疲累，而選擇於廣場中某位置停下休息，故設此模型。實現方式為：於廣場中移動一定步數後，即不再移動。

##### (二) 前往廣場邊界

稍有體力的人群，可能會選擇逃離此廣場，故設此模型。實現方式為：依照類似自驅動力的演算法，找到離當下距離最近的廣場邊界方格。

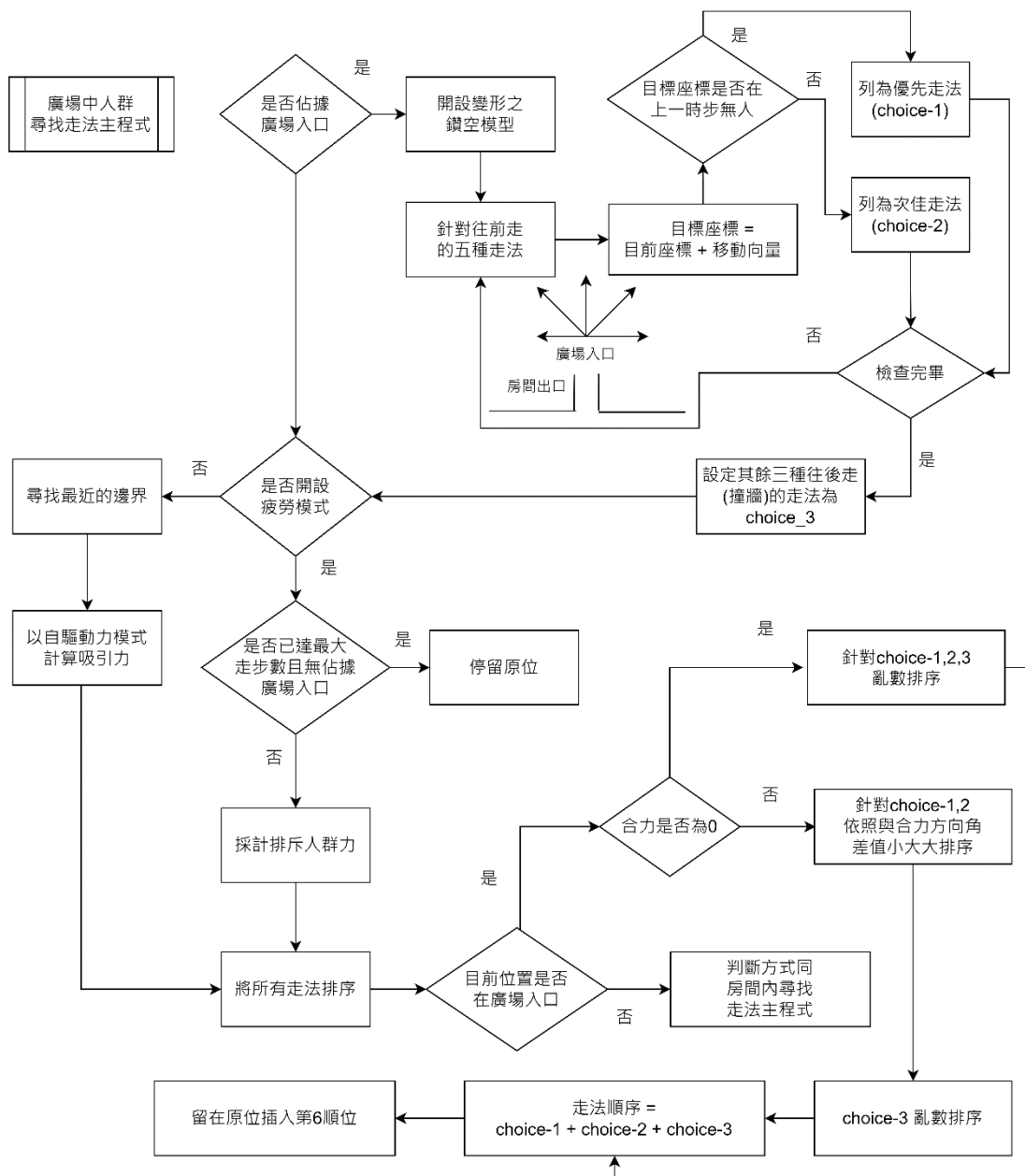


圖 3：疏散場域外廣場決定移動方式順序機制流程圖

## 五、評估最佳走法

排定移動方式優先次序後，便產生了本時步的最佳走法與目標方格，但此方格可能是牆壁或障礙物，發生碰撞勢必因感到疼痛而稍做停留；也可能是上一時步爭搶失敗的座標，依照衝突處理規則必須延遲兩時步。流程圖如下：

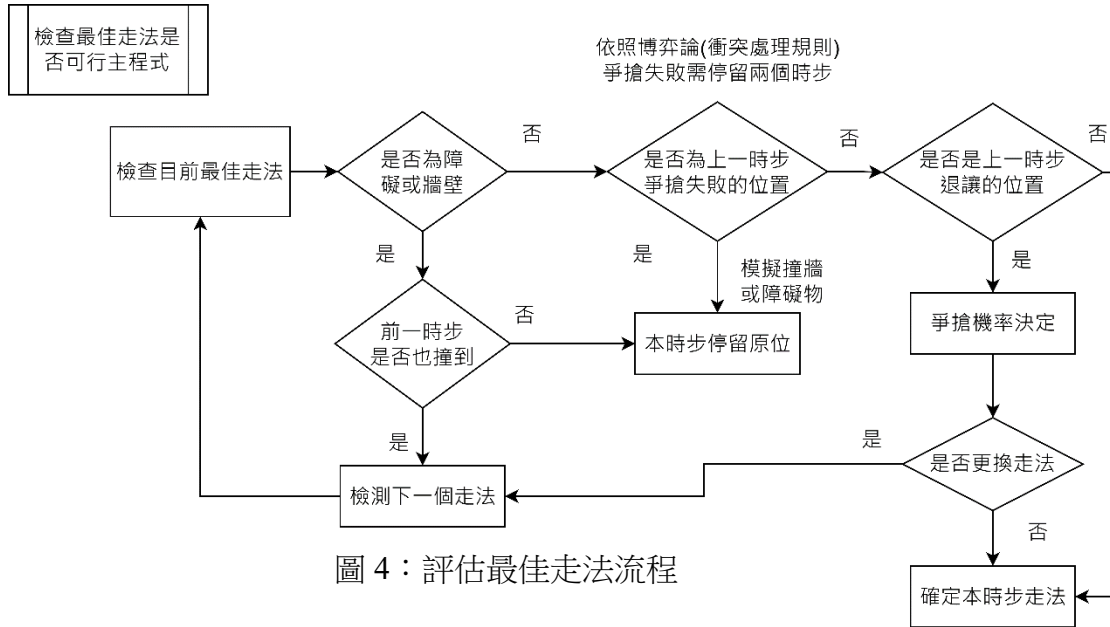


圖 4：評估最佳走法流程

## 六、建立衝突處理規則

當所有人決定本時步的移動方式後，還不可貿然行動，因為可能會有兩人以上同時佔據一個方格 (視為衝突)，或移動軌跡交錯的情形，此時人群將依照衝突處理規則，選擇爭搶或退讓。此規則主要參考博弈論處理。

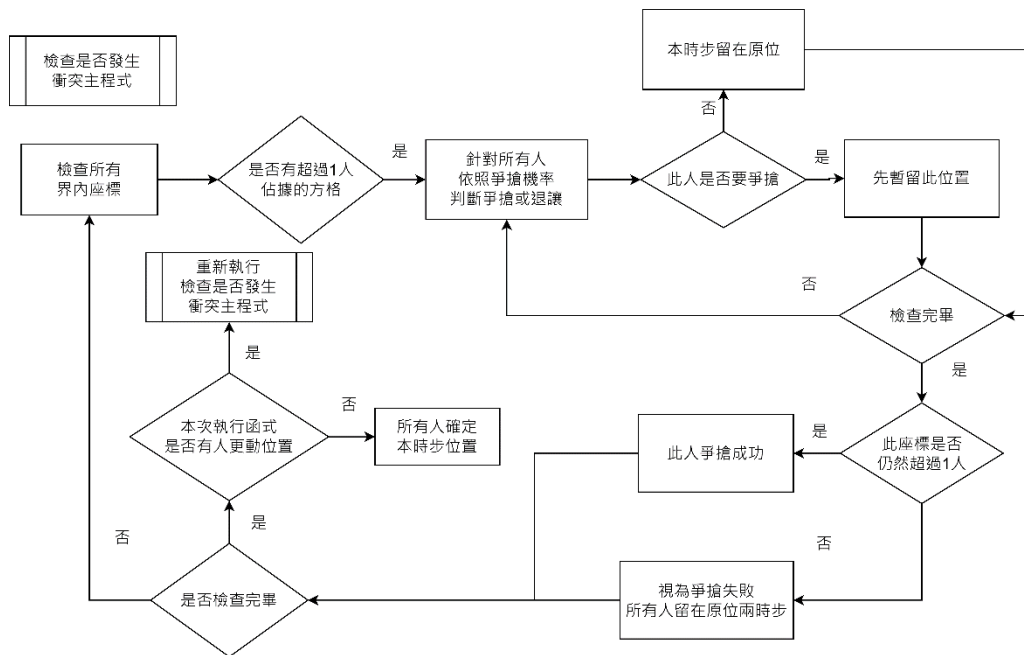


圖 5：衝突處理流程圖



表 1：爭搶與退讓規則說明

A \ B	爭搶	退讓
爭搶	雙方延遲兩時步	A 直接進入、B 延遲一時步
退讓	B 直接進入、A 延遲一時步	雙方延遲一時步

## 七、應變變因探討

每個實驗數據將執行 35 次實驗，並捨去頭尾五個極端值再取平均值，以減少因起始位置過於極端（如：所有人群皆偏向疏散場域某一側）所導致的實驗誤差。

表 2：應變變因種類與說明

平均時步	全員疏散完畢所需的時步取平均值
流通率	$\frac{\text{總人數}}{\text{平均時步}}$ ，目的是不同人數間的比較
繞路步數	移動次數 - 所需最短步數
繞路比例	$\frac{\text{繞路步數}}{\text{疏散所需最短步數}}$
撞牆/障礙次數	因撞牆或障礙物，停留原位的次數
撞牆/障礙比例	$\frac{\text{撞牆或障礙物次數}}{\text{疏散所需最短步數}}$

## 八、少數者研究方法

本研究最重要之目的為：疏散場域活動主辦方可事先規劃動線，並在疏散過程中引導人群以最快移動模式成功抵達出口。但若人群中有移動規則迥異於多數者，則必須藉由分析整體與少數個體的各項實驗數據，判斷其是否有利於整體疏散效率，以及少數個體的目的是否達成。但有鑒於少數者人數少，不固定的起始位置將導致實驗誤差過大，因此本實驗將採取以下步驟執行：

- (一) 執行 35 次無少數者的實驗，並記錄整體與所有個體的實驗結果，視為對照組。
- (二) 依少數者操縱變因數據執行 35 次實驗（每次實驗每人起始位置與對照組一一對應）、記錄整體與所有個體的實驗結果、並將以上兩者對照並分析，應變變因公式如下：

$$\text{少數者平均時步變化率} = \frac{\text{少數者平均時步} - \text{少數者在對照組時的平均時步}}{\text{少數者在對照組時的平均時步}}$$

$$\text{少數者繞路比例變化率} = \frac{\text{少數者繞路比例} - \text{少數者在對照組時的繞路比例}}{\text{少數者在對照組時的繞路比例}}$$

以上少數者實驗因為需觀察個別疏散狀況，故以平均時步作為主要觀察變因。但少數混亂模型者由於不列入平均時步採計，將導致總疏散人數不同，故以平均流通率為指標。

### 九、總流程圖與程式碼

以上所述的程式碼完整版公開於 github：

<https://github.com/github940719/science-fair>

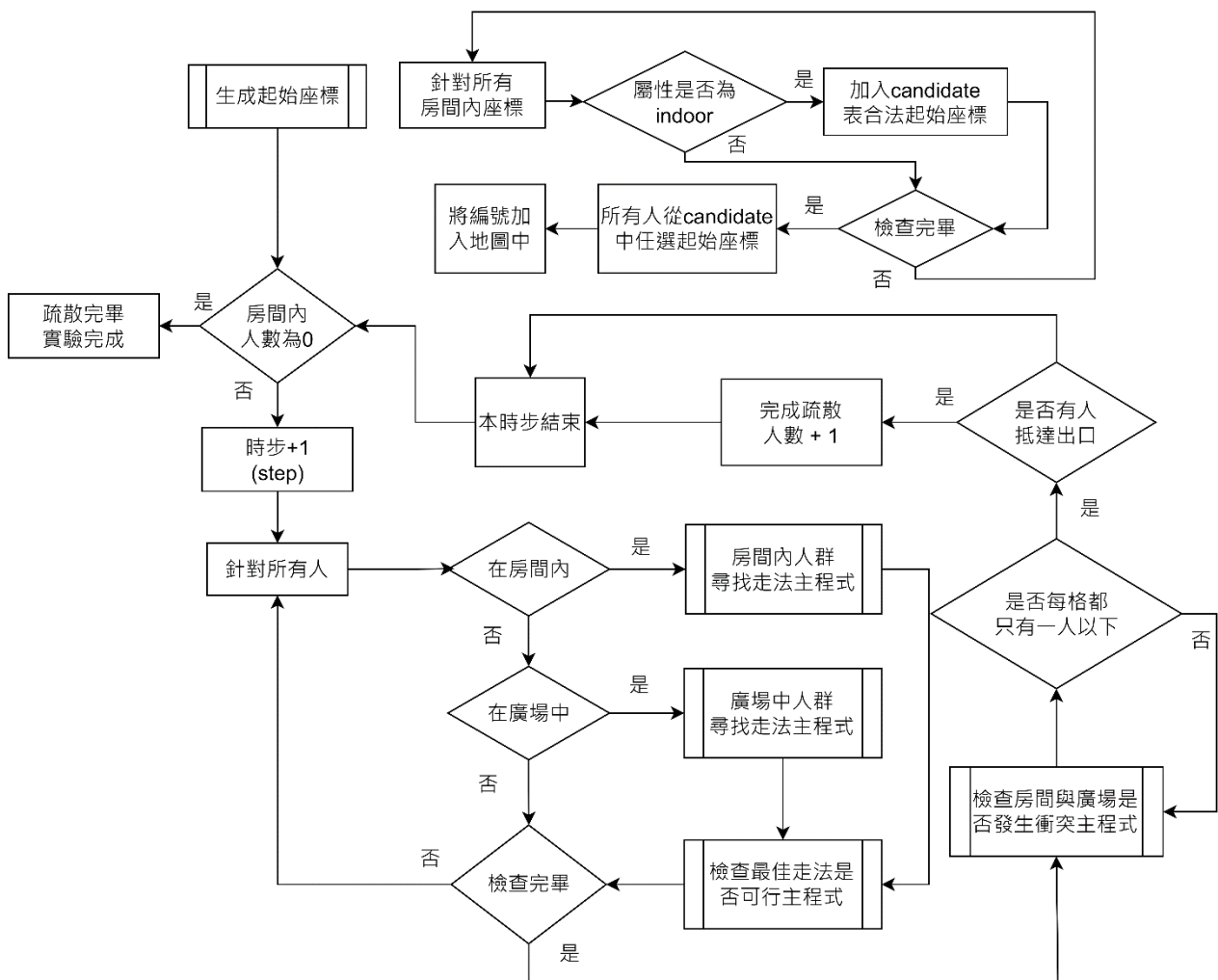


圖 6：總程式流程圖

## 肆、研究結果

### 一、爭搶機率對疏散效率的影響

由圖 7 可知，只參採自驅動力且無鑽空模型下，爭搶機率 0.3~0.6 區間，所需平均時步差異不大，但兩端卻有劇烈變化，整體趨勢形同二次函數圖形。而由於不同人數實驗的流通率變異係數小，因此推斷人數對出口的流通率影響不顯著。

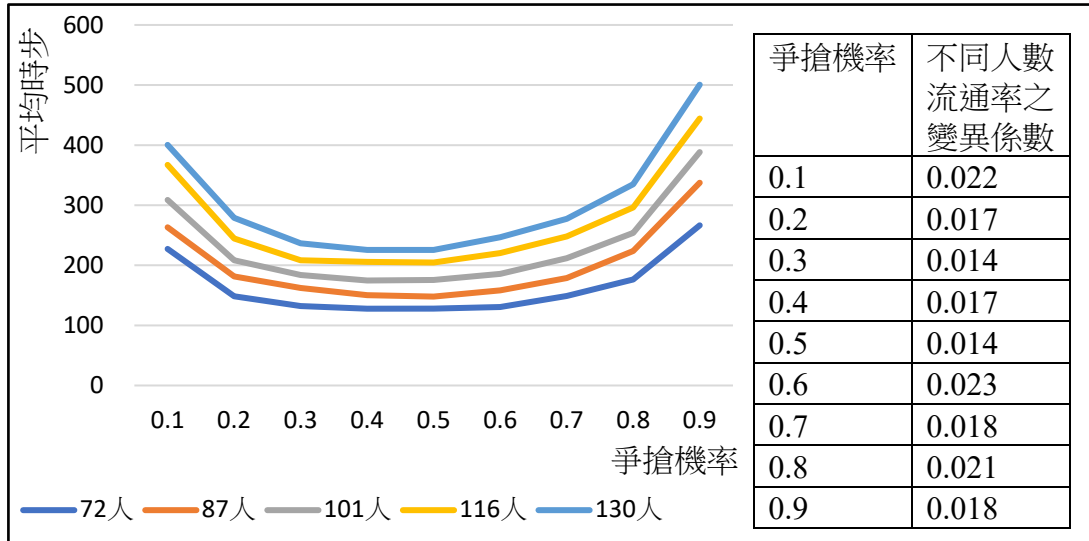


圖 7：爭搶機率對平均時步的影響 (無鑽空)

### 二、鑽空模型對疏散效率的影響

由圖 8 可知，只參採自驅動力且有鑽空模型下，不同爭搶機率的變化趨勢與無鑽空模型變化不大，人數對出口流通率影響仍不顯著，但圖 9 顯示整體疏散效率明顯下降。

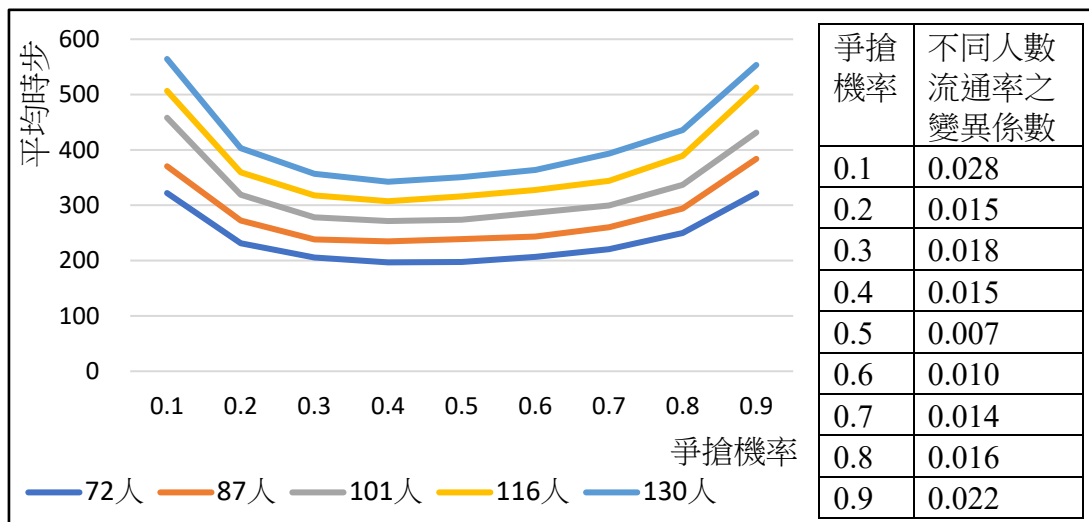


圖 8：爭搶機率對平均時步的影響 (有鑽空)

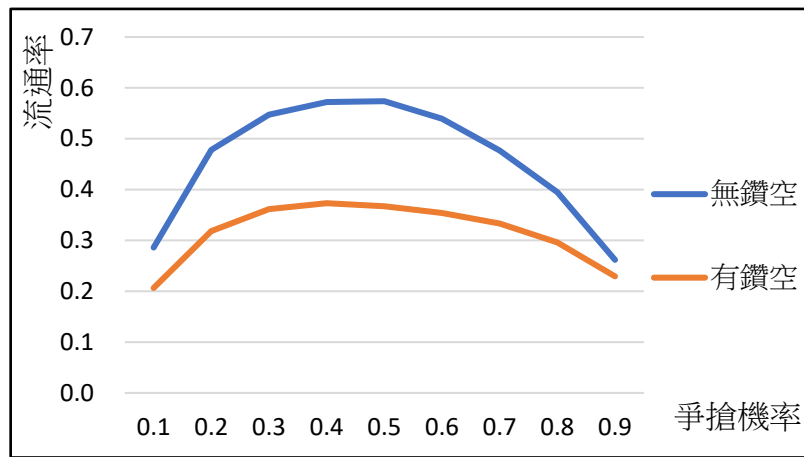


圖 9：鑽空與否對流通率的影響

### 三、排斥人群力對疏散效率的影響

此實驗之控制變因為：自驅動力常數 = 10、不開設鑽空與混亂模型、爭搶機率 = 0.5、除排斥人群力外的所有力常數 = 0、人數 72 人。操縱變因為：排斥人群力常數與感知範圍。對照組為：只開設自驅動力下的平均時步 = 127.88。

#### (一) 排斥人群力感知範圍與力常數對平均時步的影響

由圖 10 可知：排斥人群力的力常數與平均時步呈現高度正相關，且除了力常數 = 7 情形外皆高於對照組，顯示只要力常數不要過大，排斥人群力是有利於疏散的。另外，感知範圍與平均時步的關係較不顯著，即主要影響因素為力常數。

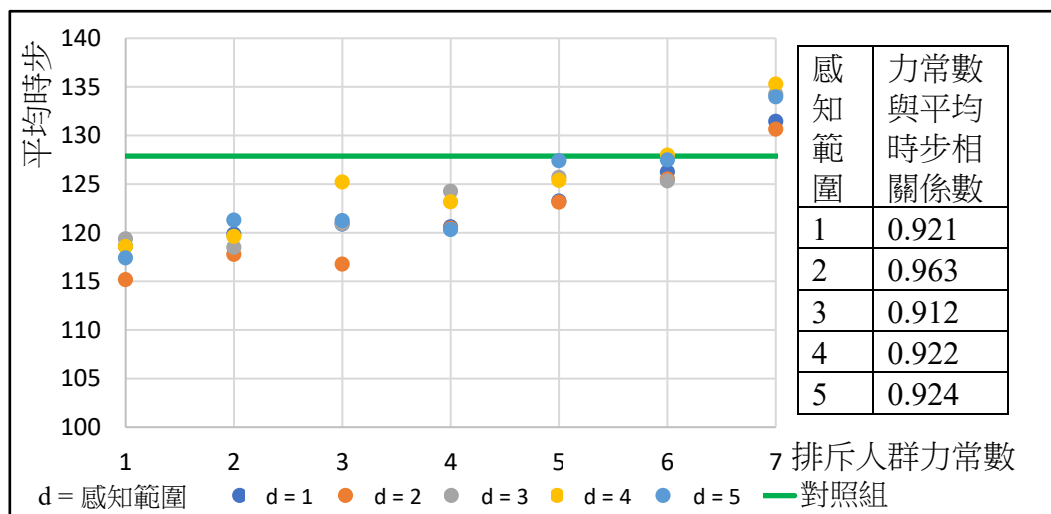


圖 10：排斥人群力感知範圍與力常數對平均時步的影響

(二) 排斥人群力感知範圍與力常數對繞路比例的影響

由圖 11 可知：排斥人群力常數與繞路比例呈現高度正相關，可推測繞路情形會導致平均時步上升。

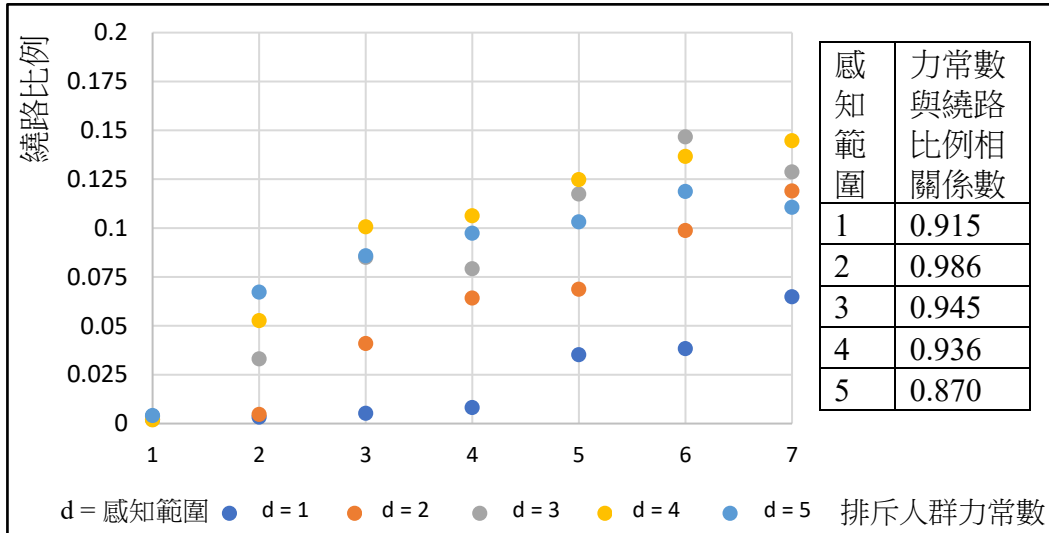


圖 11：排斥人群力感知範圍與力常數對繞路比例的影響

(三) 排斥人群力感知範圍與力常數對撞牆比例的影響

由圖 12 可知：排斥人群力常數與撞牆比例呈現高度正相關，可推測撞牆現象也會導致平均時步上升。而比較圖 11 與 12 可發現撞牆比例普遍較繞路比例高。

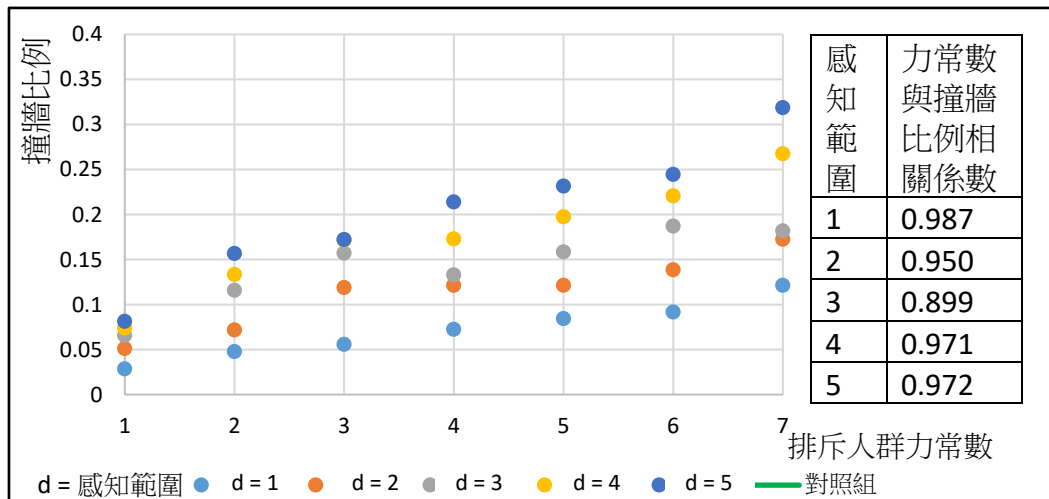


圖 12：排斥人群力感知範圍與力常數對撞牆比例的影響

#### 四、排斥牆壁力對疏散效率的影響

此實驗之控制變因為：自驅動力常數 = 10、爭搶機率 = 0.5、不開設鑽空與混亂模型、除排斥牆壁力外的所有力常數 = 0、人數 72 人。操縱變因為：排斥牆壁力常數與感知範圍。對照組為：只開設自驅動力下的平均時步 = 127.88。

##### (一) 排斥牆壁力感知範圍與力常數對平均時步的影響

由於排斥牆壁力常數 > 1.6 會無法完成疏散，故圖 13 僅列出小於 1.6 的數據。由此圖可知：排斥牆壁力的力常數與平均時步呈現高度正相關。另外，隨著感知範圍加大，無法完成疏散的排斥牆壁力常數臨界值也隨之降低，亦即排斥牆壁的感知範圍大不利於疏散。總體而言，由於此實驗平均時步大於對照組的力常數臨界值（約為 0.4~1）小於排斥人群力（約為 7），故推測排斥牆壁力較排斥人群力不利於疏散。

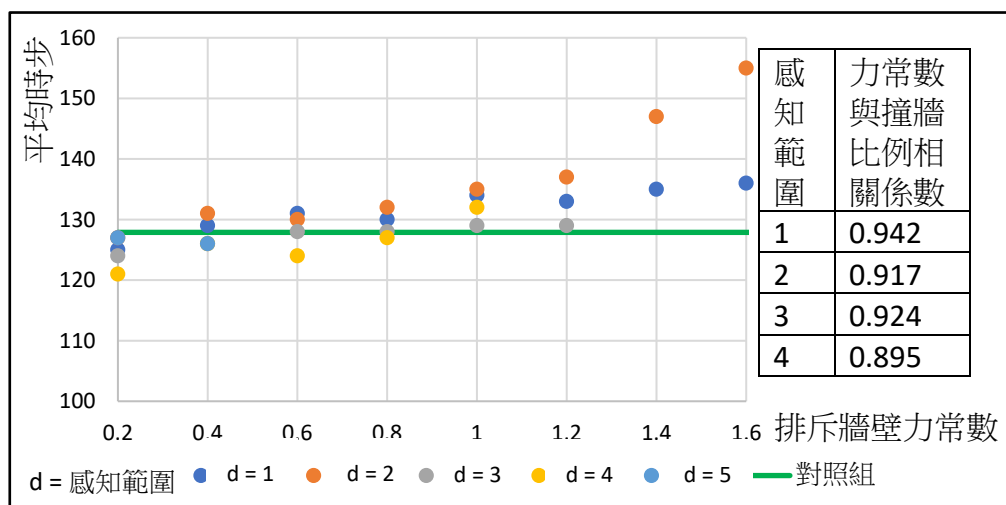


圖 13：排斥牆壁力感知範圍與力常數對平均時步的影響

##### (二) 排斥牆壁力感知範圍與力常數對撞牆比例的影響

由於排斥牆壁力常數 > 0.2，撞牆次數皆為 0，故圖 14 僅列出排斥牆壁力常數為 0.2 的數據。由此圖可知：排斥牆壁感知範圍與撞牆次數呈現負相關，且感知範圍越大，撞牆比例的差異越小（圖形切線斜率絕對值越小）。

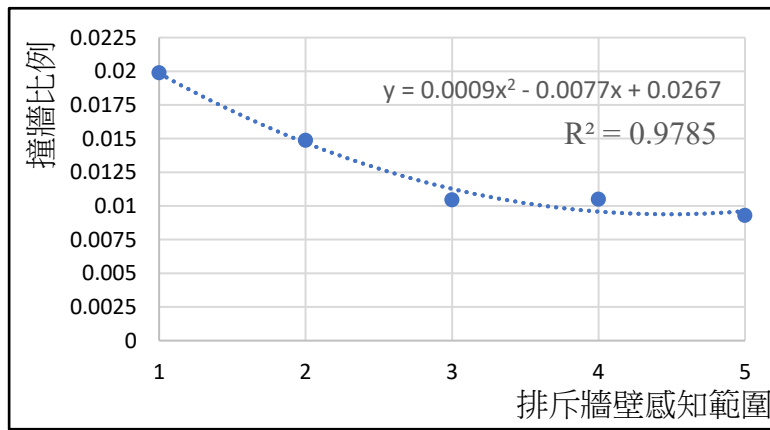


圖 14：排斥牆壁感知範圍與撞牆比例的關係

### 五、足跡力對疏散效率的影響

此實驗之控制變因為：自驅動力常數 = 10、爭搶機率 = 0.5、不開設鑽空與混亂模型、除足跡力外的所有力常數 = 0、人數 72 人。操縱變因為：足跡力常數與感知時步。對照組為：只開設自驅動力下的平均時步 = 127.88。

#### (一) 足跡力感知時步與力常數對平均時步的影響

由圖 15 可知：足跡力常數與平均時步呈現高度正相關，而足跡力感知時步大也將導致平均時步上升。總體而言，只有在足跡力感知時步為 2，且足跡力常數 < 5 情形，才會有助於疏散。

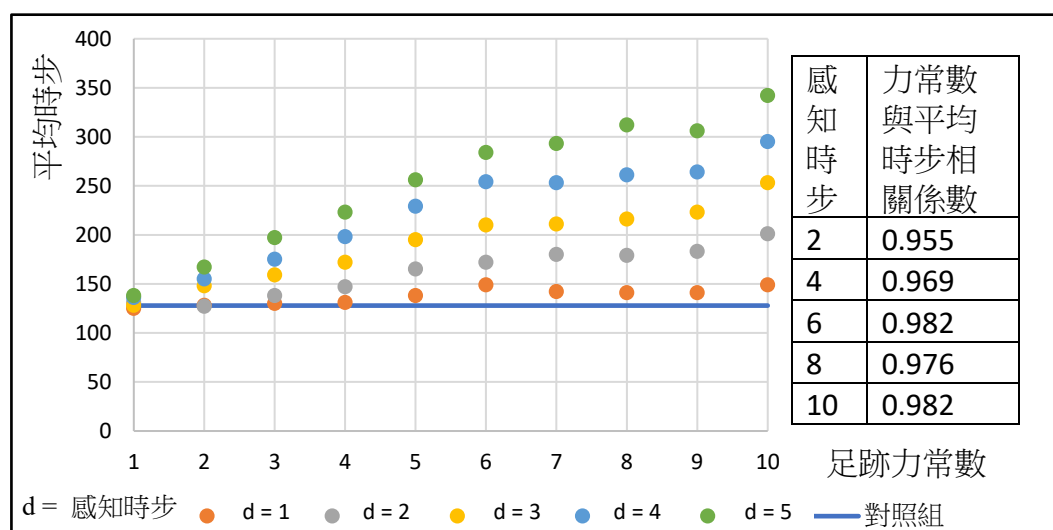


圖 15：足跡力感知時步與力常數對平均時步的影響 (1)

(二) 足跡力感知時步與力常數縮小對平均時步的影響

若針對足跡力感知時步為 1~3，力常數為 0.4~4 作細部實驗可知：感知時步小於 3，足跡力常數小於 4，仍然可提升疏散效率。

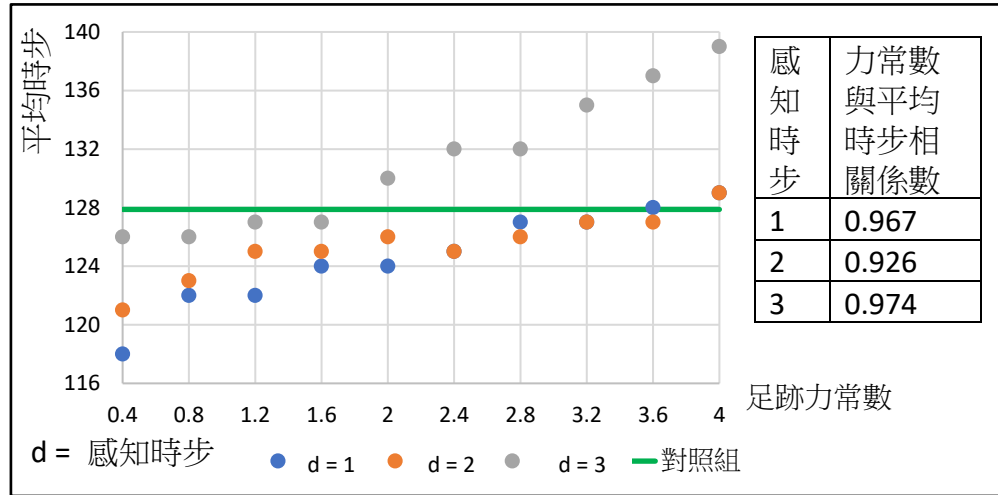


圖 16：足跡力感知時步與力常數對平均時步的影響 (2)

六、不同力量之交互作用

本實驗參考上述各力量主要影響因素，將自驅動力常數訂為 10、排斥人群與牆壁兩力的感知範圍列為控制變因並訂為 3 單位；將兩者力常數、足跡力常數與感知時步列為操縱變因，並至少參採兩力，以觀察交互作用。以下就不同爭搶機率討論結果：

表 3：爭搶機率 0.1，力量交互作用平均時步排序

排序	排斥人群力常數	排斥牆壁力常數	足跡力常數	足跡力感知時步	平均時步
1	7	0	6	2	153.19
2	7	0	10	2	156.86
3	7	1	10	2	158.94
4	7	2	0	/	161.43
5	7	1	5	2	162.53
6	7	0	7	2	162.90
6	7	0	8	2	162.90
8	7	0	9	2	164.01
9	7	1	6	2	164.76
10	6	1	10	2	166.28



表 4：爭搶機率 0.5 力量交互作用平均時步排序

排序	排斥人群力常數	排斥牆壁力常數	足跡力常數	足跡力感知時步	平均時步
1	5	0	1	2	115.57
2	7	0	8	2	115.76
3	7	0	7	2	117.46
4	6	0	10	2	118.03
4	2	0	1	8	118.03
6	2	0	2	2	118.23
6	6	0	3	2	118.23
6	7	0	2	4	118.23
9	7	0	4	2	118.42
10	7	0	3	4	118.62

表 5：爭搶機率 0.9，力量交互作用平均時步排序

排序	排斥人群力常數	排斥牆壁力常數	足跡力常數	足跡力感知時步	平均時步
1	7	0	10	2	138.46
2	7	1	9	2	139.53
3	7	0	9	2	140.08
4	7	1	8	2	142.29
5	7	0	8	2	142.57
5	7	1	10	2	142.57
7	6	0	10	2	143.71
8	7	0	7	2	144.00
9	6	0	9	2	144.87
9	7	1	7	2	144.87

表 6：各爭搶機率力量交互作用結果特色探討

爭搶機率 *	0.1	0.5	0.9
排斥人群力常數	普遍偏大 (6~7)		
排斥牆壁力常數	普遍偏小 (0~1)		
足跡力常數	普遍偏大 (6~10)	1/3 偏大 2/3 偏小	普遍偏大 (7~10)
足跡力感知時步	普遍偏小 (2)		

\*請參閱圖 7 的水平軸 (0.1~0.9)。

## 七、排斥障礙力對疏散效率的影響

此實驗之控制變因為：自驅動力常數 = 10、不開設鑽空與混亂模型、除排斥牆壁力外的所有力常數 = 0、障礙物面積為一單位，且距離牆壁一單位 (如圖 17)、人數 72 人。操縱變因為：排斥障礙力常數與感知時步、爭搶機率。對照組為：只開設自驅動力下的平均時步，爭搶機率 0.1、0.5 與 0.9 分別為 227.13、127.88 與 276.92。



圖 17：障礙物位置示意圖

### (一) 不同爭搶機率

不論爭搶機率，排斥障礙力常數與平均時步呈正相關。爭搶機率 0.1 與 0.5，力常數 4 後平均時步開始高於基準值；爭搶機率 0.9 則要到 6 才高於基準值。整體而言，爭搶機率 0.9 排斥障礙物力量最有助於提升疏散效率。另外由於固定力常數，不同感知範圍對應之平均時步差異小，故推知排斥障礙物力量的主要影響因素為力常數。

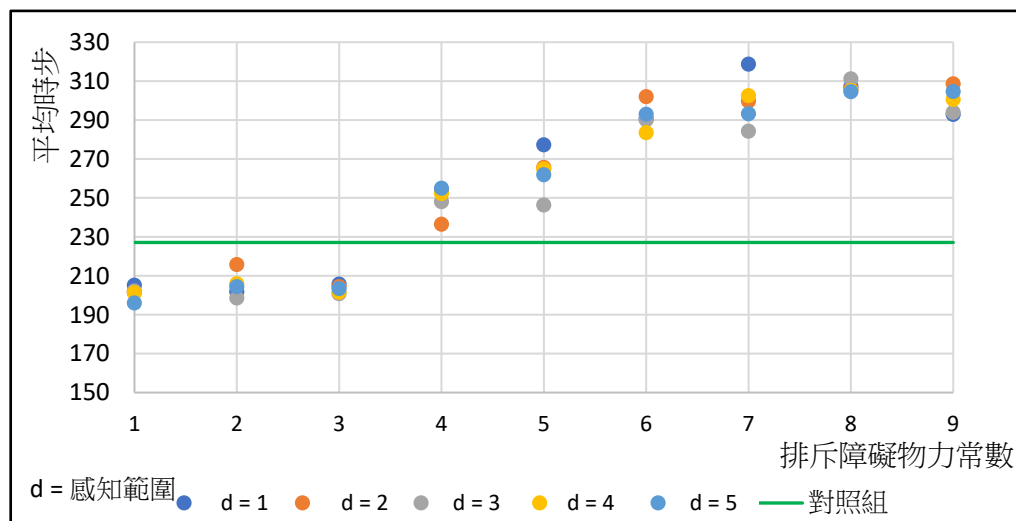


圖 18：爭搶機率 0.1，排斥障礙感知範圍、力常數對平均時步的影響

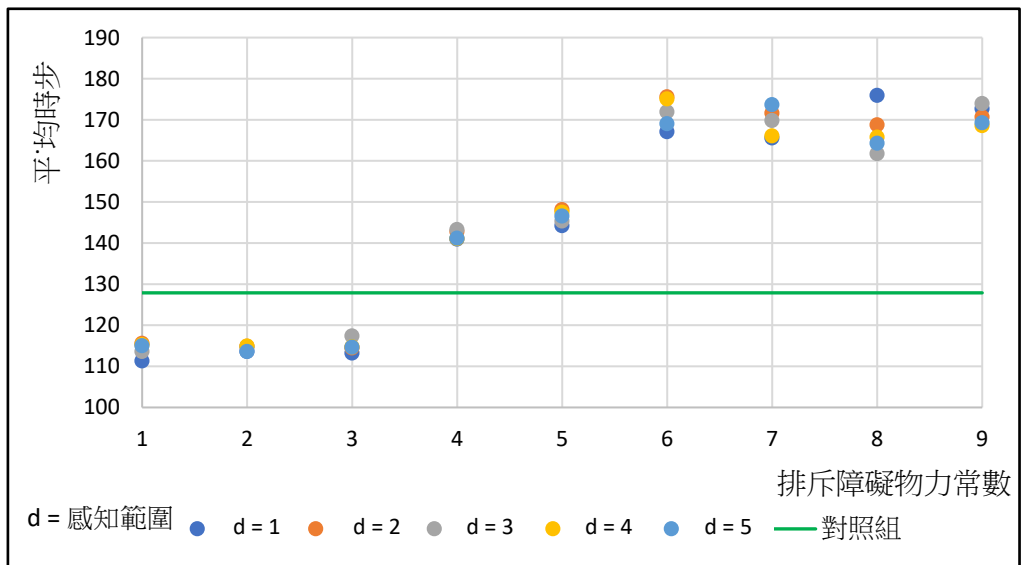


圖 19：爭搶機率 0.5，排斥障礙物感知範圍、力常數對平均時步的影響

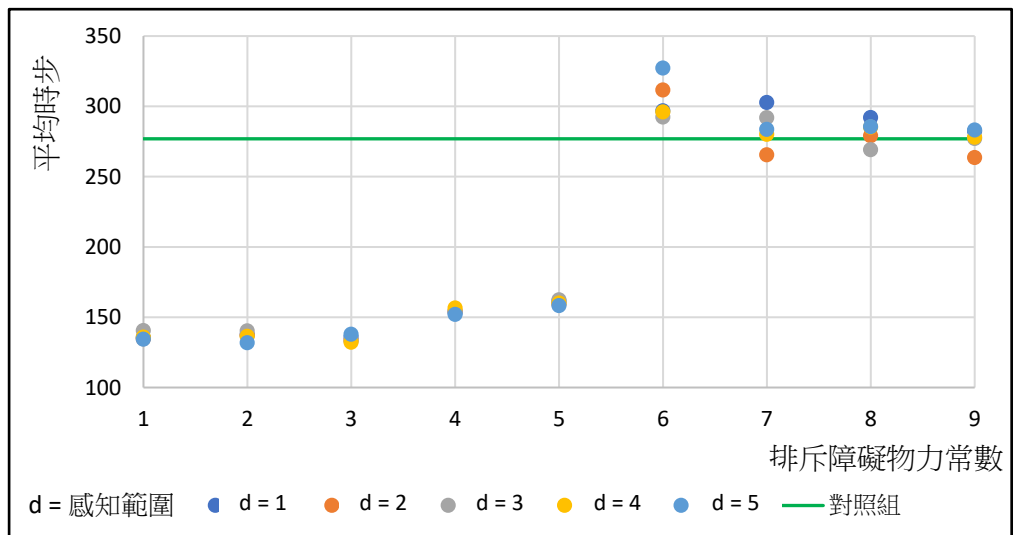


圖 20：爭搶機率 0.9，排斥障礙物感知範圍、力常數對平均時步的影響

## (二) 平均時步與撞障礙物比例的關係

由圖 21 可知平均時步與撞障礙物比例呈現負相關，亦即撞障礙物頻繁並不會導致平均時步上升，反倒表示此障礙物設置有助於人群疏散。另外研究者也發現此圖可大致分為兩大區域：左測表示平均時步小於對照組者，撞障礙物比例高；右測表示平均時步大於對照組者，其撞障礙物比例低是因為排斥障礙物力常數大導致。

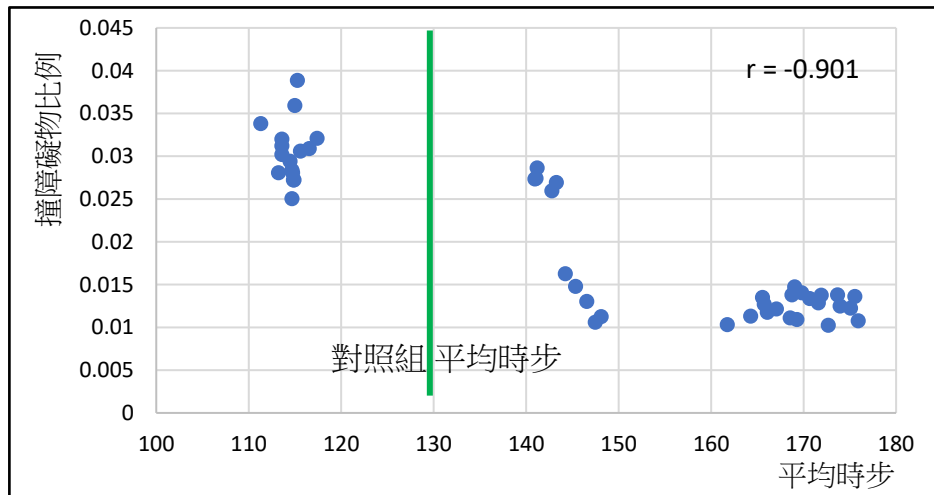


圖 21：爭搶機率 0.5，平均時步與撞障礙物比例的關係

## 八、少數不合群者

此實驗控制變因為：無鑽空與混亂模型、各式力量常數與感知範圍（感知時步）依照不同力量之交互作用平均時步最小者參數設定：自驅動力常數 = 10、排斥人群力常數 = 5、排斥牆壁力常數 = 0、足跡力常數 = 1、足跡力感知時步 = 2、人數 72 人。

### (一) 少數鑽空者

「鑽空模型對疏散效率的影響」結果顯示鑽空對疏散效率有負面影響。而由圖 22 與圖 23 可知：鑽空人數與整體平均時步、鑽空者平均時步變化率呈正相關。另外鑽空人數比例  $< 0.2$ ，其平均時步變化率為負，表鑽空可使其更早抵達出口。

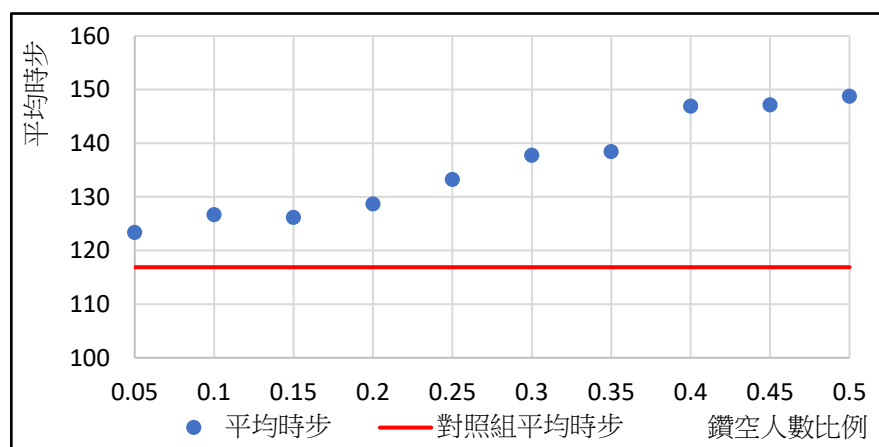


圖 22：鑽空人數比例與整體平均時步關係圖

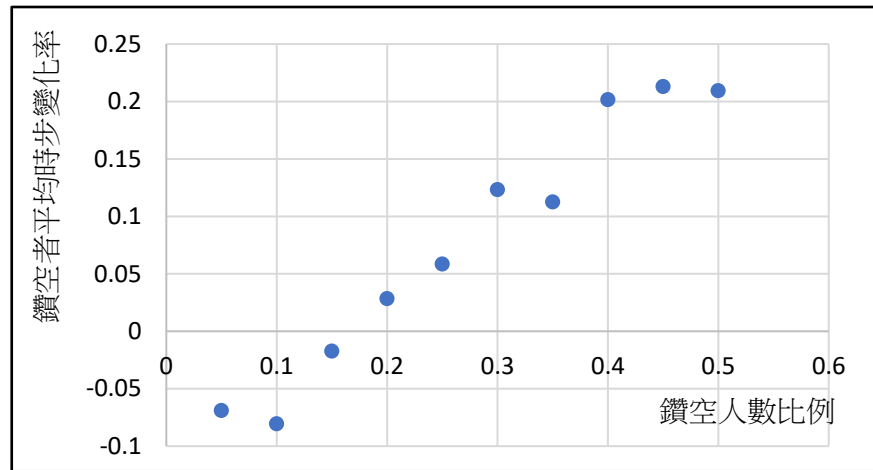


圖 23：鑽空人數比例與鑽空者平均時步變化率關係圖

## (二) 少數排斥人群力過小者

「不同力量交互作用」結果顯示：當爭搶機率 = 0.5 時，排斥人群力常數大有助於疏散。而由圖 24 與圖 25 可知：少數者比例與整體平均時步關係不顯著；與少數者平均時步變化率呈正相關，且不論少數者比例為何，少數者平均時步皆顯著地較對照組低。另外由圖 26 可發現：繞路比例變化率與少數者比例呈正相關。故推測：

1. 少數者自身平均時步隨著少數者人數上升而增加，可能是繞路情形增加所致。
2. 所有少數者比例對應的繞路比例變化率皆為正，但其平均時步變化率卻為負，表平均時步較對照組下降非由繞路情形低導致，推測是由停留原位情形低造成。

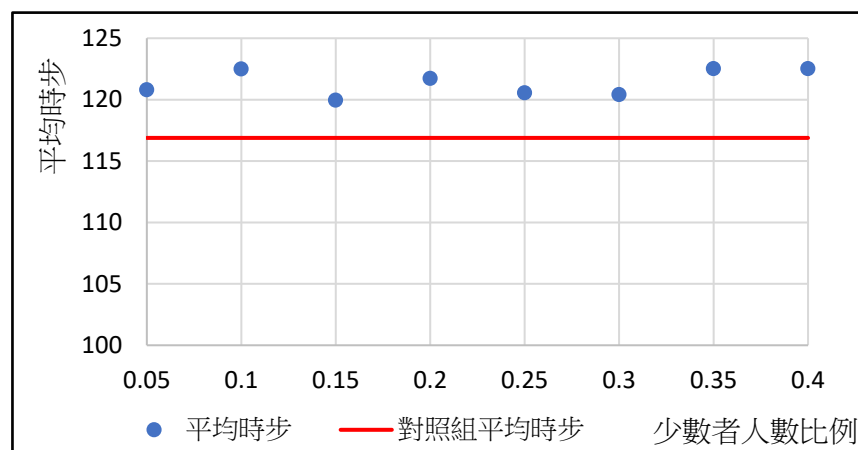


圖 24：排斥人群力過小者比例與整體平均時步關係圖

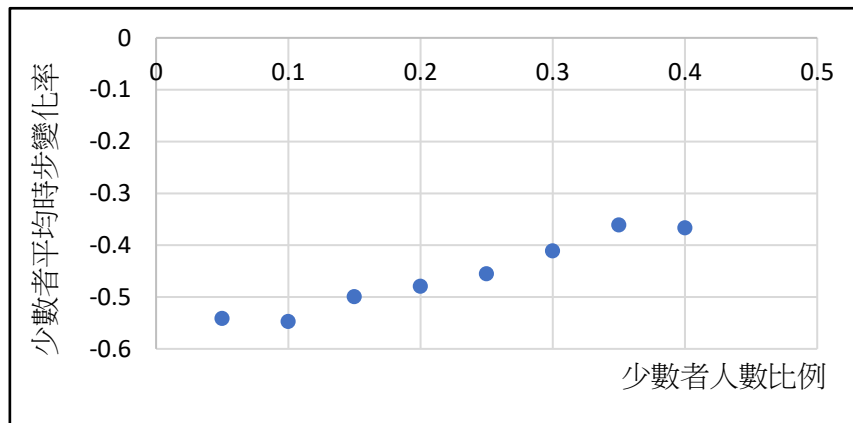


圖 25：排斥人群力過小者比例與其平均時步變化率關係圖

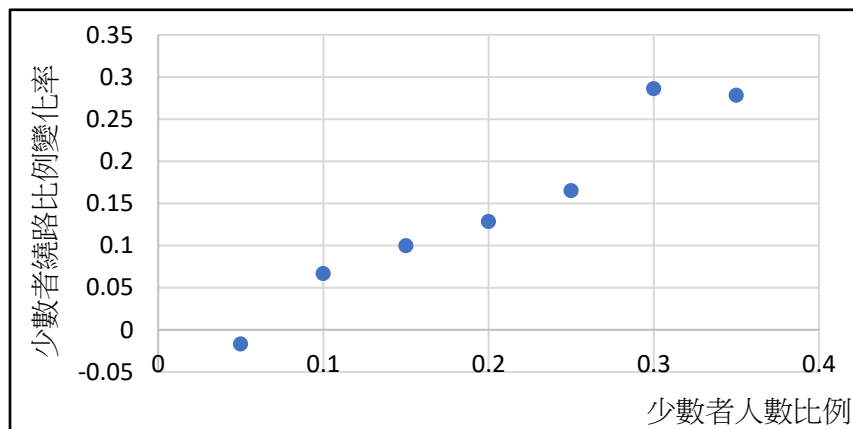


圖 26：排斥人群力過小者比例與其繞路比例變化率關係圖

### (三) 少數足跡力感知時步過大者

「不同力量交互作用」的結果顯示：當爭搶機率 = 0.5 時，足跡力感知時步小有助於疏散。而由圖 27 與圖 28 可知：少數者人數與整體平均時步、少數者平均時步變化率皆呈正相關，且不論少數者比例，少數者平均時步皆較對照組高。

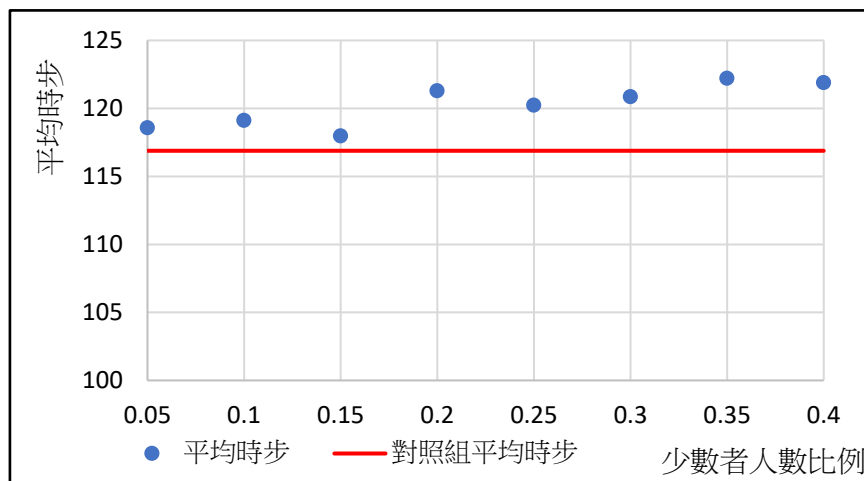


圖 27：足跡力感知時步過大者比例與整體平均時步關係圖

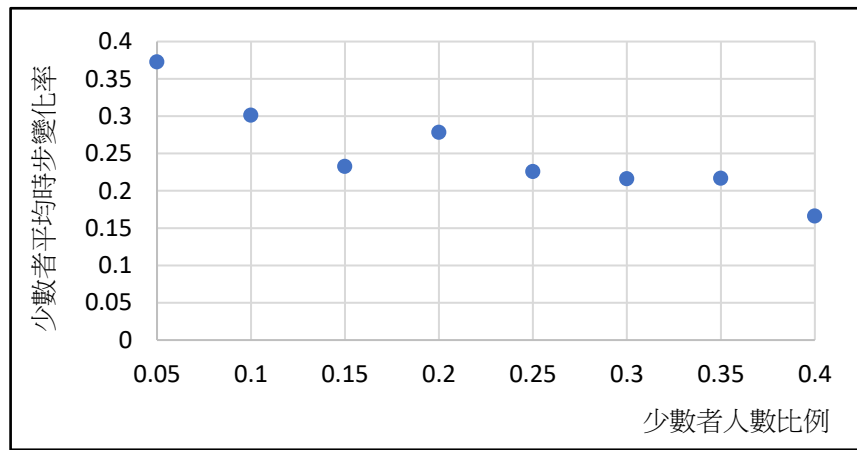


圖 28：足跡力感知時步過大者比例其平均時步變化率關係圖

#### (四) 少數混亂模型者

由圖 29 可知：若疏散過程中有少數驚慌失措者胡亂移動，由於其將阻擋多數者移動至出口，導致整體流通率將下降。

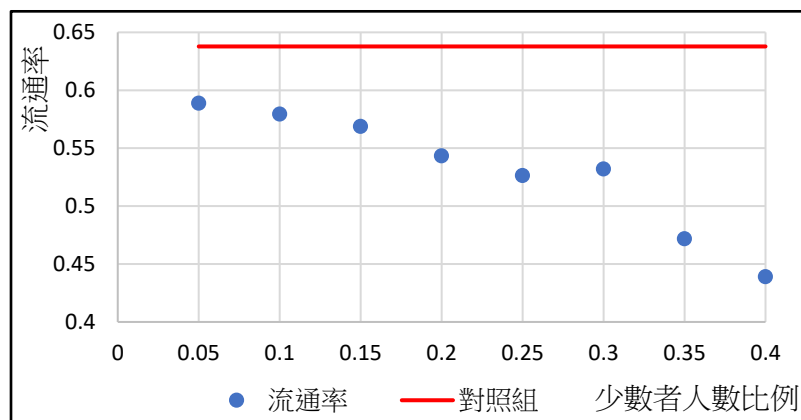


圖 29：少數混亂模型者比例與整體流通率關係圖

#### (五) 少數爭搶機率過低者

「爭搶機率對疏散效率的影響」結果顯示：爭搶機率 0.5 時疏散效率最佳。由圖 30 可知：爭搶機率過低者比例與整體平均時步呈正相關。而由圖 31 可知：少數爭搶機率過低者無益於自身疏散效率。另外，多數者（爭搶機率 0.5）的平均時步變化率為正，表示少數者拖累大眾的疏散效率，且少數者比例愈高，此情形愈嚴重。

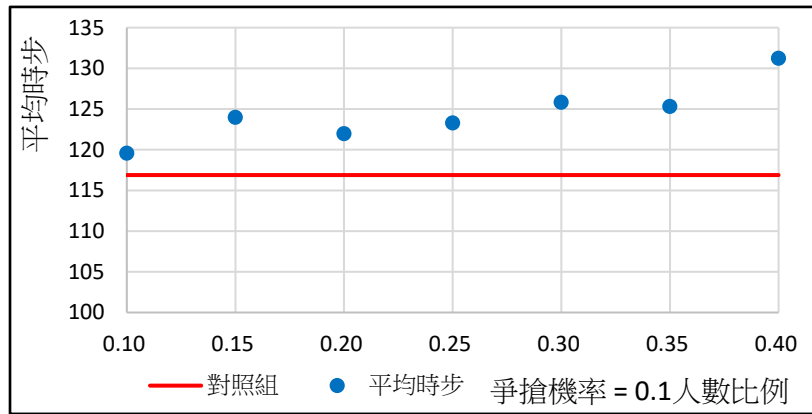


圖 30：少數爭搶機率過低者比例與整體平均時步關係圖

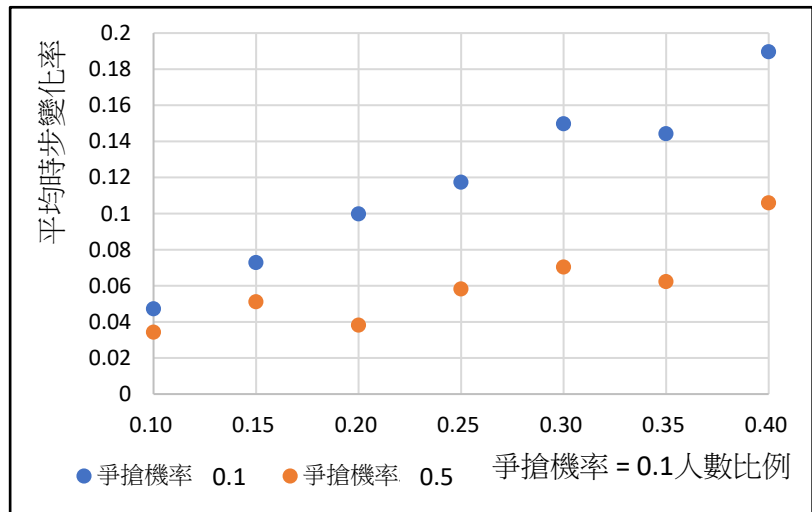


圖 31：少數者比例與不同爭搶機率者的時步變化率關係圖

#### (六) 少數爭搶機率過高者

由圖 32 與圖 33 可知：爭搶機率過低者比例與整體平均時步、不同爭搶機率下的平均時步變化率皆呈正相關，分別高於對照組與低於多數者，且少數者比例  $< 0.25$  時，平均時步變化率為負，表比其爭搶機率 0.5 時更快抵達出口。

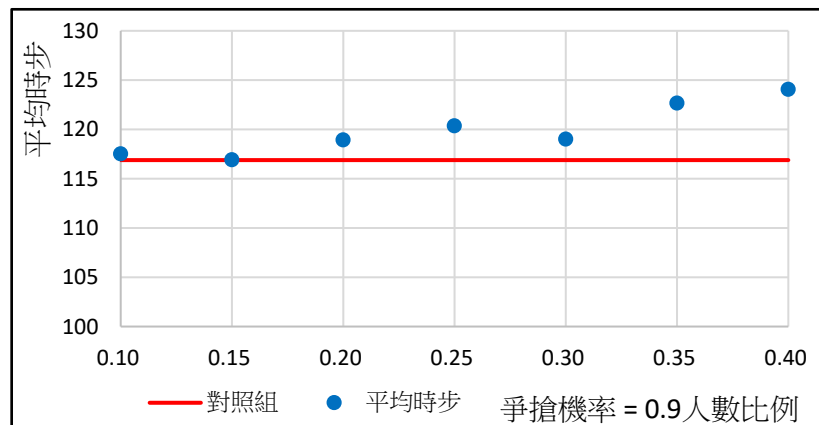


圖 32：少數爭搶機率過高者比例與整體平均時步關係圖



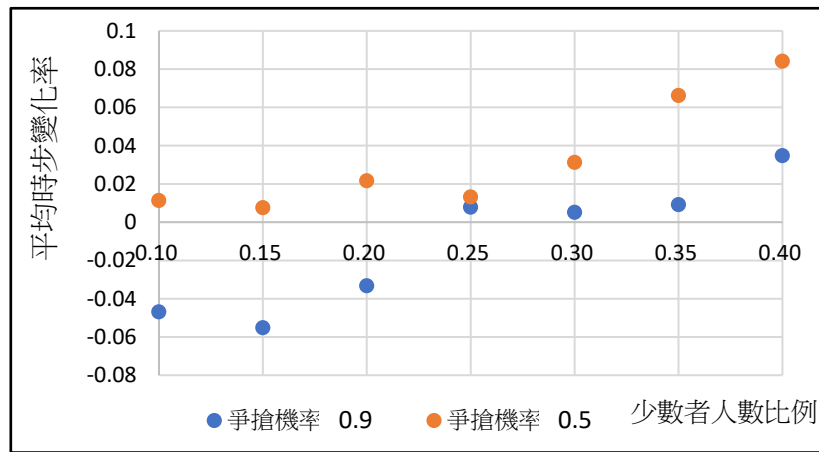


圖 33：少數者比例與不同爭搶機率者的時步變化率關係圖

## 九、出口位置與個數對疏散效率的影響

本實驗除人數更改為操縱變因外，控制變因同少數不合群者實驗。

### (一) 邊上出口

由圖 34 可知：邊上出口個數雖與平均時步呈現負相關，但邊際效益遞減。另外，由於流通率變異係數小，因此人數多寡影響疏散效率的程度有限。

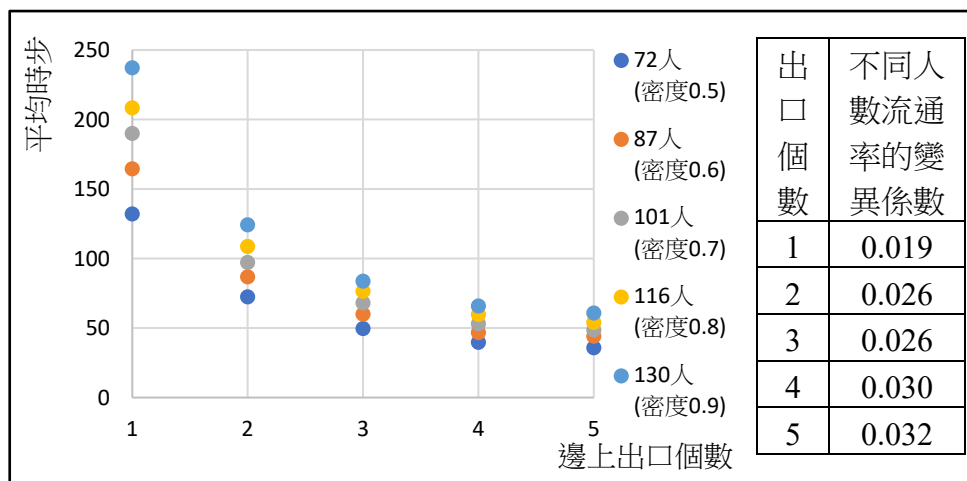


圖 34：邊上出口個數、人數與平均時步關係圖

### (二) 角落出口與邊上出口比較

由圖 35 可知：無論出口個數，角落出口疏散效率皆優於邊上出口，且角落出口個數同樣未和疏散效率成正比。

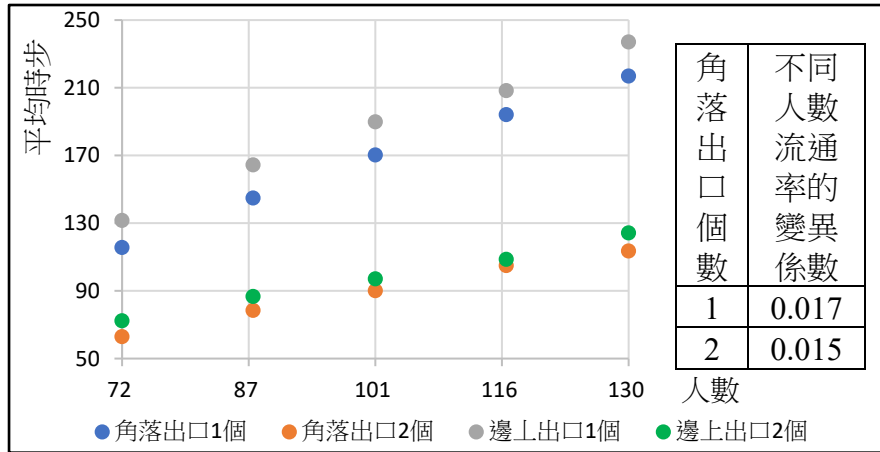


圖 35：角落與邊上出口所需平均時步比較

## 十、疏散場域外廣場

本實驗控制變因同少數不合群者，同時視「出口位置與個數對疏散效率的影響」實驗結果為對照組。

### (一) 邊上出口個數與廣場大小對疏散效率的影響

本實驗將疲勞模式人數比例設為 100%，且最大行走步數為 10，以便觀察廣場大小對疏散效率之影響。由圖 36，可得知以下結論：

1. 無論廣場大小與出口形式，所有實驗數據皆高於對照組，且出口個數少時更明顯。
2. 出口個數與疏散效率關係與無廣場實驗趨勢相似，皆呈邊際效益遞減。
3. 由於不同廣場邊長對應平均時步變異係數小，因此兩者間關係不顯著。

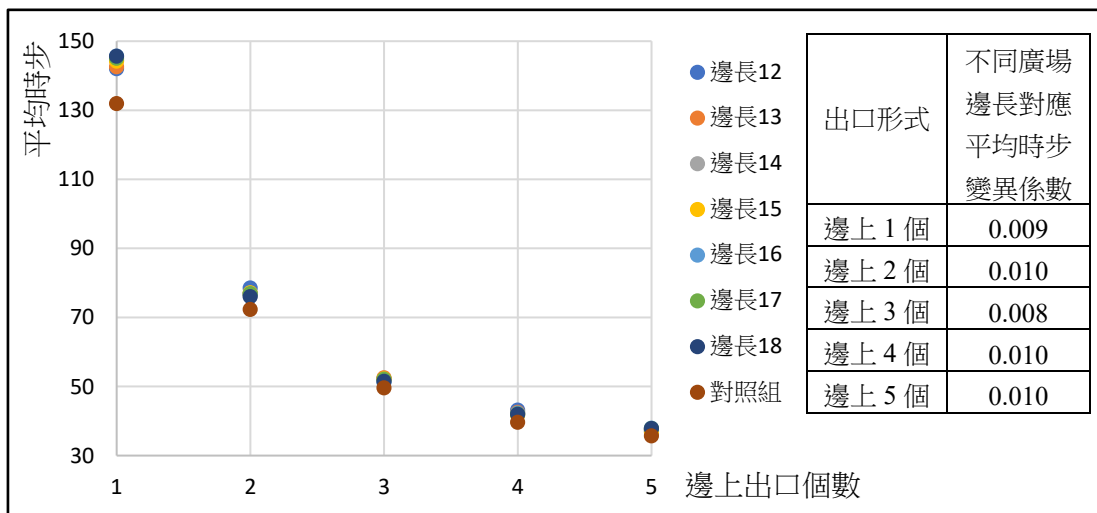


圖 36：廣場邊長、邊上出口個數與平均時步關係圖

(二) 角落出口個數與廣場大小對疏散效率的影響

本實驗將疲勞模式人數比例設為 100%，以便觀察廣場大小對疏散效率之影響。圖

37 統計不同出口形式下，各廣場邊長所需平均時步之平均值，可得知以下結論：

1. 角落出口疏散所需平均時步較無廣場結果高，而低於邊上出口。
2. 由表格可知不同廣場邊長對應平均時步變異係數小，因此兩者間關係不顯著。

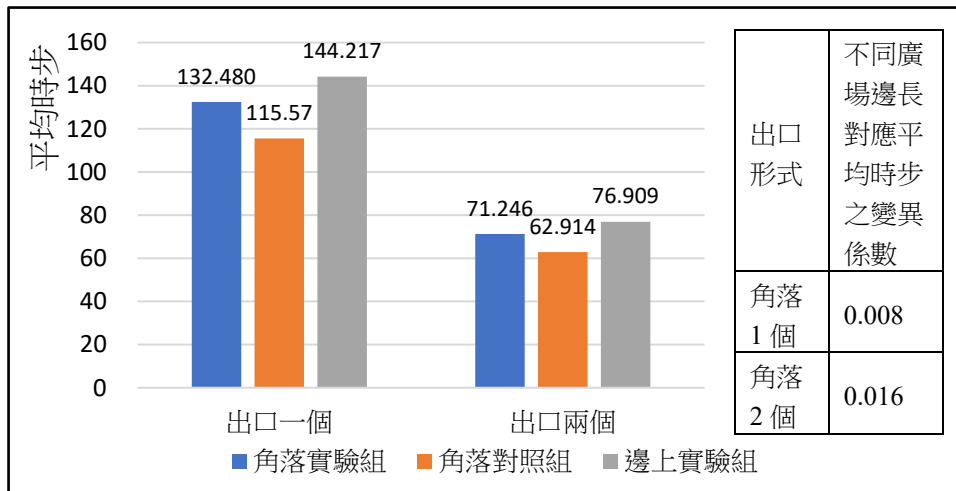


圖 37：邊上與角落出口個數與平均時步關係圖

(三) 廣場中最大移動步數對疏散效率的影響

由圖 38 可知：若出口位於邊上，則廣場最大行走步數與平均時步呈負相關但影響有限，且數值從 12 到 14，平均時步減少量已十分平緩；而廣場最大行走步數 2 與 4 將使人群堵塞於廣場入口附近，因此無法完成疏散。（無法完成疏散定義：所有出口都被同一人連續占據超過 10 個時步，且 35 次實驗中超過 10 次出現這種情形）

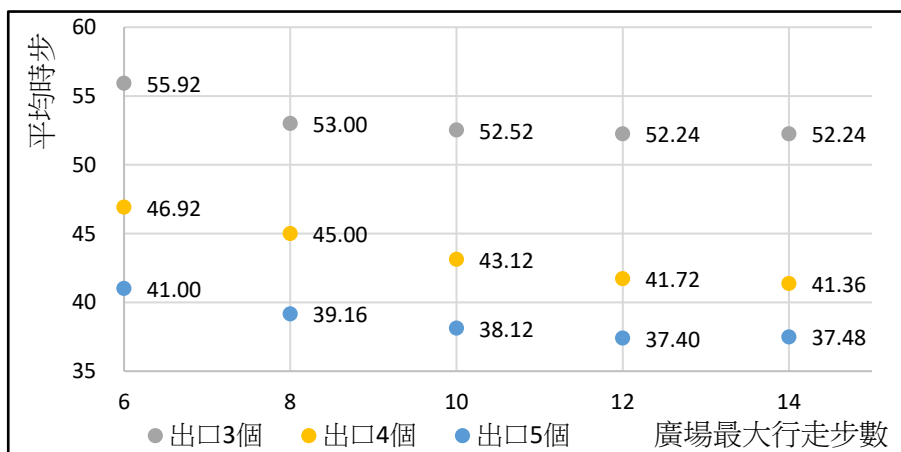


圖 38：廣場最大行走步數與平均時步關係 (邊上出口三至五個)

反之，角落出口由於距離邊界較近，因此欲停留在廣場中的人群，也可能因為排斥人群而被引導至出口，因此廣場最大移動步數小，仍可完成疏散。但廣場最大走步數與所需平均時步關係不顯著（變異係數  $< 0.01$ ）。

#### (四) 脫離廣場外人群對疏散效率的影響

表 5 實驗以廣場邊長 12 單位為例，可發現疏散完畢後即往廣場外，與在廣場中步行 10 步後佇足休息，兩者疏散效率表現相似。

表 5：人群脫離廣場外與疲勞模式比較

移動模式	出口形式					
	角落一個	角落兩個	邊上一個	邊上兩個	邊上三個	邊上四個
往廣場外	131.92	70.16	140.32	74.76	54.68	44.88
疲勞模式 最大行走 步數 = 10	131.64	70.04	140.92	75.52	54.52	44.12

## 伍、討論

- 一、鑽空模型係依照部分人群愛好鑽入人群間空隙而設立，由於眾人都鑽入身邊空隙反倒會增加衝突，因此原先即預期此模型不會有助於疏散。但也可能是因為研究者所定義的規則是：個體先考慮身邊的空隙，才考慮各式力量的計算結果，而加劇了衝突現象的發生。
- 二、無論爭搶機率，排斥牆壁力常數大於 1.6，由於在「排斥牆壁力對疏散效率的影響」實驗中有多次顯示無法完成疏散，故不採計。而經過偵錯程序，研究者發現若出口位置為 (1,1)，房間內剩下一人，且其位置為 (1,2) 或 (2,1)，力量計算結果的最佳走法不是出口，而是座標 (2,1) 或 (1,2)，導致此人陷入這兩個座標無限循環；但只要感知範圍或力常數擴大，房間內最後一人的位置將轉變為為 (4,4)，即有機會能順利抵達出口。
- 三、「出口位置與個數對疏散效率的影響」與「疏散場域外廣場」結果顯示角落出口疏散效率較邊上出口優。觀察出口人流可發現：角落出口人流來源只有三個方向，但邊上出口有五個方向，因此邊上出口較容易發生衝突，進而拖累疏散效率。

- 四、原先認為離開疏散場域後，自主往廣場邊界逃離者的疏散效率表現，會比因疲勞而在廣場中停下休息者優。但實驗結果顯示：往廣場邊界逃離者疏散效率，相當於步行十步後即留在原位者。經程式逐步執行後，研究者以出口形式分類討論結果與猜測不同的原因：
- (一) 角落出口：因角落出口鄰近邊界，因此往廣場外人群不會堵塞入口；而欲佇足休息者也容易在廣場移動最大步數前抵達邊界，而不易造成壅塞。這同時也是廣場移動最大步數極小時，只有角落出口不會發生壅塞，可完成疏散的原因。
  - (二) 邊上出口：邊上出口多時，無論往廣場外抑或在廣場中休息，都會在入口附近發生壅塞；邊上出口少（一或二個）時，若最大移動步數過小將導致無法完成疏散；而只要其值在 6 步以上，前往廣場邊界的人可依序分左右兩側逃離；欲休息者在受排斥人群力下，也可均勻地分散於廣場中央，不會過度集中入口處。
- 五、本實驗疏散場域與廣場簡化為正方形的房間，並模擬不同人群移動規則下的疏散結果。未來可應用在演唱會或體育館人潮眾多時，主辦方（或決策者）下達指令給人群，讓人群依照模擬的最佳移動規則行走，協助觀眾更迅速完成疏散。

## 陸、結論

- 一、如果全體成員採取以下的行為，將有利全體成員疏散：
- (一) 不要一見到四周有空隙，即鑽入其中。
  - (二) 和他人發生衝突時，約半數的時機選擇爭搶。
  - (三) 與他人保持一定距離，不要總是朝著人群推擠。
  - (四) 在維持自身一定的判斷下，跟隨他人足跡行走。
  - (五) 設置障礙物，且人群會與障礙物保持一定距離。
  - (六) 相較於設置在邊上的出口，角落出口效率較佳。

二、如果個體採取以下行為，則有利自身疏散，但不利於全體疏散

- (一) 不斷與他人爭搶。
- (二) 一見到四周有空隙，即鑽入其中。
- (三) 與他人維持較小的距離，會往人群方向推擠。

第 (一) 點與第 (三) 點必須建立在少數個體不超過整體人數  $1/5$  情形下，才會有助於個體疏散效率；第 (二) 點的少數個體密度臨界值則約為  $2/5$ 。

三、若將疏散場域外廣場的人群移動納入考慮，則有以下結論：

- (一) 廣場大小對疏散效率影響有限。
- (二) 出口個數呈邊際效益遞減現象。
- (三) 人群脫離疏散場域後，若步行少於六步便佇足休息，將導致邊上廣場入口堵塞，使疏散場域內人群無法完成疏散；反之，人群應當至少步行 10~15 步後再停下。
- (四) 脫離疏散場域後即往廣場邊界的人群，其疏散效率表現相當於步行 10 步後停下者。

四、未來展望

- (一) 加入親子模型：設定任兩人 (或以上) 之間有不會想分開的親子力，甚至設定子女走失時，父母會先尋找子女，再繼續逃向出口，以模擬真實情況中，親子一起疏散的情形。
- (二) 場景設置優化：本實驗場景設置以正方形房間為基礎，但現實情況的路線與障礙物遠比此複雜。因此，唯有模擬更真實的場景設置，才能更加準確分析疏散情形。
- (三) 路徑分析能力：本實驗只有以自驅動力、足跡力與若干排斥力，模擬人群疏散時的移動規則，在障礙物愈趨複雜下，這些規則可能導致其無法順利抵達出口。現實生活中人們還會依照出口指示或自身經驗判斷路徑，這也是研究者未來的研究目標。
- (四) 交互作用分析：本報告「不同力量之交互作用」段落，只列舉疏散效率較佳的數據，並未逐一分析。未來希望可經由多因子變異數分析等方式，找出這些力量之間如何相互影響。

## 柒、參考文獻資料

- 一、Dirk Helbing and P'eter Moln'ar (1998). *Social force model for pedestrian dynamics*. II. Institute of Theoretical Physics, University of Stuttgart, 70550 Stuttgart, Germany.
- 二、謝積鑒，薛郁 (2012) • 通過博弈的室內行人疏散動力學研究 • 廣西大學物理科學與工程技術學院。
- 三、陳亮、郭仁擁、塔娜 (2012) • 雙出口房間內疏散行人流的仿真和實驗研究 • 內蒙古大學計算機學院。
- 四、陳昭蓉(譯) (2008) • 壅塞學 (原作者：西成活裕) • 究竟出版社股份有限公司。

## 【評語】 052510

此作品對於疏散情況進行不同行為之模擬，並進行詳細討論，並歸納出疏散時的方針。此研究動機實際且具實用價值，其中許多設定皆參考相關文獻設計模擬情境，雖為模擬效果，也具實務參考價值。

此研究考慮許多變因，其中包含許多新發想的變因，透過相關的模擬流程，進行完整之討論，實驗模擬非常詳細，實驗的結果也足夠深入，具科學探究精神，以及跨領域實務上之參考性。進議與一些相關的方法進行詳細之差異化比較，以彰顯此研究的獨特性與其價值。



## 作品簡報

人人人 人人人人門  
以程式模擬人群疏散

高中組

電腦與資訊學科

# 前言

## 文獻探討

- 細胞自動機
- 社會力模型
- 博弈論
- 追隨他人足跡
- 初步檢驗模型

## 研究目的

- 探討以下人群移動模式或場景設置對疏散效率的影響：
- 人群爭搶趨勢與鑽空
  - 各式排斥力與吸引力
  - 少數不合群者
  - 出口個數與位置設計
  - 疏散場域外廣場設計

# 研究過程

## 判斷走法

- 混亂：模擬驚慌失措胡亂移動。
- 鑽空：模擬挑選人群空隙鑽入。
- 排斥：牆壁、人群、障礙物。
- 足跡：追隨成功通過者腳步。

## 衝突處理

- 所有人依爭搶機率決定爭搶或退讓。

	B	爭搶	退讓
A			
爭搶		雙方延遲兩時步	A直接進入 B延遲一時步
退讓		B直接進入 A延遲一時步	雙方延遲一時步

# 研究過程

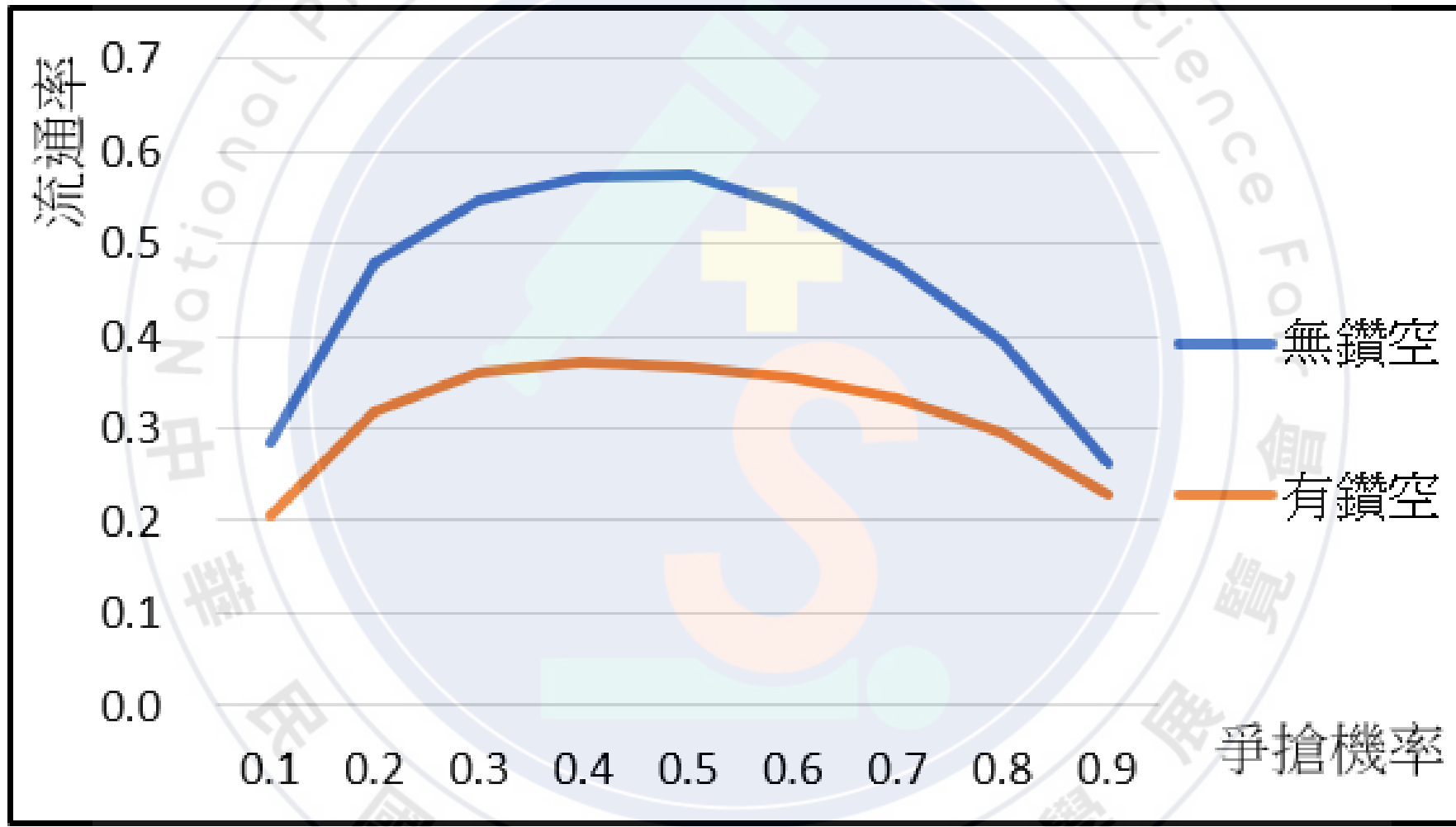
## 少數者 研究

- 對照組：所有人群移動模式皆相同。
- 實驗組：特定比例人群與大眾模式不同。
- 變化率：
$$\frac{(\text{實驗組} - \text{對照組})}{\text{對照組}}$$

## 最佳 走法

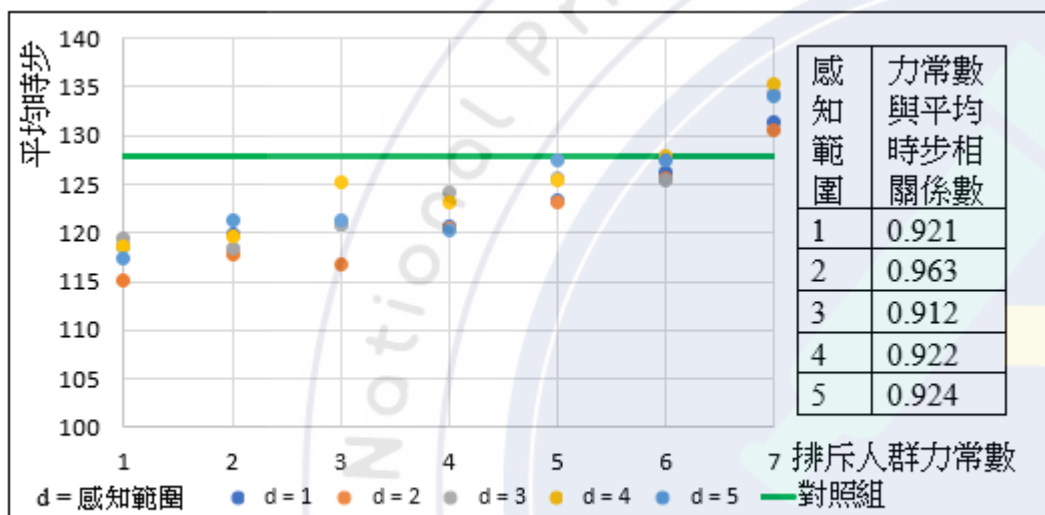
- 疲勞模式：廣場行走一定步數後停留。
- 往廣場外：進入廣場後即往邊界方向。
- 原則上只開設排斥人群力。
- 例外：堵住廣場入口，使其儘量前進。

# 研究結果-鑽空與爭搶

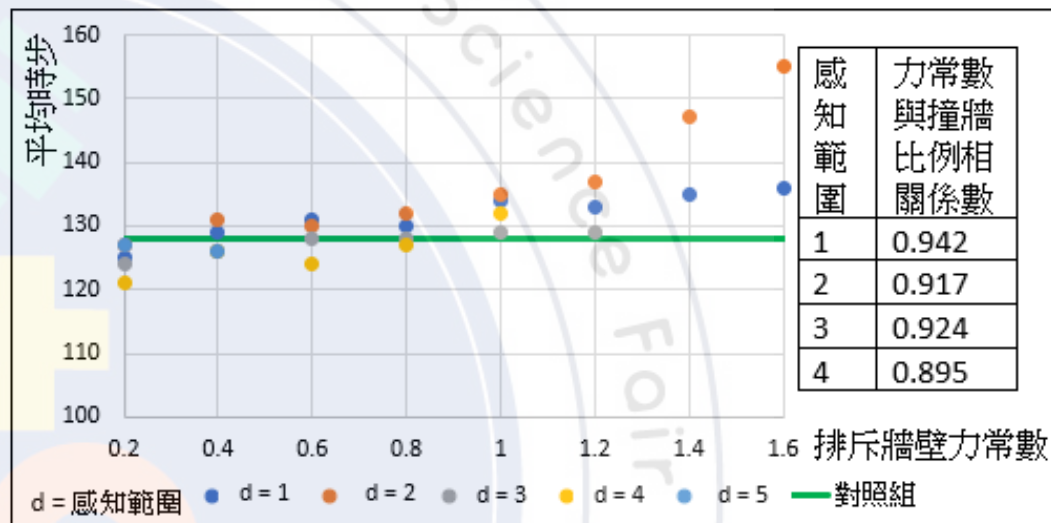


鑽空與否對流通率的影響

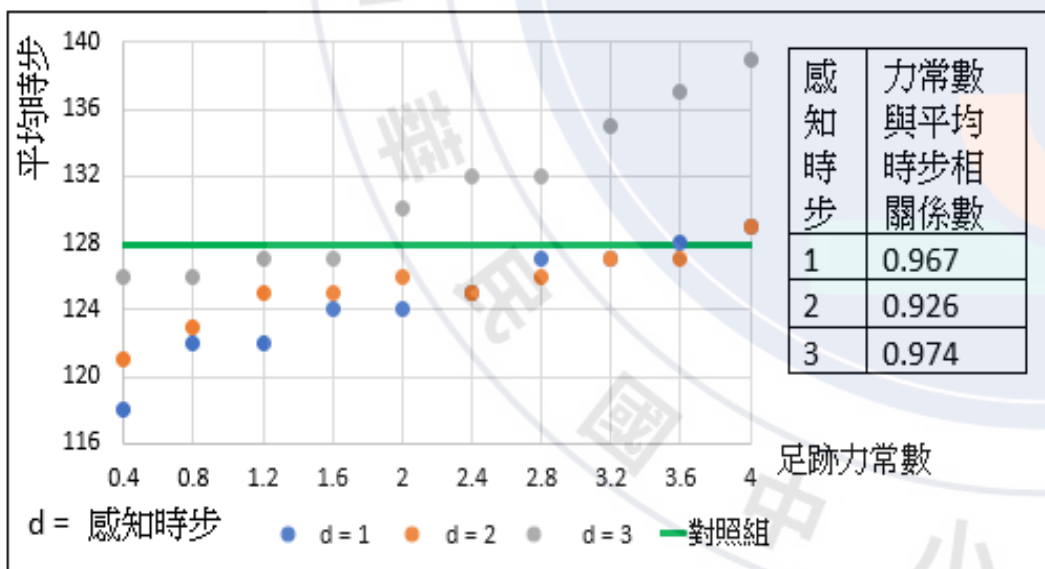
# 研究結果-力量



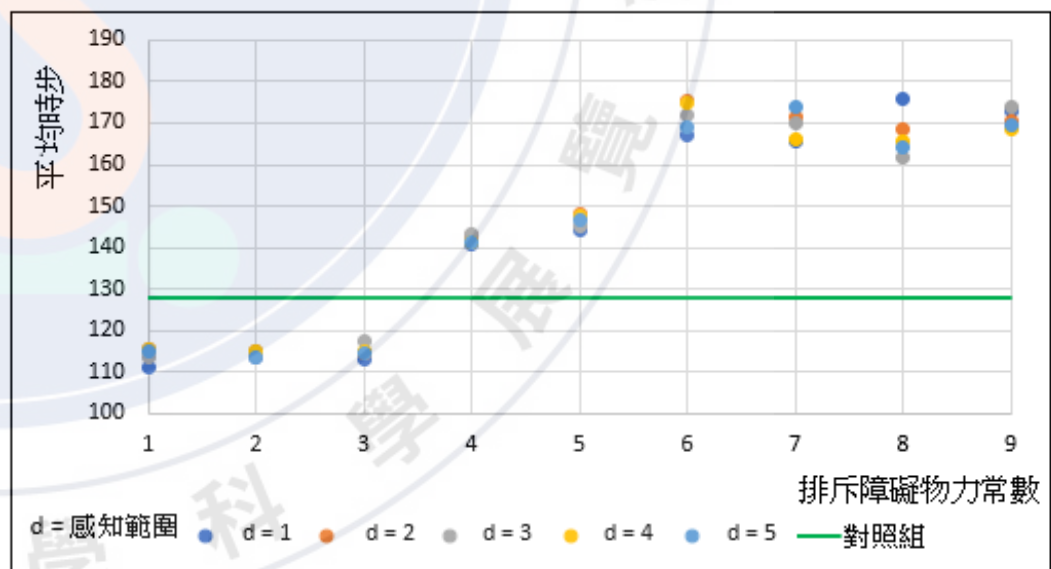
排斥人群力感知範圍與力常數對平均時步的影響



排斥牆壁力感知範圍與力常數對平均時步的影響

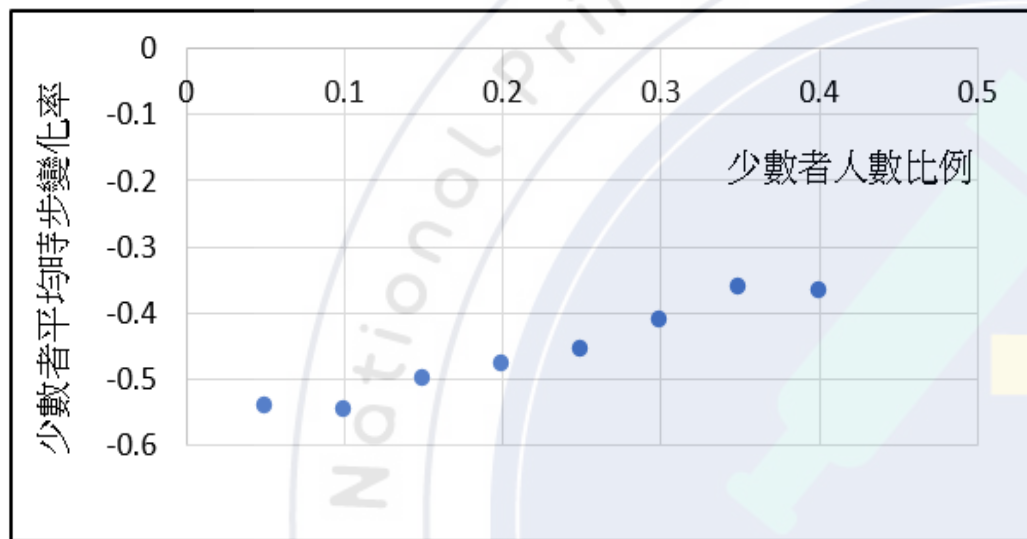


足跡力感知時步與力常數對平均時步的影響(2)

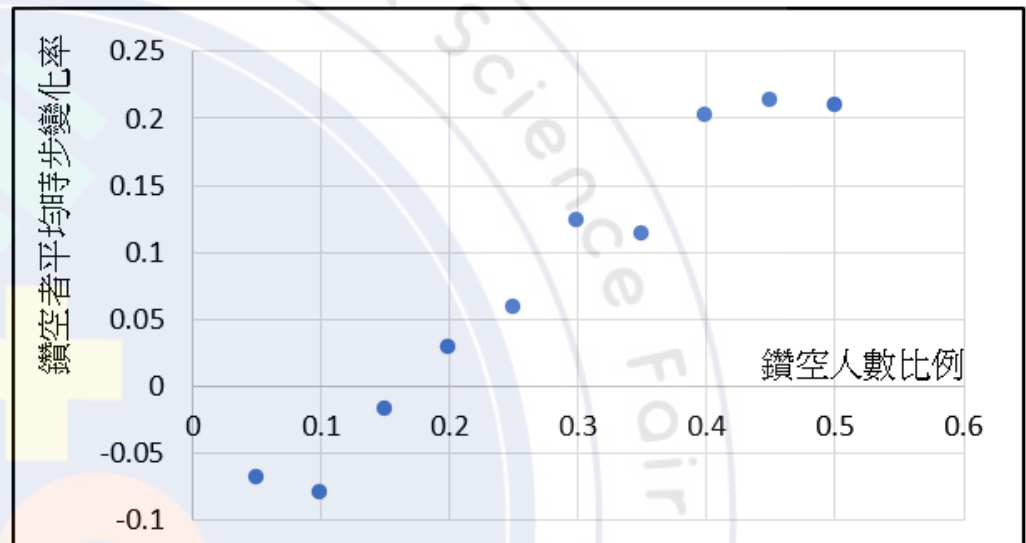


爭搶機率 0.5，排斥障礙物感知範圍、力常數對平均時步的影響

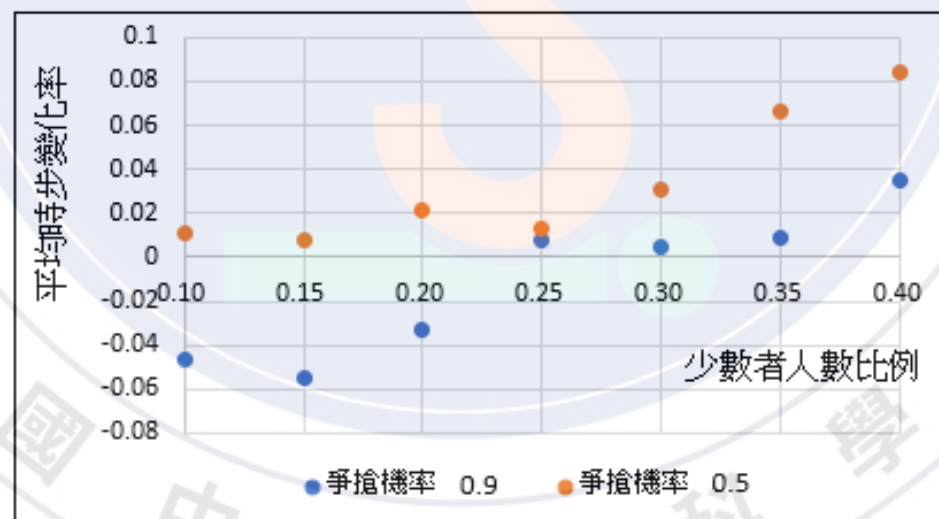
# 研究結果-少數者



排斥人群力過小者比例與其平均時步變化率關係圖



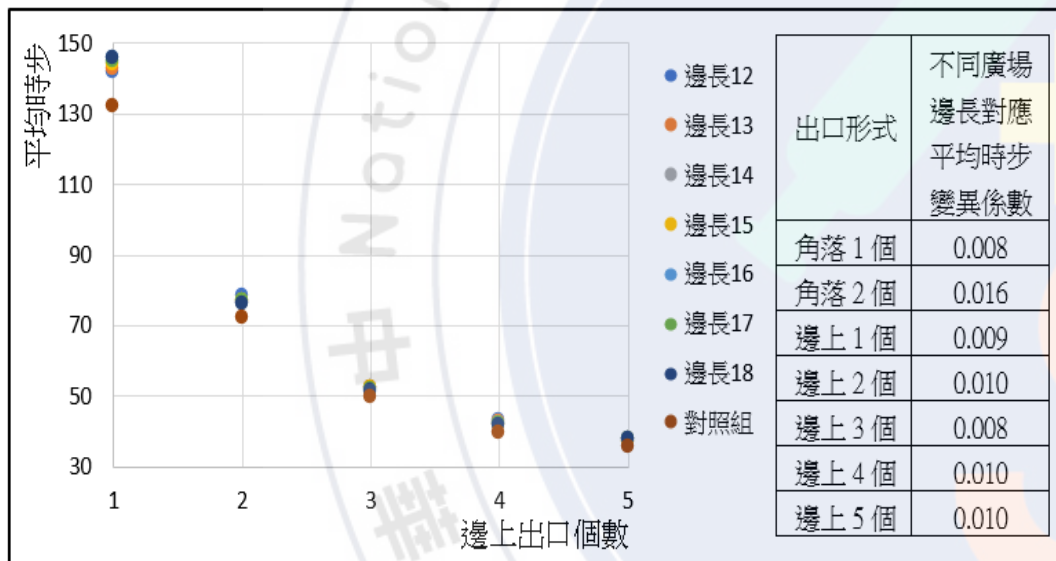
鑽空人數比例與鑽空者平均時步變化率關係圖



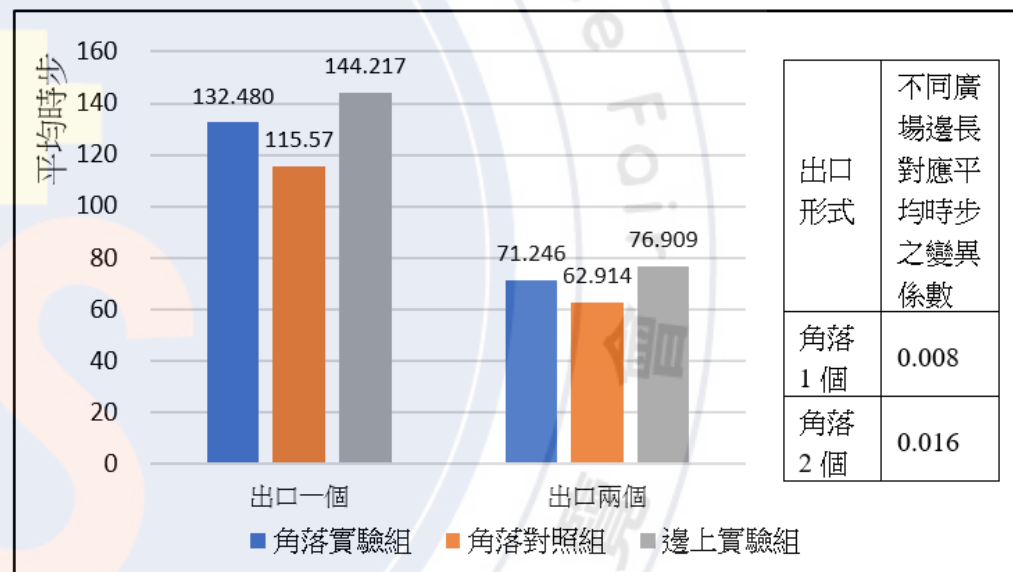
少數者比例與不同爭搶機率者的時步變化率關係圖



# 研究結果-廣場



廣場邊長、邊上出口個數與平均時步關係圖



邊上與角落出口個數與平均時步關係圖

# 討論

➤ 原先認為往廣場外的人群較佇足廣場者有利疏散，但兩者結果相似。

1. 角落出口：佇足廣場者也可能因排斥人群力而被推向邊界。
2. 邊上出口個數少：扣除廣場入口長時間被堵住無法完成疏散的情形，人群即使佇足廣場，依舊可因排斥人群力而均勻分散。
3. 邊上出口個數多：廣場入口附近都必定壅塞。

綜觀上述，往廣場外人群疏散效率與佇足廣場者差異不大。

# 結論

	有利整體	有利個體		
爭搶	衝突時半數爭搶 ➤ 較爭搶機率 0.1 所需時步少 44% ➤ 較爭搶機率 0.9 所需時步少 52%	爭搶，但人數不超過整體 20%		
		少數者比例	15%	40%
		與整體所需時步差距	多 1%	多 9%
		與個體對照組時步差距	少 5%	多 3%
鑽空	不鑽空 ➤ 較全數的人鑽空 所需時步少 37%	鑽空，但人數不超過整體 20%		
		少數者比例	15%	40%
		與整體所需時步差距	多 9%	多 20%
		個體與對照組差距	少 8%	多 11%

# 應用與未來展望

## 應用：

- 活動主辦方：

依有利疏散的方針引導人流

- 營建方

在出口個數與效率間取得平衡

## 未來展望：

- 模型優化

- 交互作用

- 路徑分析

- 場景設置

# 參考資料

- Dirk Helbing and P´eter Moln´ar(1998). *Social force model for pedestrian dynamics*. II. Institute of Theoretical Physics, University of Stuttgart, 70550 Stuttgart, Germany.
- 謝積鑒，薛郁 (2012)·通過博弈的室內行人疏散動力學研究·廣西大學物理科學與工程技術學院。
- 陳亮、郭仁擁、塔娜 (2012)·雙出口房間內疏散行人流的仿真和實驗研究·內蒙古大學計算機學院。
- 陳昭蓉 (譯) (2008)·壅塞學(原作者：西成活裕)·究竟出版社股份有限公司。