

摘要

本研究透過時間複雜度與 SAD 演算法探討了不同參數設定與影像環境對數位鏡面效果的影響，並分析其最優配置方式。在參數設定方面，執行時間與線條長度呈正相關，與解析度呈負指數相關；穩定狀態所需時間則與解析度正相關，與線條寬度和長度負相關。在穩定性分析中，線條寬度與長度的低值情況較不穩定，高值則趨於收斂，而解析度對穩定性影響較小但可能增加離群值。在影像環境分析中，環境複雜度越高，數位鏡面與現實差異越大，而顏色數量影響不顯著。額外實驗顯示，顏色差異越大，與現實差異越明顯。

最後，針對不同需求提出建議：降低線條長度與寬度、提升解析度可減慢反應並增加變化；增長線條長度與寬度、降低解析度則可加快反應速度；降低解析度有助於更貼近現實，而縮短線條與減小寬度則能增加隨機性。

壹、前言

一、研究動機

在高一時，我完成了一個名為「數位鏡面」的專案，靈感源自丹尼爾·羅森 (2017) 在桃園機場捷運的一系列藝術品。這些作品利用鏡頭捕捉現實畫面，經過電腦計算後，以獨特的方式呈現影像。其中，有一幅作品以線條形式重構畫面，宛如一面極具創意的鏡子（如圖 1），而我的專案正是以此為藍本進行模仿與實現。



圖 1: 丹尼爾 · 羅森的數位鏡面

在實作過程中，我發現許多參數會影響數位鏡面的效果，例如線條的長度與寬度等表層設定，或是每次刷新時繪製的線條數量等底層設定。此外，環境因素的變化也會影響數位鏡面的呈現效果。這些觀察激發了我的好奇心，使我想深入研究各種參數對數位鏡面效果的影響，進一步探索它背後的運作機制。

二、研究目的

- (一) 了解不同參數設定對於數位鏡面的影響
- (二) 了解不同影像環境對於數位鏡面的影響
- (三) 探討不同環境與需求下數位鏡面的最優設定

三、文獻探討

(一) 數位鏡面

數位鏡面最初是丹尼爾·羅森 (2017) 在機場捷運展示的一系列藝術作品。這些作品透過鏡頭捕捉現實世界的影像，並經由電腦計算處理後，以特殊的方式呈現在螢幕上。影像如圖 2 所示，經過數位化處理後，現實畫面顯得模糊且朦朧，營造出獨特的視覺效果。該系列中的每件作品皆展現了不同的風格與表現形式。本次實驗將聚焦於其中一種以類似線條形式呈現的數位鏡面作品，進行深入探討。

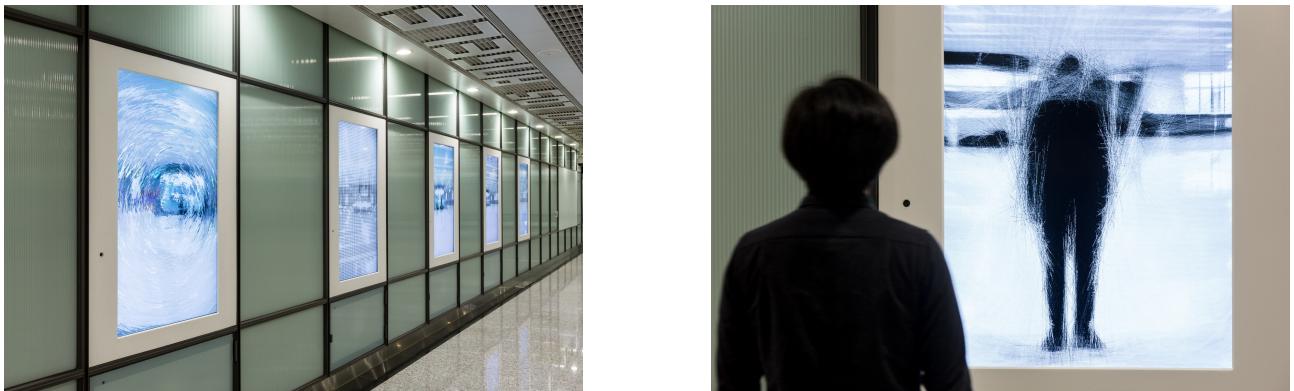


圖 2: 丹尼爾 · 羅森的數位鏡面

本次研究使用的是 happycorn (2024) 在 GitHub 上提供的數位鏡面模仿作品。程式中展示了以線條為主要呈現方式的數 33 位鏡面，其每一幀的繪製過程包括：讀取影像、繪製多條線條，以及刷新畫面。繪製線條的過程則可細分為以下步驟：模擬一條虛擬線、計算該線條路徑上所有像素點的平均值、以及根據計算結果繪製線條。更詳細的流程如圖 3 所示。

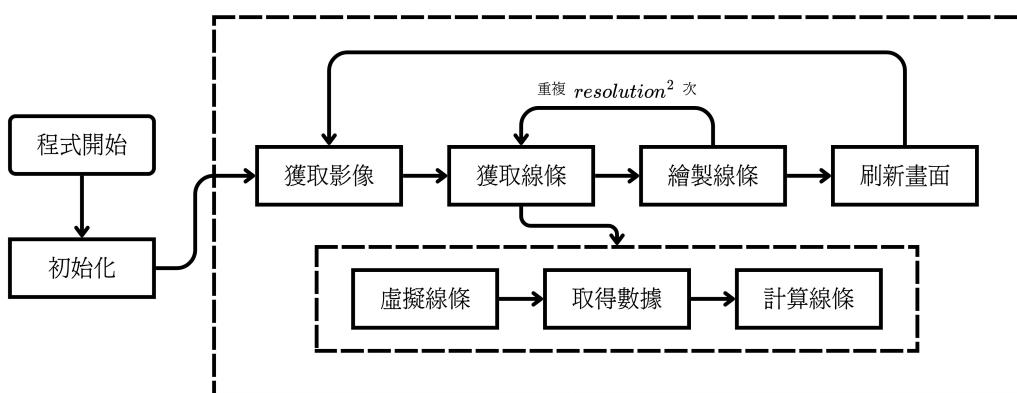


圖 3: 數位鏡面流程圖

在整面數位鏡面中，可調整的參數有三項：線條寬度 (width)、線條長度 (length) 與解析度 (resolution)。線條寬度與長度分別表示數位鏡面在繪製時的線條寬度與長度；而解析度則是與繪製過程中的區域劃分相關。為了同時達成「繪製多條線」與「分散線條位置」的效果，作者透過 for 迴圈將整個鏡面切分為多個小方格，並在每個方格內繪製一條線，解析度即代表這些方格的寬度。

(二) 時間複雜度

為了比較程式的計算速度，本研究引用了《Introduction to Algorithms》(Cormen et al., 2001) 中關於執行時間 (running time) 的計算觀念。該觀念首先假設，在程式中第 i 步的執行時間為常數 c_i 。接著，針對輸入大小 n ，寫出相應的操作步數。例如，若要透過 for 迴圈從長度為 n 的陣列中找出最大值，則需要執行 $n \cdot c_i$ 次操作。

然而，直接這樣表示可能顯得過於繁瑣，因此可以進一步簡化為「增長的量級」。具體而言，只需保留最高次項，並忽略其係數，因為在輸入規模增長後，係數對總體增長的影響微乎其微。這樣的計算方式被翻譯成中文時，通常被稱為該演算法的「時間複雜度」。

(三) Sum of absolute difference

在本次實驗中，我需要計算圖片的相似度，為此將採用《Intelligent Image and Video Compression》(Bull and Zhang, 2021) 中提出的 Sum of Absolute Difference (SAD) 演算法。該演算法針對兩張圖片 s_1 和 s_2 ，計算它們之間的差異。

假設圖片 s_1 和 s_2 的尺寸為寬 X 和高 Y ，則 SAD 的計算方式如下：

$$SAD = \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} |s_1[x, y] - s_2[x, y]|$$

其中， $s_1[x, y]$ 和 $s_2[x, y]$ 分別表示兩張圖片在座標 (x, y) 的像素值。若圖片為彩色，則需引入額外的色彩通道維度，分別計算每個通道的差異，並累加為最終結果。

貳、研究設備及器材

表 1: 研究設備與器材

| 類別 | 項目 | 型號或版本 |
|----|------------------|--------------|
| 硬體 | 電腦乙台 | ASUS M3401QC |
| 軟體 | Python | 3.12.7 |
| | Anaconda | 24.11.0 |
| | Jupyter Notebook | 7.2.2 |
| | OpenCV | 4.10.0 |
| | NumPy | 2.1.3 |
| | Matplotlib | 3.9.2 |

參、研究過程與方法

一、研究架構圖

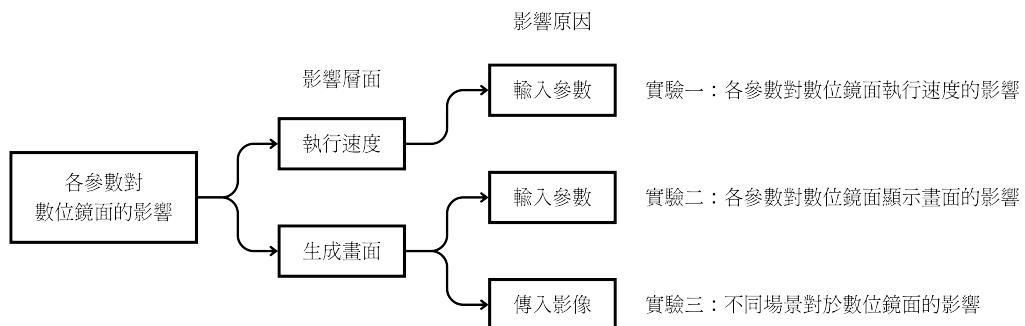


圖 4: 研究架構圖

二、實驗一：各參數對數位鏡面執行速度的影響

為了分析數位鏡面程式的執行速度及其影響因素，本實驗記錄程式的執行時間，並探討可調整參數（線條寬度、線條長度及解析度）對每幀渲染時間與單條線條繪製時間的影響。實驗設計如表 2 所示。

表 2: 執行速度與參數關係的實驗設計

| 操縱變因 | 應變變因 | 控制變因 |
|--------------------|------------|----------------|
| 1 線條寬度 (width) | 繪製一條線所需的時間 | 線條長度、解析度等其他參數 |
| 2 線條長度 (length) | 繪製一條線所需的時間 | 線條寬度、解析度等其他參數 |
| 3 線條寬度 (width) | 繪製每幀所需的時間 | 線條長度、解析度等其他參數 |
| 4 線條長度 (length) | 繪製每幀所需的時間 | 線條寬度、解析度等其他參數 |
| 5 解析度 (resolution) | 繪製每幀所需的時間 | 線條寬度、線條長度等其他參數 |

在實驗設計中，每組實驗將重複執行 100 次，並計算所得結果的平均值以作為最終數據。非操縱變因的參數均固定為預設初始值，其中線條寬度 (width) 設定為 5，線條長度 (length) 設定為 100，解析度 (resolution) 設定為 100。

三、實驗二：各參數對數位鏡面顯示畫面的影響

數位鏡面在繪製過程中，當畫面發生變化時，所呈現的內容會逐漸接近現實場景，直至達到一定相似程度後停止變化。這一階段被稱為穩定狀態。本實驗主要觀察兩項指標：一是數位鏡面進入穩定狀態後與現實的差異，二是畫面變動後達到穩定狀態所需的时间。

在實驗中，我將數值分別設定為以下範圍：線條寬度 (width) 為 1 至 41，間隔 2；線條長度 (length) 為 1 至 501，間隔 25；解析度 (resolution) 為 10 至 510，間隔 25。值得說明的是，解析度的起始值設定為 10，這是基於實驗一的結果推算得知，若將解析度設為 1，運算時間將增加至預設值的 10^4 倍，不僅超出實際應用的可能性，也難以有效控制實驗時間。

因此，解析度選擇從 10 開始，該設定的運算時間約為預設值的 10^2 倍，既符合實驗條件要求，也更接近實際應用場景。

為了量化數位鏡面與現實場景之間的相似程度，本研究採用前述文獻探討中提及的 SAD 演算法。為使計算結果更具直觀性，將 SAD 值歸一化為百分比形式，其方法為將 SAD 值除以理論最大值，公式如下。其中， X 和 Y 分別表示圖片的寬度與高度，255 為像素值的最大可能差異。

$$SAD_{\text{normalized}} = \frac{\sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} |s_1[x, y] - s_2[x, y]|}{X \cdot Y \cdot 255}$$

SAD 結果的形態預期與分布如圖 5 所示。為判定穩定狀態，數據被劃分為 20 組，並將出現頻率最高的組別作為穩定狀態的指標。當實驗數據逐漸收斂至該組別，即可判定實驗已達穩定狀態。

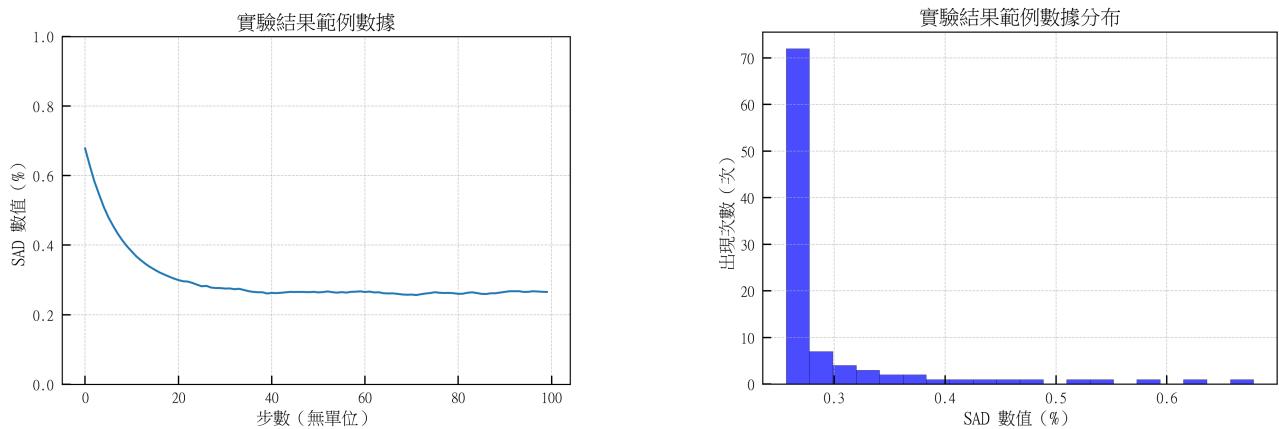


圖 5: 實驗結果範例數據

此外，為了統一不同參數下的測試條件，我選用了三組特定的測試圖片，分別為白藍交錯、紅黑交錯與紅黃交錯的圖案，作為數位鏡面的輸入來源。具體圖片如圖 6 所示。

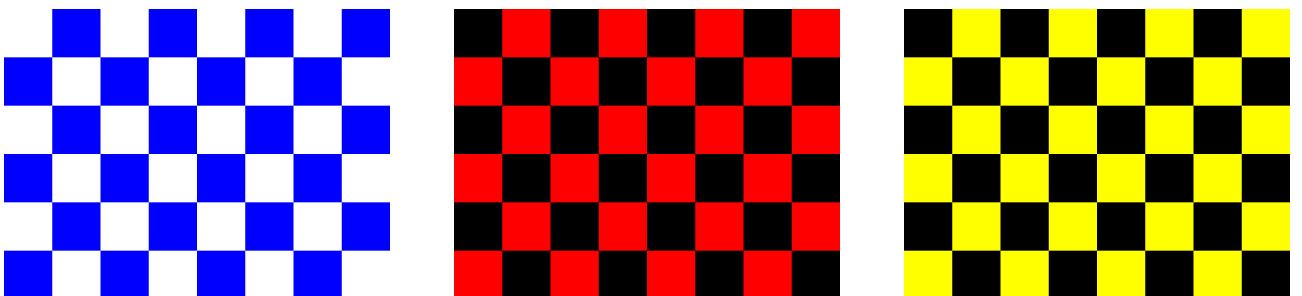


圖 6: 測試照片

四、實驗三：不同場景對於數位鏡面的影響

為探討不同場景對於數位鏡面的影響，我將場景可能不同的點列為：總體場景的複雜程度、總體場景的顏色數量與總體的顏色差異程度。

為了模擬這三種不同的向度，我將製作幾種圖片分別對應他們。總體場景的複雜程度我透過將畫面切分成 12 塊、48 塊、192 塊的方式模擬。總體場景的顏色數量我將其分成 2 種、3 種（紅、綠、藍）與 6 種（紅、綠、藍、黃、青、紫）顏色。

總體的顏色差異程度因為在顏色多的狀況下難以量化，因此只對 2 種顏色的組別做測試，顏色分別是黑搭配紅、綠、藍、黃、青、紫與白七色。

實驗設計表如下：

表 3: 不同場景複雜程度與顏色數量影響的實驗設計

| | 12 塊 | 48 塊 | 192 塊 |
|----|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 三種 | 紅、綠、藍 | 紅、綠、藍 | 紅、綠、藍 |
| 六種 | 紅、綠、藍、 黃、橘、紫 | 紅、綠、藍、 黃、橘、紫 | 紅、綠、藍、 黃、橘、紫 |
| | 12 塊 | 48 塊 | 192 塊 |
| 兩種 | 紅 綠 藍 黃 青 紫 白 | 紅 綠 藍 黃 青 紫 白 | 紅 綠 藍 黃 青 紫 白 |

肆、研究結果

一、實驗一：各參數對數位鏡面執行速度的影響

實驗結果如圖 7。在圖 a, b 中可以看到，線條寬度無論對應哪個組別都與執行時間呈現低度相關。而在圖 c, d 的線條長度雖然在單條現實呈現低度相關，但當到繪製單幀時，其呈現出高度相關。最後，圖 e 的解析度與執行時間呈現負指數相關。

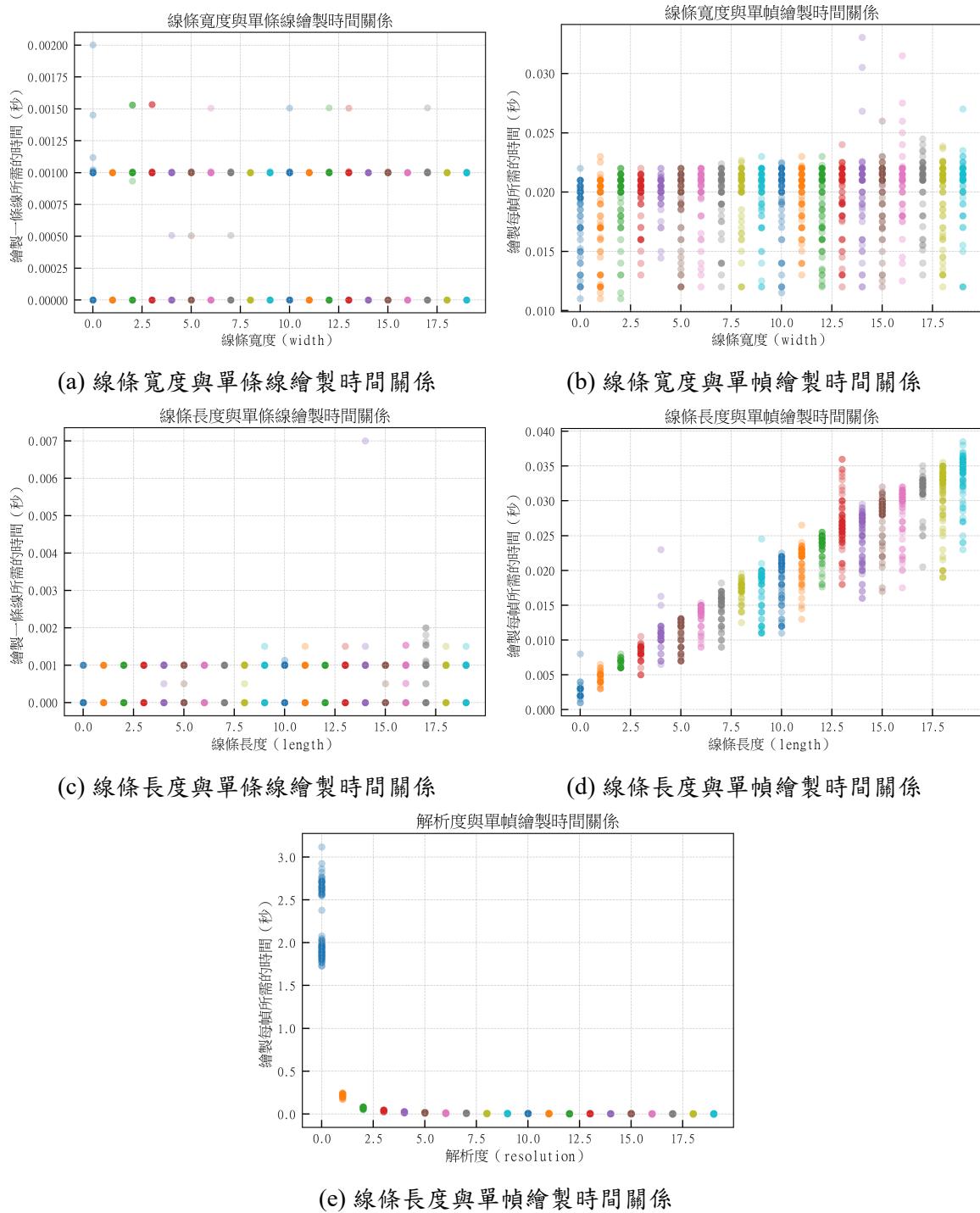


圖 7: 實驗一實驗結果

二、實驗二：各參數對數位鏡面顯示畫面的影響

實驗二的結果如圖 8、9 與圖 10（在下頁）。圖中的左中右分別為解析度、線條長度、寬度，顏色代表的是密度，即範圍內有多少組數據。另一方面，圖中，上面是達到穩定狀態所需的時間，下面則是穩定狀態與現實的差異，接下來將分別這兩點進行探討。

（一）達到穩定狀態所需的时间

在達到穩定狀態所需的时间中，線條長度與線條寬度十分相似，皆呈現負相關，並且數據的形式類似斷層，即中間的過度數據少，左上與右下的數值多。而解析度則呈現正相關，也有類似斷層的現象，但比起線條長度與線條寬度較不明顯。

（二）穩定狀態與現實的差異

在穩定狀態與現實的差異中，線條長度呈現的特徵也與線條寬度類似，兩者在大多視情況中，數值低時會造成穩定狀態不穩定，但提高數值便會使其與現實的差異收斂到一定程度。

反觀解析度並沒有收斂這種現象，其無論數值大小，都會有一定的離群值。不過值得一提的是，在解析度上，一開始數值偏小時，離群值會偏低，而數值變大時，離群值則會上升，但收斂值卻不太會改變。

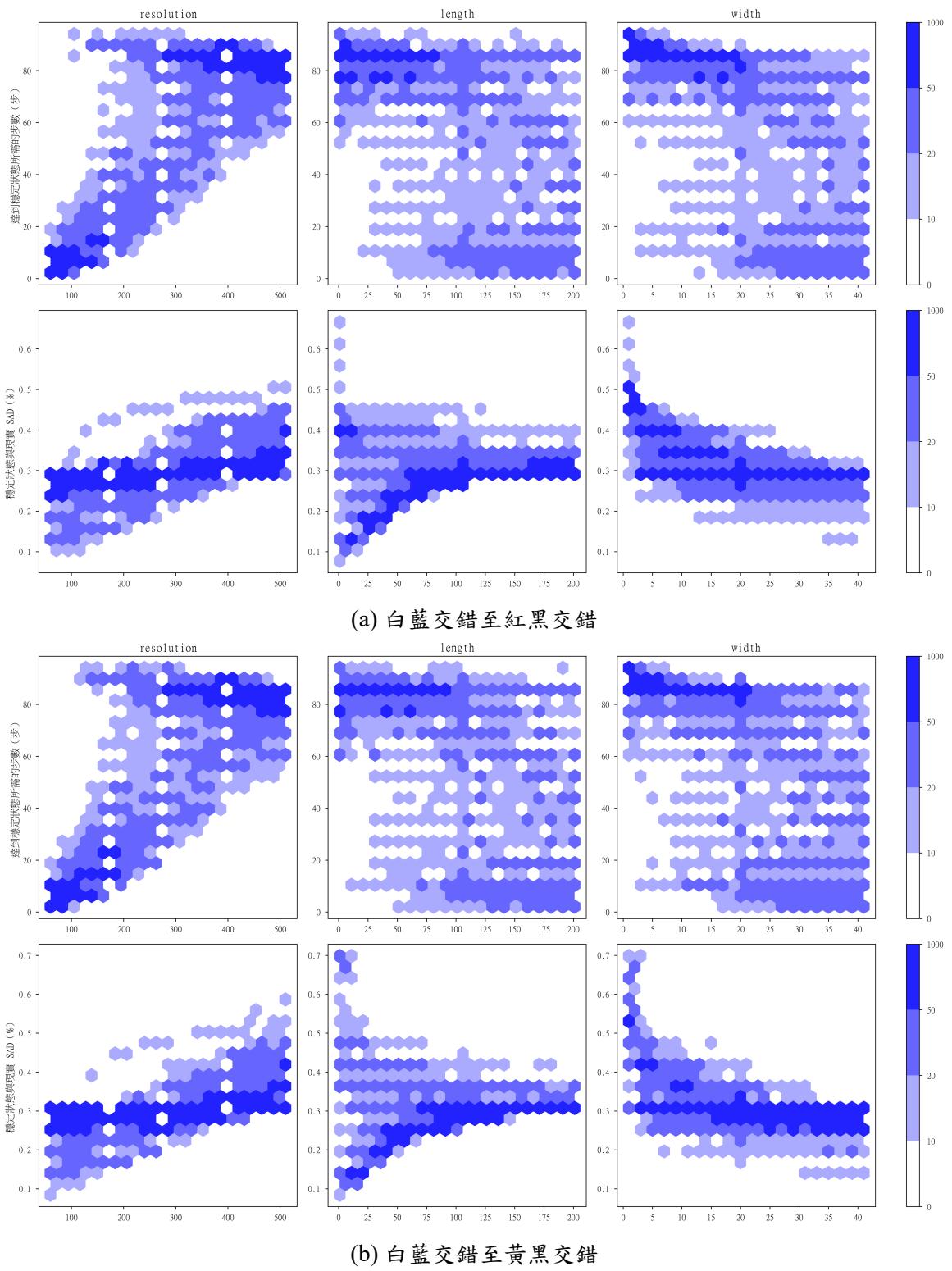


圖 8: 實驗二實驗結果 (一)

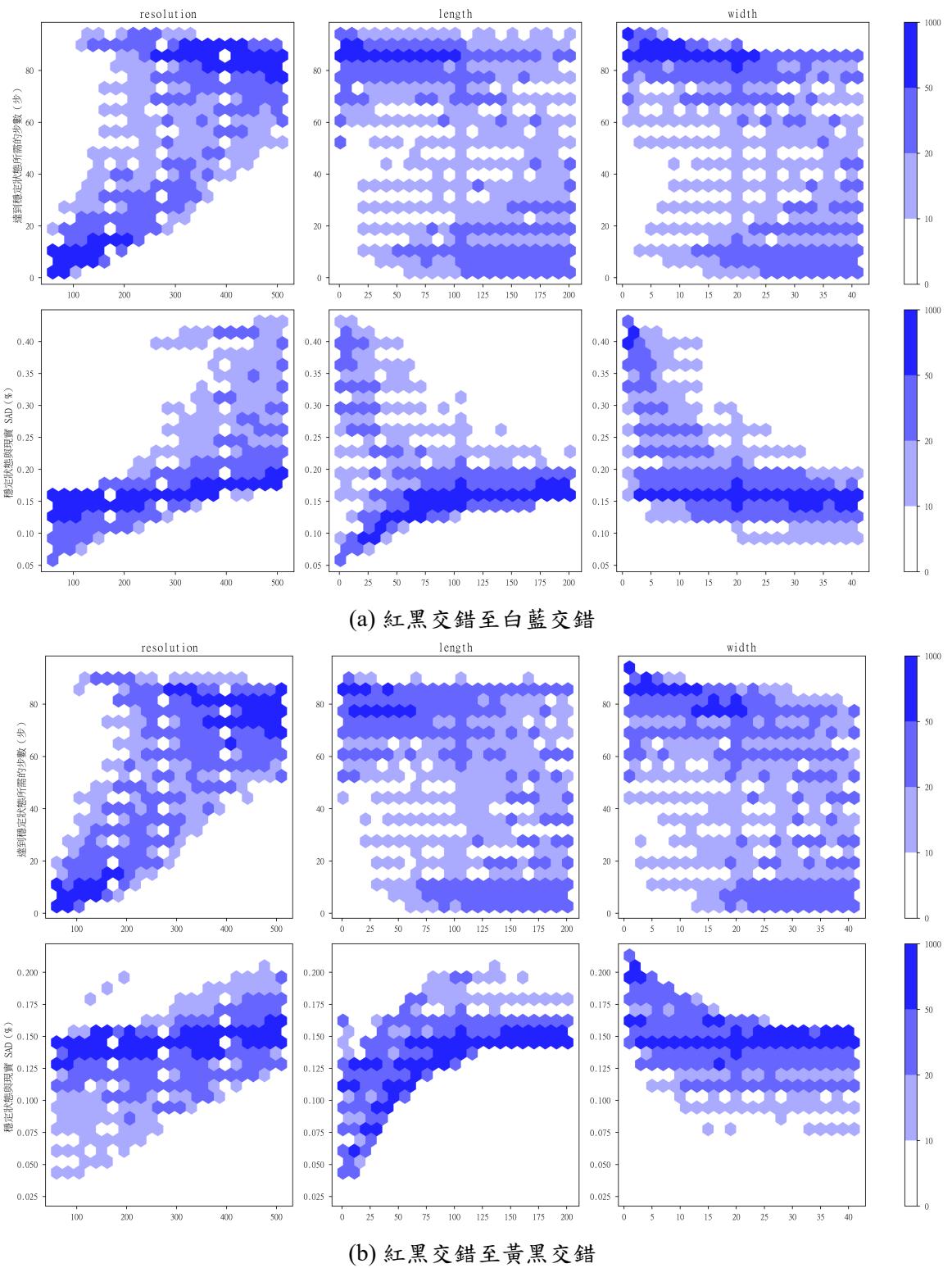


圖 9: 實驗二實驗結果 (二)

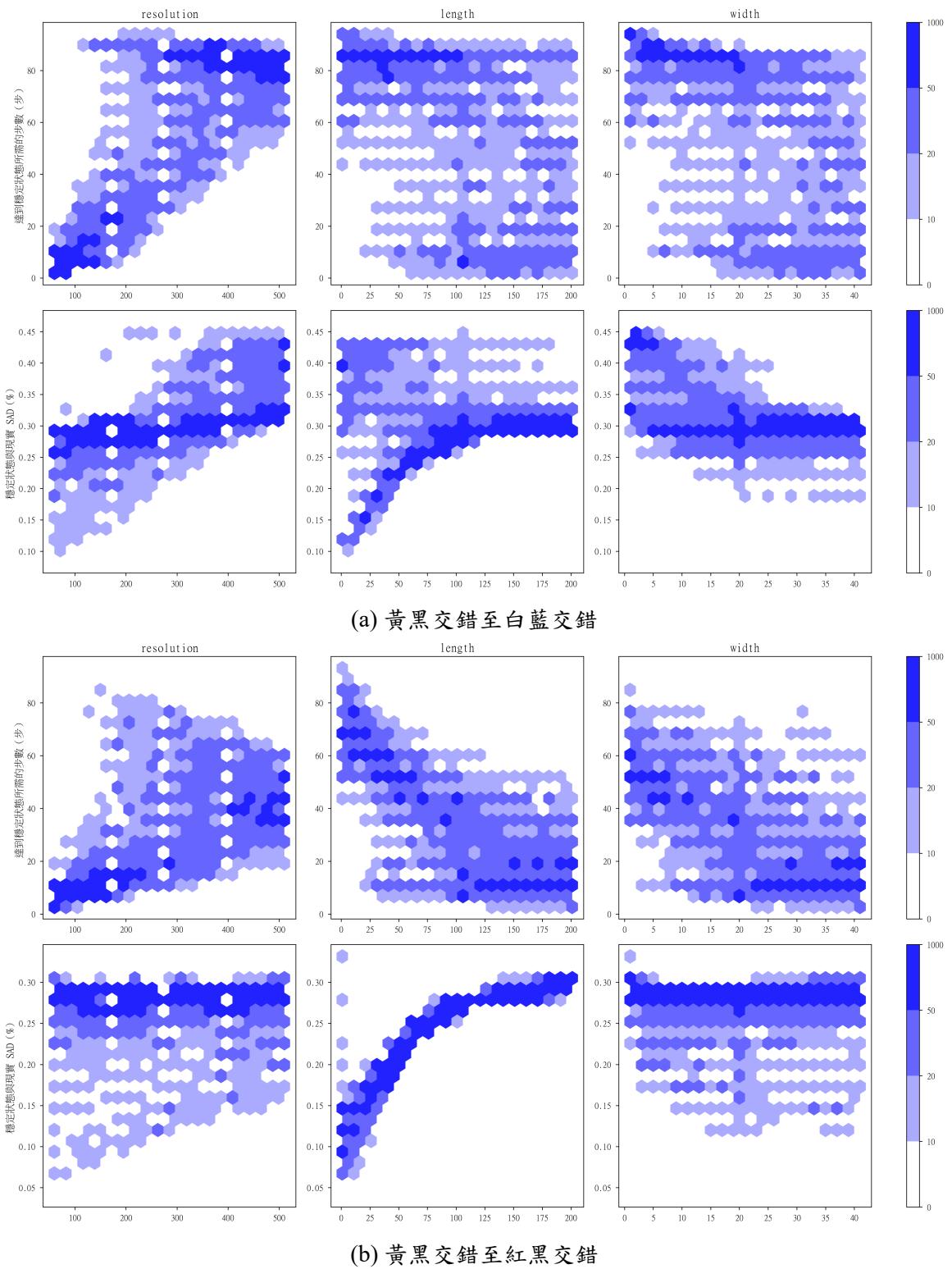
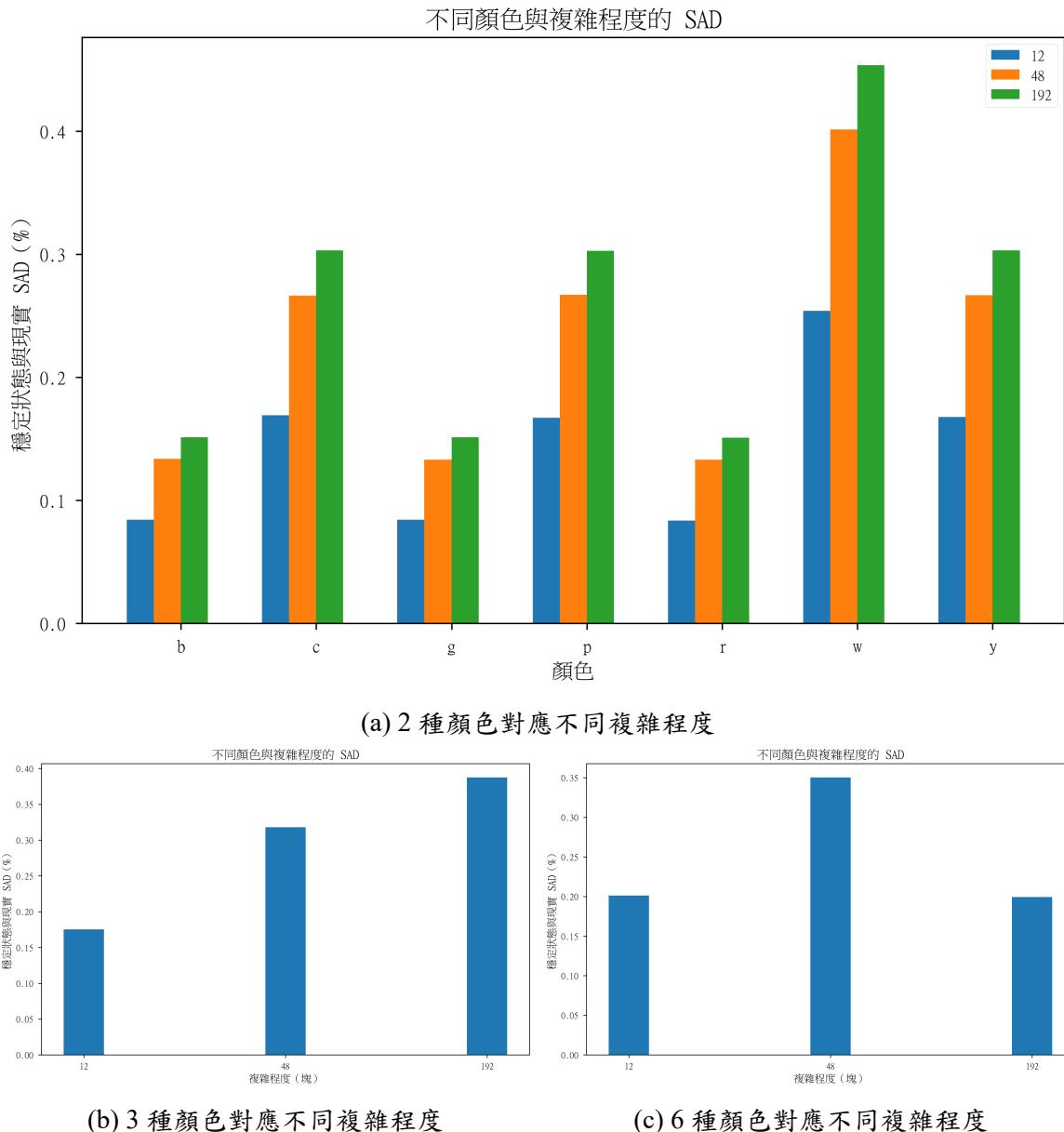


圖 10: 實驗二實驗結果 (三)

三、實驗三：不同場景對於數位鏡面的影響

實驗結果如圖 11，我將其分為顏色數量與場景複雜程度來討論。就顏色數量而言，他們之間的差異程度並沒有決定性的差距，甚至對應不同組別也可能會有不同的結果。但在場景複雜度上，大多數狀況中，複雜程度高的場景明顯的比複雜程度低的場景 SAD 還要高。

而在 2 種顏色對應的複雜程度中由額外進行不同顏色的 SAD 實驗，在這之中，紅、綠、藍三色的 SAD 最低，再來是青、紫、黃，最高的是白。



(a) 2 種顏色對應不同複雜程度

(b) 3 種顏色對應不同複雜程度

(c) 6 種顏色對應不同複雜程度

圖 11: 實驗三實驗結果

伍、討論

一、實驗一與時間複雜度

若是對於數位鏡面進行時間複雜度的拆解可以寫出以下算式：

$$O\left(\frac{l}{r^2}\right)$$

在算式中， l 是指線條長度， r 是指解析度，這兩項數值會對數位鏡面的執行時間造成最大的影響。其結果也大致符合實驗一的計算結果。唯一不符合的部分是在於線條長度對於單條線繪製時間的影響，我認為這是因為執行次數少，常數的影響大，因此時間複雜度的影響並不小，而當執行次數上升到繪製單幀時，其就呈現出了正向的相關。

二、線條長度與線條寬度的相似

在實驗二中，線條長度與線條寬度對於實驗結果的影響是類似的，我認為這是因為這兩項數值對於線條的影響類似，都是影響「線條的面積」，因此對於數位鏡面的影響相似。

三、解析度的收斂值

實驗二中，解析度一開始數值偏小時，離群值會偏低；數值變大時，離群值則會上升，但收斂值卻不太會改變。數位鏡面在當初設計時，解析度除了為了加速外，很大一部份想做的事其實是減少隨機繪製造成的偏差 (happycorn, 2024)。但在實驗結果中，解析度的限制其實只有對應到離群值，對於收斂值並沒有太多的影響，其中的原理或許是未來數位鏡面可以優化的契機。

四、環境顏色與 SAD

在實驗三中，2 種顏色對應的複雜程度額外進行的不同顏色 SAD 實驗中，紅、綠、藍三色的 SAD 最低，再來是青、紫、黃，最高的是白。我發現其數值某種程度上與他對應的另一個顏色（黑）的 SAD 呈現正相關，這表示環境在一定程度上對於數位鏡面呈現的效果是有影響的。我認為要對數位鏡面進行優化的話，或許可以針對不同的環境進行優化。

五、數位鏡面的最優設定

由於藝術並沒有所謂的最優解，這裡主要探討的是對應的需求下會需要的不同參數設定。若是希望反應的速度慢些，有點變化的感覺，可以調低線條的長度、寬度，調高解析度，反之亦然。若是希望更貼合現實的畫面的話，可以調低解析度。若是希望畫面的隨機性增加，則可以減少線條的長度與寬度。

陸、結論

（一）了解不同參數設定對於數位鏡面的影響

在執行時間方面，線條寬度不相關、線條長度呈正相關、解析度呈負指數相關。達到穩定狀態所需的時間方面，解析度呈正相關、線條寬度與線條長度呈負相關。穩定狀態與現實的差異方面，線條寬度與線條長度在數值低時不穩定、數值高時則會收斂；解析度無論高低收斂值都類似，但離群值在數值低時偏低、在數值高時偏高。

（二）了解不同影像環境對於數位鏡面的影響

在環境複雜度方面，複雜度越高、相同設定下的與現實差異就會越大；顏色數量對於相同設定下的與現實差異影響並不大。

在 2 種顏色做的額外實驗中，2 種顏色的差異越大、畫面與現實的差異越大。

（三）探討不同環境與需求下數位鏡面的最優設定

若希望反應較慢且有些變化，可降低線條長度與寬度，提升解析度；反之，增長線條並降低解析度可加快反應速度。為貼近現實，可降低解析度；增加隨機性則可縮短線條並減小寬度。

柒、參考文獻資料

- Bull, D. R., & Zhang, F. (2021). Chapter 4 - digital picture formats and representations. In D. R. Bull & F. Zhang (Eds.), *Intelligent image and video compression (second edition)* (Second Edition, pp. 107–142). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820353-8.00013-X>
- Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C. (2001). *Introduction to algorithms* (2nd). The MIT Press. <http://www.amazon.com/Introduction-Algorithms-Thomas-H-Cormen/dp/0262032937>
- happycorn. (2024). 數位鏡面-線. https://github.com/happycorn/Mirror_Line
- 丹尼爾·羅森. (2017). 2017 機場捷運公共藝術專案—交 · 感知區 – daniel rozin. <https://www.husart.net/?p=372>