

國立交通大學建築研究所

碩士論文

手繪草圖的空間詮釋－利用程式與快速成型

The Spatial Interpretation of Freehand Sketches: Using Programming and  
Rapid Prototyping



研究生 何庭峰

指導教授 侯君昊

中華民國九十六年七月

手繪草圖的空間詮釋－利用程式與快速成型

The Spatial Interpretation of Freehand Sketches:  
Using Programming and Rapid Prototyping

研 究 生：何庭峰

Student: Ting-Fung Ho

指導教授：侯君昊

Advisor: June-Hao Hou

國立交通大學  
建築研究所  
碩士論文



Submitted to the Program in Graduate Institute of Architecture

College of Humanities and Social Science

**National Chiao Tung University**

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

In

**Architecture**

July 2007

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十六年七月

## 中文摘要

手繪草圖常被使用在概念設計過程中；其特點在於其能在短時間內不斷塗改和不準確線條所給予設計過程中的曖昧性，設計者並能從手繪草圖得到視覺的回饋並對設計進行重新詮釋的過程（Schon and Wiggins, 1992）。然而由於電腦輔助設計（Computer-Aided Design, CAD）和電腦輔助製造（Computer-Aided manufacture, CAM）的設計環境大多講究線條與形體的準確性，電腦輔助的設計過程多只能應用在設計過程中較後期的階段（Gross, 1996）。爲了突破這個困境，有研究者提出在電腦輔助設計環境中利用筆式的輸入方式進行手繪草圖（Gross, 1996; Igarashi, Matsuoka and Tanaka, 1999; Do, 2001; Jung, Gross and Do, 2001）。另一方面，在電腦輔助設計環境中透過建模的（modeled）、程式運算的（programmed）和相片推導的（image derived）等方式所得到的數位模型可以直接被輸出爲實體模型（Kai and Russell, 2005）。

本研究強調對手繪草圖空間詮釋的重要性，探討突破電腦輔助環境中繁複的操作程序，發展出對手繪草圖進行空間詮釋並以電腦運算方式生產實體模型的系統原型 Spatial Charcoal。設計者只需要在紙上或以筆式作手繪草圖，草圖經由掃瞄器進入數位資料後會進行空間詮釋並建立數位模型，便能作爲概念實體模型輸出 RP 模型。

本研究主要分爲三個部分：第一部分對建築師的手繪草圖進行分析，主要針對手繪草圖的註釋方法進行分析與建構；第二部分爲系統的設計與實作，以及案例操作示範。第三部分爲使用者測試與評估。

本研究讓不同設計者以個人的手繪草圖方式進行空間詮釋，系統可以直接輸出相對應的有手繪特性的概念模型。結果說明了設計者在簡單的熟悉整個的設計過程後，便由於操作經驗所驅使下回饋到手繪草圖上，對繪畫線條與深淺等作出修正的控制而做出他們想要的實體概念模型。本研究的貢獻提供方便的轉換方式，強調空間詮釋的可能性，取代了以往爲了輸出數位形體而費力學習建模的設計過程。設計者可以在概念的時期將手繪草圖作爲想像中實體手繪式模型操作，同時加強了設計者對手繪草圖時立體形體的想像。

關鍵字：手繪草圖、空間詮釋、快速成型

## Abstract

Freehand sketch is always been using in conceptual design process, its characteristics help designers alter the contour constantly within short time, designers can derive some visual feedback from the sketch and then reinterprets the design (Schon & Wiggins 1992). While drawing in the computer-aided design (CAD) and computer-aided manufacture (CAM) environment, elements must be identified specifically, positioned and sized precisely and that can only be used in the later process of design (Gross 1996). In order to break through this predicament, researchers propose utilizing the pen-based system to sketch in CAD environment (Gross 1996; Igarashi, Matsuoka & Tanaka 1999; Do 2001; Jung, Gross & Do 2001). On the other hand, designers could generate digital model by modeling, programming and image deriving in the CAD environment and then fabricate it on a computer numerically controlled (CNC) machine (Kai & Russell 2005).

With emphasizing the importance of spatial interpretation of freehand sketches, the objective of this research aims to simplify the inconvenient and complicated operation sequence in the current CAD environment; developing a system prototype, Spatial Charcoal, that generates entity model by a program which translates the spatial interpretation of the freehand sketch into a 3D digital model. Designers draw sketch on paper, and then scan it, or draw sketch directly on the computer pen-based system. This digital data is spatially interpreted and generate a digital model, which will then be fabricated to an entity model in RP machine.

The research is mainly consisted of three parts: First, analyzing famous architects' sketches mainly builds up a spatial interpretation method of freehand sketch. Second, implementing system that demonstrates different cases. Third, evaluating user testes.

After designers get familiar with the design process gradually, designers' operation experience prompts the feedback on sketching, and then they modify the ways of drawing lines and darkness to master the entity conceptual models. The significance of the research provides a convenient conceptual design process, which emphasizes the probability of spatial interpretation and replaces the past laborious work of modeling digital model. Furthermore, designers can modify the entity sketchy model by sketching and that strengthens designers' imagination of three-dimensional physique while sketching.

Keyword: freehand sketch, spatial interpretation, rapid prototyping

## 謝誌

不知不覺間在新竹兩年的生活快要結束了，從東海畢業來到交大建研所，必須先感謝東海的曾成德老師推薦我來到這裡，不做設計的這兩年間，讓我看到了很多不一樣的問題與觀點。感謝我的指導老師侯君昊老師給予我很大的自由，容許我進行實作的討論方式，持續的 meeting 與指導讓我有完成論文的能量。感謝 Aleppo 老師給予我在 project 與展覽參與的機會，讓我從中學會很多課業上學不到的東西。感謝我的論文口試老師，簡聖芬老師嚴厲的批評讓我了解到進行研究時應持有更嚴謹的態度，施宣光老師要我把空間詮釋的過程中不同的 2D 與 3D 疊加的資訊進行更多的思考，著實讓我受益良多。

再來要感謝文禮學長幫助我解決很多學習程式語言時遇到的問題，楚卿學姊帶領我走進 CAD/CAM 的領域，Oreo 學姊帶著進行 feidad 的工作，讓我看到了建築的另一個面向。建同學長在我研一時不厭其煩的討論與鼓勵，和好友厚片一起投 conference 以及互相推動要完成論文的默契都讓我有完成學業的決心。還有其他的好友小毛、玠佑、瑪莉金、姿汝、小胖、Sasa、小傅、柏陽、聖荃、Near、大毛和 John，讓我渡過了美好的學習時光。

最後要感謝我的家人，在各方面都不斷支持我的爸媽，跟我不停討論曼聯和建築的弟弟，關心我身體與電腦的哥哥，當然還有跟我走過無數日子的女朋友，謝謝你們的支持，讓我有繼續邁向理想的動力。



# 目錄

<b>1 緒論</b>	<b>1</b>
1.1 研究動機與研究問題	2
1.2 研究目的	4
1.3 研究步驟	5
1.4 研究架構	5
<b>2 研究背景與相關案例</b>	<b>6</b>
2.1 手繪草圖與設計思考的關聯	6
2.2 電腦輔助設計環境下的手繪草圖應用	9
2.3 電腦輔助製造	14
<b>3 空間詮釋方式</b>	<b>20</b>
3.1 案例分析	20
3.2 手繪草圖特性與空間詮釋的關係	25
3.3 空間詮釋的可能性	29
3.4 空間詮釋方式的建立	32
<b>4 Spatial Charcoal 系統設計與實作</b>	<b>34</b>
4.1 Spatial Charcoal 系統程序設計	34
4.2 Spatial Charcoal 系統架構	35
4.3 Spatial Charcoal 系統實作	46
4.4 實際應用與設計案例操作示範	40
<b>5 測試</b>	<b>46</b>
5.1 詮釋方式實驗	46
5.2 Spatial Charcoal 系統測試	49
<b>6 結論</b>	<b>58</b>
6.1 研究重要性與回饋	58
6.2 研究限制	59
6.3 未來研究	59
<b>參考文獻</b>	<b>61</b>
<b>附錄</b>	<b>64</b>
附錄一 空間詮釋的相關技術討論	64
附錄二 空間詮釋的運算方式	66
附錄三 數位建模的運算方式	72
附錄四 輸出 RP 模型	75



## 1. 緒論

每個人或多或少都有拿著畫筆在畫紙上塗畫的經驗，徒手繪畫就像書寫簽名一樣，每個人會有自己的風格與習慣，這樣差異是一個繪畫者養成的過程中日積月累的結果。此外，徒手畫也是一種直覺且簡單方便的記錄或輔助思考的方法，建築師常對一些日常生活或旅遊的觀察以手繪草圖的方式記錄下來，作為日後視覺思考（visual thinking）與溝通的範本。手繪草圖常被使用在概念設計過程（conceptual design process）中，手繪草圖的含糊與不準確性提供了不同被詮釋的可能性（Goel, 1995）。

在傳統的設計過程中，建築師依賴手繪草圖（freehand sketch）作為對設計初步構想的發展以及與他人溝通的工具。在數位設計工具充斥下的今天，設計者逐漸捨棄了手繪建築圖的傳統而大量使用電腦輔助設計（Computer Aided Design, CAD）軟體。電腦輔助設計工具提供設計者無論在二度或三度空間中強大的繪圖與建模功能，而在設計過程中對電腦輔助製造（Computer Aided Manufacture, CAM）工具如快速成型（Rapid Prototyping, RP）和鐳射切割（laser cutting）的應用，讓數位形體可以快速地輸出為實體模型。由於電腦在設計過程中的介入，人們開始以全新的眼光重新看待建築設計；然而人類從小習以為常以鉛筆和畫紙等最簡單直接的繪畫方式卻因此被忽略。本研究對手繪草圖的空間詮釋（spatial interpretation）方式進行探討，企圖以新的空間詮釋方式讓手繪草圖引導數位化的設計過程。除了修補在設計過程中手繪草圖與數位工具所形成斷裂的關係外，利用數位工具對手繪草圖直接詮釋為草圖化（sketchy）的數位模型，使手繪草圖在設計過程中形成新的角色與應用。

本研究企圖建立一個使用在概念設計過程中，簡易的手繪草圖詮釋系統原型（prototype）Spatial Charcoal：利用程式運算對傳統的手繪草圖進行空間詮釋，接著在電腦輔助 3D 設計軟體進行自動化的建模，並透過快速成型機（RP machine）將數位資料生產實體模型。讓設計者同時受惠於天賦的手繪草圖能力以及強大運算能力的數位工具。

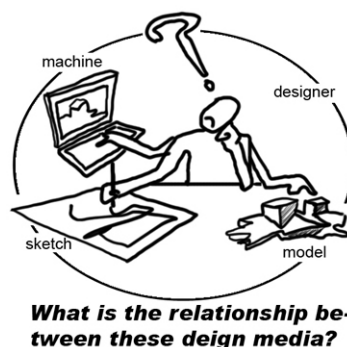


圖 1 設計者們在設計過程中經常要面對各自獨立的设计媒材

## 1.1 研究動機與研究問題

手繪草圖讓設計者有更多實驗性的機會並使創作性提高。大量的實務建築師使用繪圖，尤其是手繪草圖作為表達和發展設計概念的工具（Robbins, 1994）。設計者在繪圖過程中持續的看－動－看（seeing-moving-seeing）模式讓他們能處理複雜的設計。手繪草圖幫助設計者能在短時間內對設計進行持續的修改，得到即時的視覺回饋並重新詮釋自己的設計（Schon & Wiggins, 1992）。此外，手繪草圖中密集和模糊的線條所構成的圖像加強了符號（symbol）的不確定性，同時也增加轉換的可能性（Goel, 1995）。在另一方面，設計者在使用電腦輔助設計（computer-aided design, CAD）的系統時，所有建構物的位置和屬性都必須要準確地被定義，這樣的特性大大減低了設計發展的可能性，因此電腦輔助設計系統只能使用在設計的後期階段，而並不適合在概念的發展階段中使用（Goel, 1995; Gross, 1996）。

為了突破電腦輔助設計環境中固有的問題，有研究者開始提出在電腦輔助設計環境中利用筆式（pen-based system）的輸入方式進行手繪草圖，這些筆觸會經過圖形辨識並作為建立數位立體模型的依據（Gross, 1996; Do, 1996; Igarashi, Matsuoka & Tanaka, 1999）。Lim（2003）更認為利用電腦將手繪筆觸直接轉化為數位模型，讓設計者除了得到草圖模糊性的視覺回饋外，更能得到具體的數位影像視覺刺激，強調有很大的發展潛力。

另一方面，在設計的過程中，設計者能使用電腦輔助製造（CAM, computer aided manufacture）中的快速成型技術（Rapid Prototyping, RP）讓數位模型直接輸出為實體模型，或以鐳射切割（laser cutting）的方式輸出要經組裝的平面構件。就如同繪圖一樣，實體模型也是設計過程中重要的工具；實體模型讓設計者看到並思考更多空間性（立體）的想像。然而一般設計者，尤其是對電腦輔助設計軟體不熟悉的使用者，在建造可以 RP 或鐳射切割輸出的數位模型時都需要花費很大的工作量，這樣時間和勞力的限制大大減低了設計者想多利用 RP 和鐳射切割的興趣。

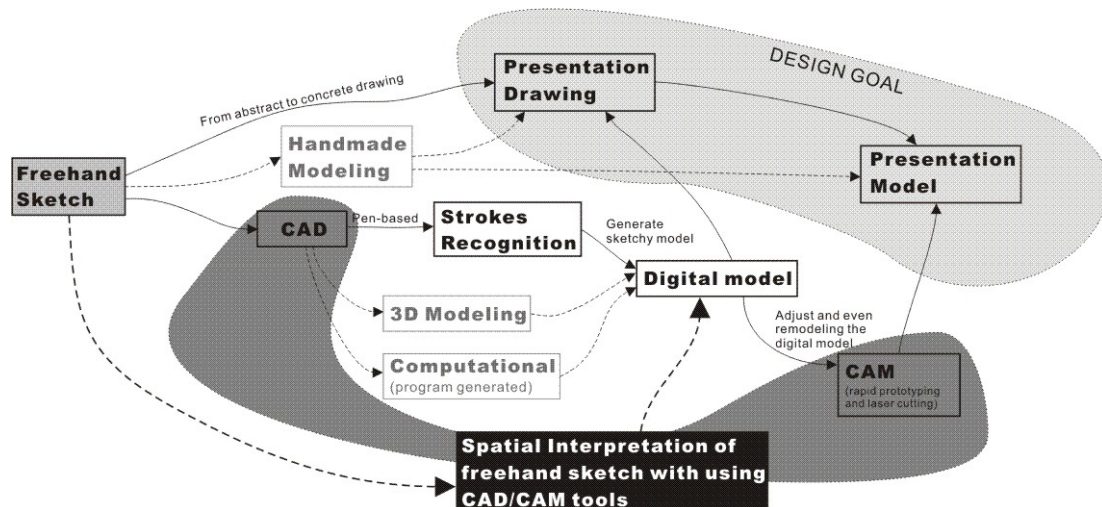


圖 2 手繪草圖在設計過程中的角色與提出以空間詮釋方式在 CAD/CAM 環境中建模



在電腦輔助設計環境中，除了以筆觸辨識的方式讓設計者直接建立有手繪特性 (sketchy) 的數位模型外，本研究以手繪草圖空間詮釋的概念，提出以手繪草圖空間詮釋的方式產生數位模型形成新的設計過程。在傳統的設計過程中，實體模型和手繪草圖是兩項最重要的設計媒材，本研究提出手繪草圖能以詮釋的方式產生數位模型外，透過利用快速成型技術 (RP) 可讓數位模型直接輸出為實體模型，這樣由空間詮釋方式形成新的設計過程，回應到讓設計者跳過操作電腦繪圖，直接以手繪草圖生產出實體模型，同時開拓了手繪草圖除了概念發想以外，發展成有手繪特性 (sketchy) 的模型的機會。

本研究針對在概念設計的階段中，手繪草圖 (sketch) 的空間詮釋方式和 RP 的應用進行討論，並提出以下的問題：手繪草圖要如何被空間詮釋為實體模型？而以手繪草圖空間詮釋為導向的設計過程會對設計有怎樣的影響？



## 1.2 研究目的

本研究企圖進行的不只是讓電腦看懂手繪草圖，而是希望透過對手繪草圖的空間詮釋的不同可能性，建立一個以手繪草圖為導向的設計流程，藉此在建築的設計過程中加入更多美術（artistic）的元素，並提倡更多應用的可能性。

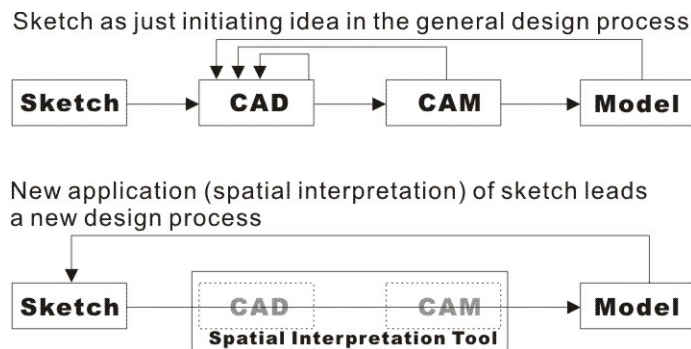


圖 3 對手繪草圖進行空間詮釋提供了新的設計應用與設計流程

本研究針對探討整合傳統設計過程中各自獨立的设计媒材和以程式運算的方式，簡化電腦輔助環境中繁複的操作程序，實作出對手繪草圖進行空間詮釋（spatial interpretation）並生產 RP 模型的系統原型（system prototype）Spatial Charcoal。Spatial Charcoal 是一個完整的設計工作程序：設計者繪畫草圖在紙上並將草圖掃描、或以筆式介面作手繪草圖，草圖會被空間詮釋並儲存為數位資料，利用這筆資料建構出數位模型後，數位模型轉化成輸入 RP 軟體的資料格式並利用快速成型機製造出 RP 模型。設計者只需要透過簡單的操作便能讓流程進行下去。

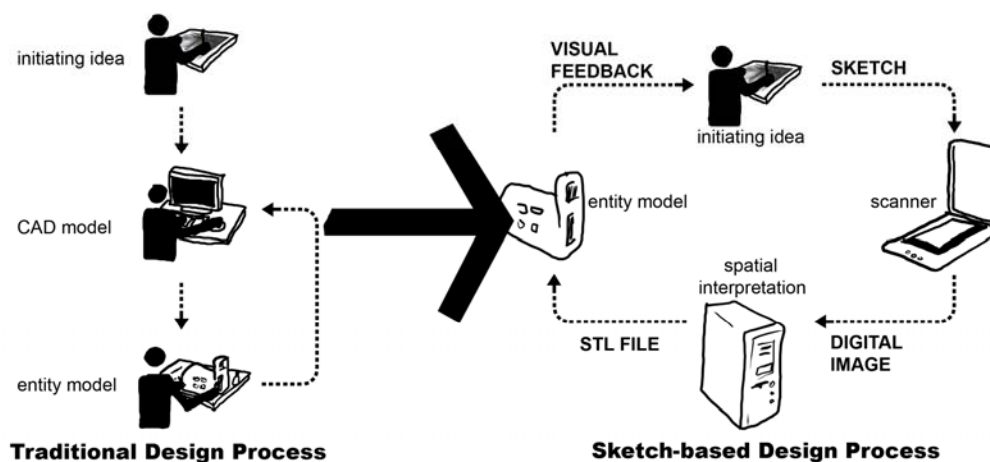


圖 4 從设计媒材各自独立的傳統设计過程整合為以手繪草圖為導向整合性的设计過程

### 1.3 研究步驟

本研究主要分為四個部分，採取實作的方法研究手繪草圖和建立數位跟 RP 模型的關係。藉由詮釋方式與運算的設計，提供設計者手繪草圖直接輸出為 RP 模型的設計過程。研究步驟如下：

#### 步驟 1 研究背景與相關案例

整理手繪草圖與設計思考的關聯，再回顧筆式輸入在數位輔助環境中的發展。接著討論電腦輔助製造下，不同類型的設計模型的應用狀況，以及針對從數位運算生產出實體模型的案例進行討論。

#### 步驟 2 詮釋方式與 Spatial Charcoal 系統設計

從設計者案例分析中整理出手繪草圖特性，以及手繪草圖和實體建築物間的空間關聯；提出手繪草圖空間詮釋的可能性，接著設計出 Spatial Charcoal 系統的詮釋方式。

#### 步驟 3 Spatial Charcoal 系統實作

根據基本的空間詮釋概念，設計出線狀和面狀草圖分別詮釋為空間模型的運算程序，接著便是對空間詮釋的運算方式、數位建模的運算方式、RP 模型輸出和設計案例進行實際的操作。

#### 步驟 4 使用者評估

本研究在讓受測者操作本系統後，立即與受測者進行訪談，以討論設計者對空間詮釋方式和 Spatial Charcoal 設計過程的反應與系統對設計的影響，同時詢問更多設計者在使用本系統時的想法與建議。

### 1.4 研究架構

本論文架構分成六大章節，陳述的研究內容如下：

第一章：闡明研究動機與研究問題、研究目標以及研究步驟。

第二章：闡明手繪草圖與設計思考的關聯、數位輔助設計工具下的手繪草圖應用，以及應用在設計過程中的數位輔助製造設計案例。

第三章：闡明空間詮釋方式：從案例分析、手繪草圖與空間詮釋的關係的整理、空間詮釋的可能性、以及建立空間詮釋方式。

第四章：闡明 Spatial Charcoal 系統實作過程：系統程序設計、系統架構、系統實作、以及實際應用與設計案例操作示範。

第五章：闡明詮釋方式實驗以及 Spatial Charcoal 系統測試。

第六章：闡明結論、研究重要性與回饋、研究限制和未來研究。

## 2 研究背景與相關案例

### 2.1 手繪草圖與設計思考的關聯

#### 2.1.1 手繪草圖在設計過程中的角色

無論設計的目的是藝術性的還是實用性的，設計可以被理解為解決問題的過程。設計者會自覺或不自覺地將設計問題拆分為較小的問題，並將這些較小問題排序，這樣做的原因是較小的問題能較容易地被解決，解決小問題的同時會產生回饋，並容許對可行的解答進行推演與重構出最佳的方案。另一方面，設計者在設計過程中會發現設計的限制（constraint），從而轉化為解決的方法，設計者的任務便是將這些限制與解決方法表達出來，一般的做法便是讓它們視覺化並能跟他人溝通(Faruque, 1984)。

設計者表現建築想法的溝通方式隨著建築歷史的推演變得越來越多樣化，包括了二度的各種繪圖、三度的實體模型（physical models）和數位模型（digital model）等。這些表現方式對建築師的角色、設計方法與思考以及建築的形式，有著決定性的影響(Liu, 1996)。

建築師所使用的繪圖類型可以概括地分為概念圖、平面圖、立面圖、剖面圖、透視圖和細部等（Robbins,1994; Herbert, 1993; Liu, 1996）。而從繪圖的空間概念來分類的話，建築繪圖主要分為三大類別：垂直投影法（orthographic）、等角透視投影法（axonometric）和消點透視投影法（perspective）。這些繪圖的類型是建構在視點的不同表現方式。垂直投影法描畫出單面兩度的資訊，而等角透視和消點透視投影法描繪的都是指向立體的資訊。此外，垂直投影法和等角透視投影法都是建構在平行的線條基礎上，圖上物件會形成平行的關聯。消點透視則是一種按透視法距離越遠形狀越小的構圖方式，實際上平行的線條會被安排在構圖上漸漸縮小距離並形成消點。設計師會使用不同的繪圖概念來思考並表現設計的不同面貌。每種繪圖的空間概念都有其功效與長處，並不會因為垂直投影圖是平面的（2D）而比不上表達立體（3D）資訊的等角透視投影法。單向度的垂直投影圖反而可讓設計者的效率提高，同時透過不同準確度的配合更可提高閱讀與思考不同空間資訊的機會（Fraser and Henmi, 1994）。

不同的繪圖有其不同目的與態度，基本的應用包括了對於早已存在的影像與現象進行參考記錄、分析的圖表（diagram）、設計繪圖、為行外人繪畫的表現圖和作為創造幻想世界（visionary world）的工具（Fraser and Henmi, 1994）。

大量的實務建築師使用繪圖，尤其是手繪草圖作為表達和發展設計概念的工具，手繪草圖讓設計者有更多實驗性的機會並使創作性提高（Robbins, 1994）。Herbert（1993）強調草圖在設計過程中的重要性，草圖不只是作為設計師紀錄的工具，同時也影響到設計過程的進程。在設計構想發展階段中，大量的繪圖是一種重要的行為特徵。毫無疑問地，相對於完整的表現圖面（presentation drawing），設計過程中的草圖顯得偶然而不完整，

圖面上充斥著一種介於未解決和不能預期之間，猶豫不決的線條。然而，草圖是圖像思考過程（graphic thinking process）中不可或缺的一部分。

有些建築師會使用簡單而精確的示意圖（diagram），然而有些則會使用手繪草圖作為與別的建築師或客戶溝通的工具。不同的使用工具（如鉛筆、炭筆或電腦繪圖工具等）都可以發揮在設計過程中草圖（sketch）的功能。大量建築師會使用炭筆和鉛筆去描繪線條，並讓圖形含糊不清得容許暗示（allusion）與類比（analogy）的可能。有些建築師會利用廉價的描圖紙快速地繪畫草圖，或利用較好的描圖紙進行細心的描繪。建築師可能會在繪圖紙上重複繪畫著類似的圖形，或仔細的重繪一些已知的建築物的變形圖像，並進行圖形的轉換。不同的繪圖工具和技巧可能會讓圖形（image）呈現不同的複雜程度，然而它們作為腦中印象（mental impression）的傳送者的功能是一致的（Smith, 2005）。

Goel（1995）指出了手繪草圖適合於概念設計發展階段的三個特性：1.手繪草圖複雜的線條包含了密集的可以被不同理解組合的圖形，透過變化的組合方式會形成不同的圖形。2.手繪草圖的含糊性讓指示對象和圖像內容在設計早期階段是不確定的。3.手繪草圖中大量可被不同理解與想像的圖像內容確保了大量的可能性，並幫助設計者能從一個想法轉變到另一個想法。對設計想法的橫向轉換在解決設計問題的初部階段中是必要的，而手繪草圖中圖形的密集性和含糊性提供了這樣的認知活動，並促進了對圖形產生多樣的詮釋可能。

### 2.1.2 手繪草圖視覺思考



在繪畫手繪草圖的過程中，建築師透過經驗和技能跟視覺刺激（visual stimulus）產生互動，這是因為手繪草圖的行為有賴於記憶。建築師整體的本質－包括思維、影像、身體記憶、詮釋方法（interpretation）與經驗，都會影響其手繪草圖（Smith, 2005）。同時，繪圖不只是一個視覺的經驗，同時也包括了筆觸碰到畫紙、畫筆在畫紙上來回快速移動時所發出的塗刮的聲音、甚至於畫筆或畫紙的味道等不同的知覺經驗。每一種繪圖工具和塗鴉的表面都有其特性，並會因設計者不同的畫圖動作而形成不同的互動過程（Fraser and Henmi, 1994）。

視覺思考（visual thinking）是空間性（spatial）和多向度（multidimensional）的，並不像言語思考（verbal thinking）般是線性（linear）的，而最自然和顯著表達視覺思考的方法便是圖形溝通（graphic communication）。在圖形溝通的過程中，人會把腦中所接收到的視覺刺激抽象化（visual abstraction），即是將圖形簡化的過程；因此，設計者習慣用抽象的圖形，例如示意圖（diagram）或符號（symbol）等來表現複雜的空間概念或形體。設計問題的解決過程需要不同程度抽象的圖形溝通，圖形的外在呈現正反應出設計者思考的過程（Faruque, 1984）。

Schon 和 Wiggins (1992) 指出設計是一種「看－動－看」(seeing-moving-seeing) 的過程，強調看 (seeing) 的行為；因此在設計過程中，設計者極依賴於視覺思考 (visual thinking)，讓他們能處理複雜的設計。手繪草圖幫助設計者能在短時間內對設計進行持續的修改，得到即時的視覺回饋並重新詮釋自己的設計。

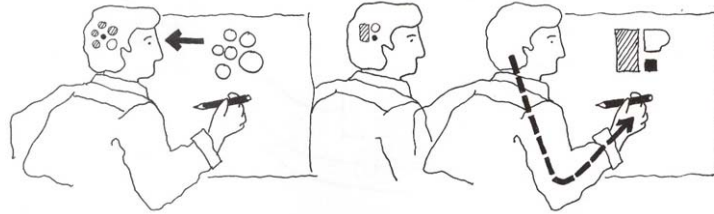


圖 5 腦－手－草圖－眼相互循環過程 (Laseau, 2001)

Laseau (2001) 指出繪畫草圖中圖形與設計者之間，會形成「腦－手－草圖－眼」的相互循環過程。在繪畫的過程中，我們想畫出的和我們真的畫出的往往會有一定的差異；繪畫的技巧、材料和設計者的情緒都會形成這些差異。繪圖環境中光線的明亮與角度、繪畫圖形的面積與它跟眼睛之間的距離，紙張的反射性與穿透性等都是溝通過程中的變因。再者，設計者的經驗、興趣與企圖都會影響眼睛從草圖中看到或忽略哪些東西。

此外，草圖與設計者間在設計過程中的視覺回饋 (visual feedback) 也是草圖的重要研究議題。經過對視覺行為的一系列分析與實驗，Liu (1995) 得出了四個在設計過程中設計者識別形狀 (seeing shapes) 的現象：第一，有經驗與沒有經驗的設計者都能辨認出明確的次形狀 (subshapes)，而只有前者能辨認出模糊的次形狀；第二，當一般人觀察形狀時，明確的、封閉的和叫得出名的次形狀是最快能被辨認的圖形；第三，辨識次形狀的時間跟形狀的複雜度，即一個形狀中所包含次形狀的數量是成正比的；第四，由於所累積的經驗和專業的訓練，有經驗的設計者較有發現模糊的次形狀的能力。

Suwa 和 Tversky (1996) 發現引起設計者新想法的手繪草圖特徵並不只包括視覺性的特性 (空間、形狀、角度、面積等)，同時還包括了非視覺性的機能特性 (視線、光線、循環系統等)。尋找新的空間讓設計者開始新的手繪草圖區域，而對局部空間關係的關注則會使相關草圖的繪畫持續一段時間。此外，實務建築師對手繪草圖單一局部的持續性能維持較久，同時在開始新的手繪草圖區域前對機能特性有較深入和複雜的關注 (Suwa and Tversky, 1996)。

Suwa 等人 (2001) 認為有效的繪圖者會對手繪草圖的局部進行重組 (regrouping part)，並發現在草圖中不同意義的特性，從而得到新的設計想法。手繪草圖中視覺／空間的特性包括：(1) 元素的視覺特徵，如形狀、大小、紋理；(2) 元素間的空間關係，如鄰近、遙遠、隊列、交錯、連結等；(3) 元素的組合關係或比較，如統一／類似、對照／差異；(4) 在元素間不明確的關係。研究中進行了兩個實驗以證明重組草圖的局部有助於生產新的設計詮釋，尤其是在概念發展的階段；因此，讓設計初學者對手繪草圖進行局部重新組合的訓練是必須的。

## 2.2 電腦輔助設計 (Computer-Aided Design, CAD) 環境下的手繪草圖應用

1963 年電腦繪圖的開創者 Sutherland 提出 Sketchpad 研究計畫。期後便開始了大量對電腦輔助設計 (computer-aided design, CAD) 的研究, CAD 漸漸在設計過程中扮演重要的角色。數位的表現 (performance) 主要有三個重要元素: 1. 將數位資訊轉化為可見形態的運算能力 (algorithm), 2. 使用者對運算所定義的參數 (user-defined parameters), 多以選單或輸入的方式呈現, 3. 機器 (machine), 如印表機、影像顯示或實體輸出。利用數位的表現對建築的陳述 (representation) 進行重構, 將會產生無限的可能性 (Mictchell, 1998)。然而在多數的 CAD 環境中, 所有繪出圖形的位置和屬性都必須要準確地被定義, 這樣的特性大大減低了設計的可能性, 因此電腦輔助設計系統大多都只能使用在設計的後期階段 (Goel, 1995; Gross, 1996)。Gross 提出了兩個電腦輔助設計軟體對設計者工作的最大障礙: 第一個是大部分的電腦輔助設計軟體都經不起抽象或曖昧的設計行為, 只能接受準確的線條與數值輸入; 第二個是電腦輔助設計軟體中大量應用的功能選單和調色板的操作過程都過於繁瑣 (Gross, 1996)。

Won (2001) 對設計者在概念設計階段中使用數位 (電腦輔助設計軟體) 和傳統 (手繪草圖) 媒材的設計思考進行比較, 使用傳統媒材來產生設計概念的認知行為顯得較為簡單並能夠更快速地產生更多的設計概念; 數位媒材則能快速形成有陰影效果 (shading) 的影像而傳統媒材則要花更長的時間。傳統媒材較為容許模糊而數位媒材較為具體。Lim (2003) 將設計者使用手繪草圖和筆式輸入 (Electronic Cocktail Napkin, ECN) 進行比較性的實驗, 並得到以下的結論: 筆式輸入的使用跟手繪草圖並沒有太大的差別, 而且利用電腦環境中繪畫可以將筆觸直接轉化為具體的數位立體影像; 因此, 設計者使用筆式輸入會得到更多的視覺回饋, 除了手繪草圖模糊的線條外, 同時會得到具體的數位立體影像。

### ■ The Electronic Cocktail Napkin (Gross, 1996) and The Right Tool at the Right Time (Do, 1996)

為了突破電腦輔助設計環境中固有的問題, 研究者提出在電腦輔助設計環境中利用筆式 (pen-based system) 的輸入方式進行手繪草圖。The Electronic Cocktail Napkin 的筆式介面提供一個可讓設計者直接在電腦上展開設計初步構想的繪圖工具。此系統提供辨認和分析圖像的運算能力, 容許手繪草圖的模糊和不完整性。The Right Tool at the Right Time 利用 The Electronic Cocktail Napkin 的原型發展成一個更完整的繪圖環境, 除了提供辨認的運算能力外, 加強了視線等的圖像分析能力, 更具啟發性的是嘗試讓簡易的等角透視手繪草圖轉化為立體的數位模型。

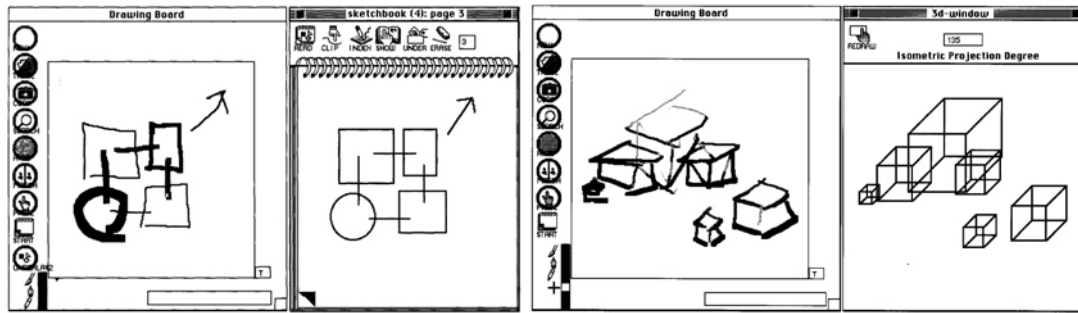


圖 6 The Right Tool at the Right Time 系統

### ■ Teddy (Igarashi, Matsuoka & Tanaka, 1999)

Teddy 提出一個手繪草圖介面，讓設計者可以簡易並快速地設計出自由形體模型：如填充玩具動物和其他又矮又胖的物件模型。設計者以筆式輸入的方式在介面上進行直接繪畫，系統便能建構出立體的形體，接著設計者可以繼續增加筆觸，系統會根據新筆觸跟已建的立體形體進行比對的運算，設計者接著對運算出來的立體形體作出不同功能的修改，系統提供的修改功能包括了擠出、切割、平順和變形等。除此之外，設計者可以在修改的過程中對立體形體的視點作出更改，方便設計者以不同的角度對形體進行修改。

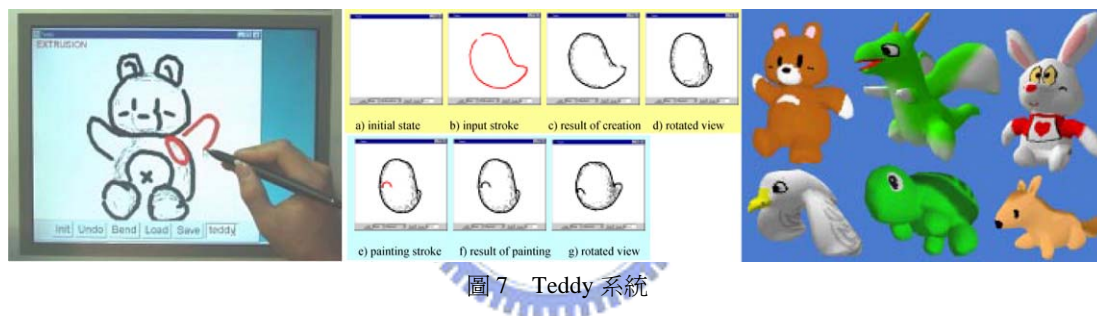


圖 7 Teddy 系統

### ■ Flatland (Igarashi, et al. 2000)

Flatland 透過筆式的輸入系統建立一個能應付辦公室不同活動和保留傳統白板簡易性的數位白板。一般來說，相對應於在電腦桌面上有效組織的活動，人們使用白板進行非正式，無組織的活動。Flatland 的輸入和輸出形式皆為「筆觸」(strokes)，使用者在介面上輸入手寫筆觸，系統會對筆觸進行不同行為的詮釋，同時以手寫的筆觸形式回應。由於利用白板的非正式活動是有變動性的，Flatland 提供了動態分割 (dynamic segmenting) 和可對不同的行為 (behaviors) 作出回應。不同的行為包括了清單列表行為、地圖繪畫行為、平面幾何繪圖行為、立體繪圖行為和計算行為。除此以外，Flatland 記錄持續的工作歷史，並提供復原和重做的功能。



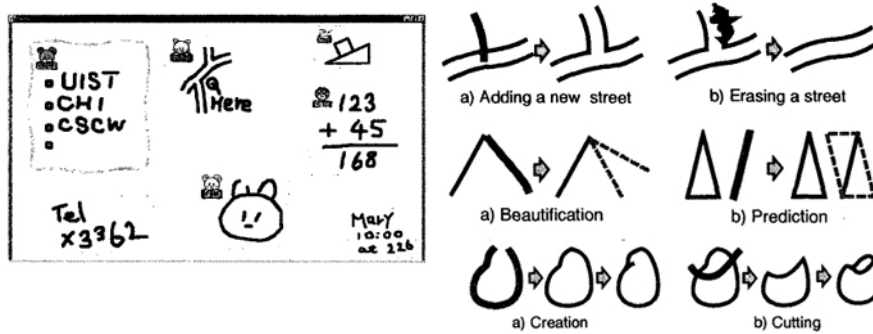


圖 8 Flatland 系統

■ Sketch-based interaction within virtual environments (Bimber, Encarnacao and Stork, 2000)

Bimber 等人嘗試讓手繪草圖合併到人機互動介面 (human-computer interface) 中，這個像桌子的投影系統 (table-like projection system) 讓設計者輸入具指認性的立體手繪圖像語言 (3D-sketch language) 並透過運算將圖象轉變為簡單的立體物件。立體手繪圖像語言都是以線條和點的組合構成，例如一條橫線上面加一點便會詮釋為面狀三角形、一個正圓內有一個扁的橢圓形則會詮釋為立體球體等。

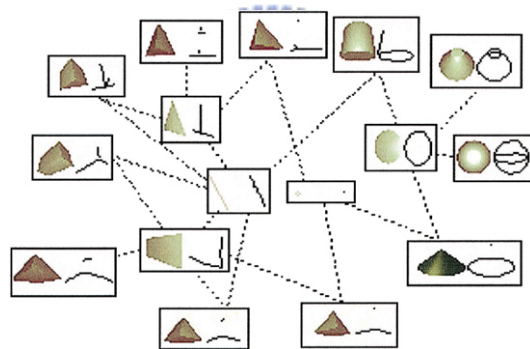


圖 9 Bimber 等人 (2000) 發展的 3D-sketch language

■ VR sketchpad (Do, 2001)

VR sketchpad 是筆式的輸入環境，以草圖的輸入來建構 3D 的物件，設計環境同時提供透明的圖層讓使用者作快速的輪廓描繪。3D 的物件透過三種對草圖辨識的方式產生：對簡易線條和球狀的擠壓成形、對幾何原形圖像的立體轉換、以及對特定圖形形態進行辨識，並轉變成在圖庫中已預先建構好的立體物件。

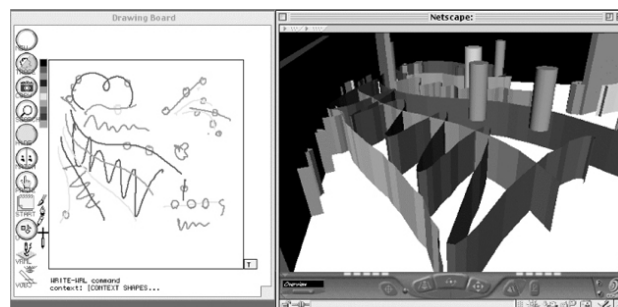


圖 10 VR sketchpad

### ■ Space Pen (Jung, Gross and Do, 2001)

Space Pen 提供使用者在虛擬立體的環境中進行註解和徒手繪圖的合作式工作系統 (collaborative work system)，讓數名在不同地方的使用者能同時透過網路上的立體繪圖環境進行設計的討論，使用者利用筆式的輸入方式在虛擬的模型上作註解，和以徒手畫的方式繪畫草圖，並可利用辨識的功能產生形體，同時提供在虛擬環境中漫步 (walkthroughs) 的功能。



圖 11 Space Pen 系統

### ■ FreeDrawer ( Wesche and Seidel, 2001)

FreeDrawer 是一個在虛擬環境中的立體自由形體手繪系統，設計者使用追蹤尖筆作為輸入裝置，描繪出三向度的筆觸作為數位模型骨架的立體曲線網狀系統；使用者可同時利用雙手對曲線或其產生的外殼皮層進行互動性的編輯。編輯的功能包括了對線條的複製、移動、刪除、平順和銳利。FreeDrawer 的使用對象主要為有繪圖能力的設計者，而且直接的空間 (3D) 繪圖需要更多空間性的想像。

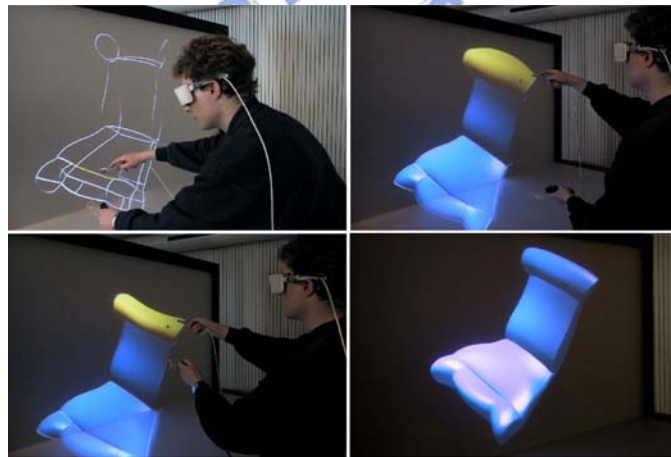


圖 12 FreeDrawer

### ■ Sketchand+ (Seichter, 2003)

Sketchand+企圖在擴增實境 (augmented reality) 的環境中建構出一個實驗性的立體手繪草圖原型。互動式的擴增實境範例是透過 ARToolKit 擷取實體的記號 (marker)，系統讀取記號後便會在記號的位置上產生虛擬的影像，這樣的系統主要會應用在建築基地的工作模型上，依照不同的記號顯示出不同的數位模型，設計者更可以直接以立體手繪的方式修改記號上的數位模型。

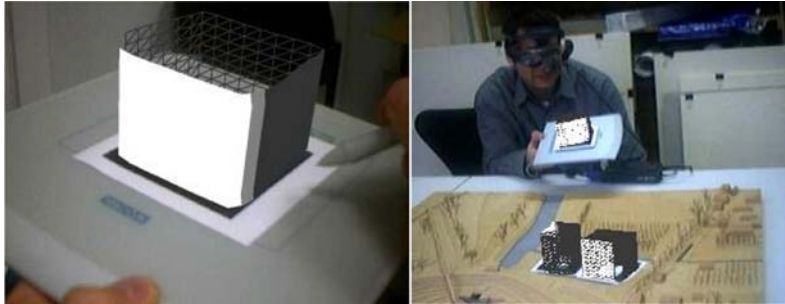


圖 13 Sketchand+系統

### ■ 3D Reconstruction of Polyhedron (Guena and Untersteller, 2006)

Guena 和 Untersteller 提出了利用透視投影法對手繪草圖生產出數位模型。這個系統建構在 AutoCAD 的環境中，使用者首先將手繪草圖的影像載入，並在繪圖環境中描繪多面體草圖的邊緣，用粗線描繪正面可見的線而用細線描繪背面隱藏的線。建立數位模型的判斷包括以下三階段：1.根據線條的方向和交集點的位置進行判斷，建立面狀限制；2.修正繪圖資料，建立平行與消點的限制，經過系統的判斷後，使用者可以透過介面接受或對線條進行修改並重新判斷；3.建立數位的多面體模型。

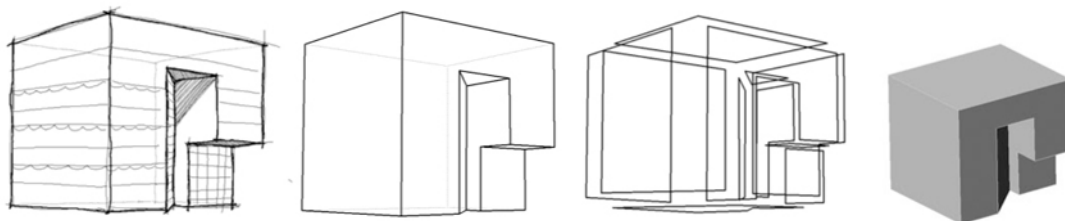


圖 14 Guena 等人以運算的式對透視草圖生產成數位模型

### ■ Front (2006)

FRONT(2006)利用多台攝影機的空間定位，讓設計者以手繪的方式在立體的環境中設計家具，設計者直接在空間內揮動手上的畫筆，系統會對這條手繪連續的空間線條記錄下來，線條會被系統轉化成有厚度的數位線狀形體，並直接利用電腦數字控制機器（computer numerical control, CNC）輸出實體模型。利用 1:1 操作的家具設計除了家具的線條呈現個人化的手繪效果外，最顯著的貢獻是設計者能以個人尺度作為大小的參考描繪出適合自己的家具。



圖 15 FRONT 讓設計者直接在空間設計家具，並利用 CNC 輸出為實物(2006)

## 2.3 電腦輔助製造 (Computer-Aided Manufacture, CAM)

### 2.3.1 CAD/CAM 在建築上的應用

對建築師來說，實體模型並不只是使用在設計完成後表現造型的階段，並提供設計者在設計過程中看到並思考空間性（立體）問題的一種設計媒材。從設計過程來分類，設計模型主要應用在初期設計、實驗設計和完成設計三個階段：1.初期的設計模型類似即興創作，通常都不會依照特定的比例或一般的材料，務求在最短的時間內完成。2.在後續的設計過程中的製造比例模型作為測試、變形和比較等目的都可被分類為實驗階段的模型。3.在設計定案後所製造的模型；這階段的設計模型是根據正式圖面的尺度而建造的，是將來被建成的實體建築物的縮小版（Janke, 1968）。

1990年 Frank Gehry 開始以 CAD/CAM 輔助建築設計的過程，建造出自由形體的巴塞隆納魚形雕塑。此後，設計者開始運用 CAD/CAM 的技術在實體模型與建築實體的生產與構築上。數位製造（digital fabrication）開啓了讓建築設計者對材料的知覺特性（特別是視覺特性（visual characteristics））和製造方法重新思考的可能。CAD/CAM 技術容許了大量客製化（mass-customization）的能力，突破了生產與成本的問題，數位的影像和實體相繼的成為可能並大量刺激了人類的想像力與感知（Sliwka, 2004）。

CAM 的數位工具包括了平面製造法（2D fabrication）、減法製造法（subtractive fabrication）、加法製造法（additive fabrication）和成形製造法（formative fabrication）四種。平面製造法是在一定厚度材料上將數位檔案內的平面資訊切割成形，主要使用在攤平的三角化表皮或平面的骨架上。減法製造法利用將原材料的一定容積拿掉，主要作為製造立體化表皮或牆面的模子使用。加法製造法的原理是將多層有厚度的平面材料疊在一起形成立體的形體。成形製造法是直接對材料進行加熱或蒸汽法讓其在變態的狀況下給予限制條件使其成形（Kolarevic, 2001）。

數位化的設計過程主要依賴於數位的模型與模擬所帶來的空間概念，這樣可以讓設計者輕易的了解並利用 CAM 的技術將數位模型輸出為實體模型（Lim, 2004）。在數位自由形體設計上，電腦軟體扮演著重要的角色，除了利用數位設計工具在設計過程基本的操作外，對數位模型參數（parameters）的設定可有效控制形體的外形，而更動態的設計方法則是控制設定動畫（animation）的關鍵畫面（key-frame）（Gao, 2004）。

在數位化的設計過程跟數位工具的應用有著相對應的關係，例如 Gehry 的數位設計過程使用了 3D scanner 將手工的概念模型數位化，而 CNC 則大量使用在自由形體的製造過程，而他同時開發了一個利用 CAD/CAM 媒材（Digital Gehry）而建構的基本設計與建造流程。Greg Lynn 的數位設計過程則利用 RP 將數位模型直接輸出為實體模型。而 AleppoZone 則使用 RP 與鐳射切割等技術製造骨架與表皮的構件。CAD/CAM 的應用改變了建築設計者在建築設計和製造過程中的角色，從前建築師和工程師在設計與建造過

程上是分工的關係，然而在 CAD/CAM 應用下建築形體變得複雜化，這樣的變化讓設計者有機會參與整個建築設計到製造的過程（Lim, 2006）。

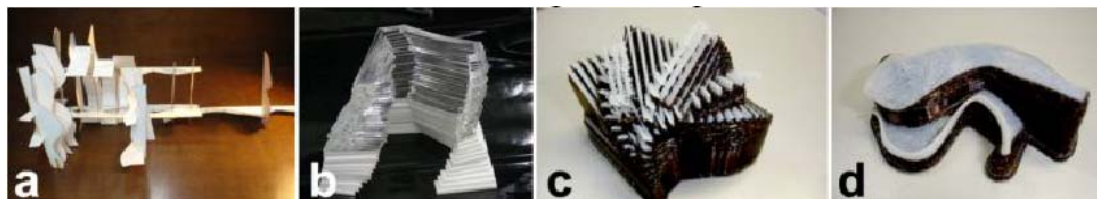


圖 16 在設計過程中利用雷射切割機和快速成型輸出的實體模型（Lim, 2006）

然而電腦輔助製造（CAM）在設計過程中實體模型的生產依然有其限制，電腦輔助製造（CAM）在提供高效率輸出的同時往往是單一性（homogeneous）的材料，這樣有違了過往對傳統材料應用的冒險性，同時違反了對高技巧生產製造本質上的意義與期望。當受到偏離常軌的材質，形體或技藝（craft）的挑戰（challenge），這樣才能轉化為創新的發現。對數位工具不同形式的阻力的介入與製造問題是需要的（Harrop, 2004）。

### 2.3.2 CAD/CAM 在不同領域上的應用

Schnabel 和 Kwan（2004）以教學內容的方向提出了一個讓實體與虛擬媒材交錯使用的循環設計過程：學生首先選取一個實物，利用 3D 掃描器掃描實物或在空中快速掃過並產生數位立體模型，之後學生便能在自己選取的數位軟體中修改模型，編輯過的數位模型再利用快速成型技術（rapid prototyping, RP）輸出成實體模型，學生可以對實體模型再進行手邊的修改，並重複以上的步驟直到設計結果滿意為止。讓媒材結合的使用讓學生透過循環的過程自由地產生和詮釋不同的形體和空間，並透過不同的媒材減小設計者想像與設計表現（representation）間的落差。

Lyon（2006）提出了組裝式數位表皮的设计過程：DFM（design for manufacturing）是典型的啟發式（heuristics）並提倡發展模矩化的設計。其研究企圖從實作的設計經驗中得到製造的知識，研究包括了讓設計者設計出不同的數位表皮，挑選不同的材料與製造方式再進行合理化的修改，最後輸出成生產的資料並製造出來，生產出包括單一輸出與組合化的設計製成品。而這樣對設計經驗與知識的獲得是需要長時間持續進行的。

由於現在快速成型技術（RP）所生產出的模型由於尺度的限制，不太適用於建築空間與形式的發展過程，Design for Assembly（DFA）提供了利用一般的 3D printer 生產出更大的組裝式的實體模型。製造過程包括了四個階段：組裝方式設計、組裝方式測試、生產組件和實體組裝。組裝設計跟別的任何設計都一樣，是一個 trial and error 的過程。組裝設計中最重要的要點是盡量減少組件的數量，其目的是可讓人手直接組裝元件而不需要利用別的工具與組合構件（Sass, 2004）。

Trusset 是一個結合結構系統和 agent-based 的設計軟體，結構系統指的是設計出與別不同的空間桁架，此空間桁架可以利用電腦數字控制（CNC）的線性切割工具（例如雷射

切割器和 three-axis mills) 生產出實體的組合元件；而透過 agent-based 的設計工具則輔助發展適合於建構空間桁架系統的建築皮層 (Anzalone and Clarke, 2003)。

透過使用 CNC 作為教學工具，ETH Zurich 開設了讓建築學生參予的景觀設計課程，主要的目的並不是讓學生們成為 CAD/CAM 技術的專家，而是讓他們熟悉景觀設計和了解到介入大尺度地景會遇到的問題。學生在 MAYA 的環境中利用 NURBS 的方式建模，並利用銑床 (CNC mill) 的方式生產成實體模型。課程的最後階段學生要對地景中的各元素進行定義：包括了循環系統，邊緣，面，材料，植栽和土壤種類等。除了利用數位技術外，學生們同時要建造地景的沙模 (sand model)，讓學生了解不同設計媒材的不同特性 (Kapellos, et al. 2006)。

在建築裝飾 (ornament) 的數位化的討論上，Breen 和 Stellingwerff (2005) 認為新的數位技術讓建築裝飾 (ornament) 有了新的展望與發展，其中包括了結構、皮層和細部等的層次。並說明了裝飾 (ornament) 與裝璜 (decoration) 的差別性。建築裝飾是跟建築本身共同產生的，是為美學的考量有技巧地組合在建築的其中一個部分。裝璜則是建築的附屬品，是原本分離的修飾品，並加裝在建築物之上。透過利用雷射切割、銑床和立體成型 (laser cutters, milling machine and 3D-printer) 等技術，Delft Form & Media Studies Group 最近成立了 CAMlab (Computer Aided Modelling laboratory)，以工作營的方式讓學生進行有關建築裝飾 (ornamatics) 的設計。工作的流程包括了手繪草圖→數位模型→輸出的檔案→鑄造→實體模型。Elys(2006)闡明了應用影像位移製圖 (image displacement mapping) 在製作電腦遊戲中多邊形模型的自動化操作，並提出數位裝飾可以利用電腦數字控制機器 (CNC) 進行生產。



圖 17 Breen 和 Stellingwerff (2005) 一系列的建築裝飾設計操作

Schein (2002) 發展一個可以透過 splines (NURBS) 的參數控制生產出不同型態的座椅，並能將座椅攤平並讓電腦數字控制 (CNC, computer numerical control) 在平面的夾板上直接輸出。經過輸出後，使用者可以把夾板上預留的小孔銷上並折成立體的座椅。設計步驟主要包括運算出簡單對稱的幾何圖案，調整圖案上 splines 的參數形成不同的立體形體，再根據形體的形狀假釋物件的功能和尺寸。確定參數與尺寸後便可以將資料儲存並產生平面的待輸出的圖形，經過 1:10 的實體模型測試確定沒有問題後，便能在待輸出的圖形上畫上小孔並進行 1:1 的輸出。

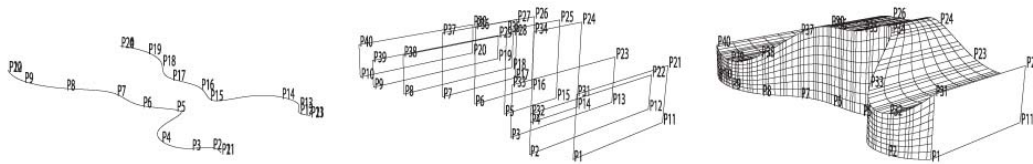


圖 18 利用參數控制生產的座椅，並可以攤平在 CNC 機器中輸出 (Schein, 2002)

雖然並沒有利用 CAM 的機器輸出為實體模型，以下兩個運算案例有結合 CAM 技術發展的潛力。van Elsas and Vergeest (1998)建立一個叫做位移特徵函數 (Displacement Feature Function, DFF) 的新函數，在概念設計的過程中，設計者首先建立一個突出或壓低的面狀，再控制函式內的參數對面狀進行修改。

另外一個是利用細胞自動運算 (Cellular Automata) 的方式，在立體的格子陣 (lattice) 中以一直在變化的實體與虛體的規則排序並產生量體，形成建築的基本型態。Krawczyk 建立了讓基本型態變形的詮釋規則，包括了細胞的變形 (variation of unit shape)、外殼的變形 (envelope interpretation)、細胞支撐 (cell supports)、量體轉化成樓板、細胞面積隨機變化 (cells of random size) 與細胞端點隨機移位 (cells with random offset of vertices) 等，並詮釋出不同形體增加建築的可能性 (Krawczyk, 2002)。

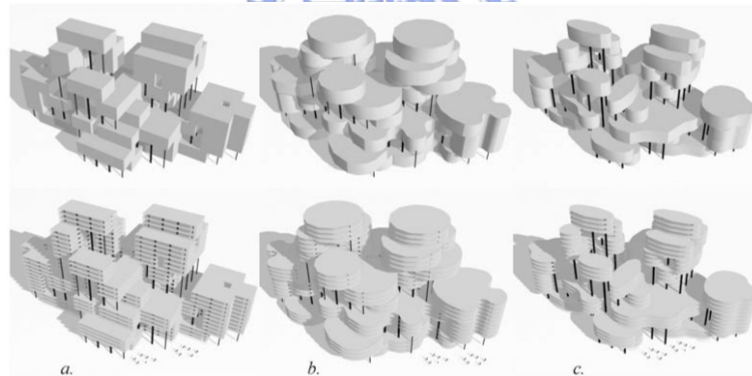


圖 19 利用 Cellular Automata 的機制運算出建築的形態 (Krawczyk, 2002)

Kai 和 Russell (2005) 發展出一套完整的生產過程，包括了從產生數位建築裝飾模型到在電腦數字控制機器 (CNC) 製作實體模型。敘述了三種產生建築裝飾模型的方法：第一種是在 3D 電腦輔助設計軟體內直接操作建模 (modeled)、第二種是利用程式 (programmed) 直接運算出拓樸 (topology) 模型、第三種是以相片作為參考 (image derived) 並透過程式運算將影像轉換成拓樸 (topology) 模型。

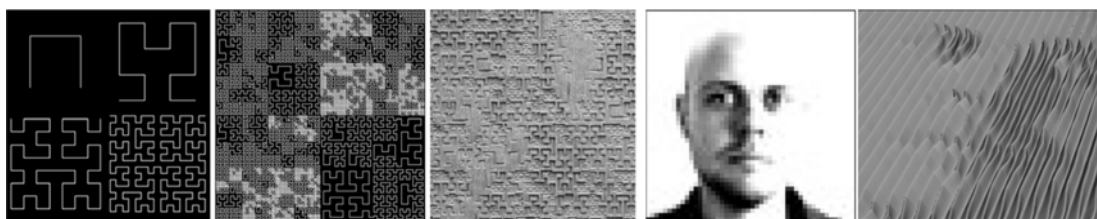


圖 20 左三張圖是利用程式運算出的紋理，右兩張圖是運算影像轉換為數位模型 (Kai and Russell, 2005)

Kilian (2003) 利用對數位模型進行運算和鐳射切割的方式去製造出以立體拼圖組合成的表皮；透過八個斜率運算出一個空間曲面，再使用另一個指令將空間曲面攤平成若干數量有拼圖接縫的平面條狀。有接縫的數位模型可進行簡單的材料耐力測試，並對接縫進行微調。對拼圖相接的運算要求並不需要十分的準確，互相可以組合即可。經過微調後，有拼圖接縫的條狀便能在鐳射切割機上輸出，並進行簡易的人工組裝。

Dritsas(2005)發展出的 MiranScript 是輔助數位形體被自動化切割成可輸出剖面的數位生產 (digital fabrication) 運算程式碼 (script)。設計者需要先建立 NURBS 立體面狀和定義一系列的運算參數 (包括了運算切割的方向和間距等)，接著 MiranScript 便能對立體面狀進行切割和構築的運算，立體面狀的剖面形成一片一片平面的自由邊緣面狀，而平面面狀間間隔會計算在底座上的縫隙，當這些平面面狀和底座等構件透過 CNC milling 輸出為實體的面板後，便能根據底座面板上縫隙的間距準確地組合成跟原本 NURBS 立體面狀一樣的形態，而且這實體模型已經經過了構築術 (tectonic) 的考量。

Bechthold (2004) 利用對結構性表皮進行材料效能與應力的運算，發展出利用 CNC 技術所生產的材料與木材或混凝土結合的雙曲面表皮。這樣的表皮雖然在應力測試上比實心的木材或混凝土板稍為弱一點，但其重量、手工的複雜性與價錢都是較有效益的。

Goldberg(2005)對材料的不同彎曲率 (flexure) 特性進行研究，提出了在鐳射切割機 (laser cutting machine) 生產出平面的模板，而製成的模板在接受彎曲時當力量超過材料的門檻值後便能永久變成雙曲面結構體。Goldberg 主要透過兩種建模的方法：在數學軟體建構參數式和利用 script 的方式在 AutoCAD(Visual Lisp)建立此參數式的彎曲模型樣式。被建立的模型樣式類似重複性的圖案，實驗中用了 2mm 的三合板和 4mm 的鋁板 (在 Omax Water Jet machine 上切割) 進行測試。攤平後的數位資料利用鐳射切割機將圖案不要的部分切除並讓模板可作預期的彎曲測試。

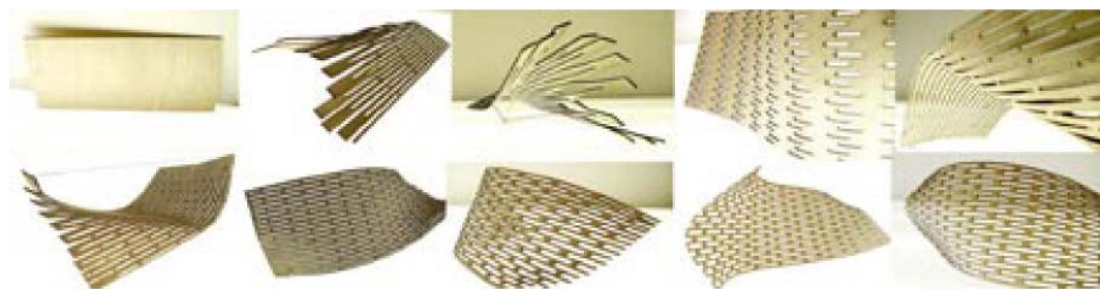


圖 21 透過數學運算並在鐳射切割機輸出的雙曲面設計模型 (Goldberg, 2005)

Loukissas 和 Sass (2004) 嘗試結合運算與快速成型 (RP) 的操作，主要生產出三種空間形態：第一種是數值的控制，透過光源的運算產生出不同深度與寬度的開口的模組；第二種是形態的控制，開展兩個不同的曲面方程式並利用運算將其結合形成新的曲面；第三種是環境的控制，結合前兩種的運算特性，形成有大小不同開口的自由曲面。這些



的空間形態模型經過轉檔的運算後利用快速成型技術輸出成爲實體的模型；這樣的運算方式提昇了數位設計過程的可能性。

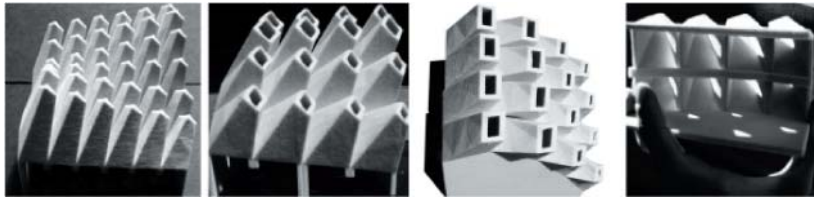


圖 22 透過結合光源和形態控制的運算產生出實體模型（Loukissas and Sass, 2004）

配合 RP 技術的應用，Finite Element Analysis（FEA）工具核算實體設計的數值並製造出設計的原型與實體模型。Hanna 和 Mahdavi（2004）試圖首先建立出微細構造組織的原形，並利用 FEA 工具對其結構上的幾何學（geometry）和地誌學（topology）進行運算，根據在 FEA 所得到應力的分佈，再對微細構造的組織進行變形。



### 3. 詮釋方式與 Spatial Charcoal 系統設計

#### 3.1 案例分析

手繪草圖主要應用在設計概念發展的階段，而空間詮釋 (spatial interpretation) 是將平面的手繪草圖轉化為空間形體時重要的概念，其轉換 (conversion) 的概念並沒有特定的限制，主要取決於設計者對平面與空間之間對應的想像能力。手繪草圖的空間詮釋也可以被理解為平面轉化為立體的再重現 (representation) 或 mapping 的過程。在詮釋的過程中，設計者會以特定的詮釋方式選擇性地將平面上的元素轉換成為立體的形體；除此之外，詮釋的概念會因為繪圖投影法、繪圖工具等的不同而改變，而不同的設計者因對手繪草圖中元素認知的不同也會形成詮釋方式很大的不同，本部分針對設計者在設計概念發展階段所應用的傳統手繪草圖與詮釋方式進行分析，整理的資料主要有兩個方面：1. 找出手繪草圖的特性；2. 手繪草圖與立體物的詮釋關係。為了對以上提及的兩個方面進行分析，會對五位建築大師 (El Lissitzky, Hermann Finsterlin, Le Corbusier, Frank Gehry 和 Zaha Hadid) 的手繪草圖進行分析，找出其繪畫的特性，進而比較其手繪草圖，設計圖面與實體建築物間的空间關聯。

Lissitzky 是構成主義 (constructivism) 畫家與建築師，其繪圖和空間設計物有其強烈的關聯性與風格。Finsterlin 是德國表現主義 (German expressionism) 的畫家與幻想建築師，其繪圖風格呈簡單的一筆畫曲線，而其實體模型更是由活潑形體組合而成。Corbusier 是現代主義建築大師，其手繪草圖的應用層面很廣，包括旅遊記錄、概念構想和設計發展。Gehry 是數位建築先驅，其手繪草圖以鋼筆繪畫為主，繪圖時輕輕的順著墨水的線條而很少把筆提起，線條呈現強烈的流動性。Hadid 的繪圖線條有強烈的方向性，其概念設計階段的繪圖帶著近乎瘋狂的爆發力。

##### 3.1.1 Lissitzky 的手繪草圖分析

Lissitzky 沒有進行大量的建築工作，他花很大時間在書籍，海報與影像拼貼的工作上。1919 年他開始了一系列同時是兩度又是三度的計劃 “Prouns”，Prouns 是一種介於繪畫與建築之間的藝術領域。他企圖探討如何在空間中理解造型元素，以及找尋簡單幾何形體關係；以簡單的線條、平面和立方體為畫面的基本組合。

選取的手繪草圖是 Lissitzky 對 Proun 的一張練習圖 (圖 23a)，構圖上出現長方形，菱形和三角形等幾何圖形。不同深淺和圖形重疊的關係讓圖形間產生三向度的提示。相較於這張以鉛筆徒手畫的 Proun，Lissitzky 繪成的 Proun 完成品 (圖 23b) 除了黑白灰深淺的比較外，還會加入色塊，讓簡單的圖形間產生更豐富的構圖和表現立體空間的資訊。圖形間除了正交的線條外，還出現斜交的線條，讓觀者在垂直投影的圖面上看到等角透視投影所產生的視覺混亂。Proun 的概念除了應用在繪圖外，同時也反映在室內 (主要為展覽設計) 與建築上，在選取的室內展覽設計圖中 (圖 23d)，Lissitzky 把一張透視

圖顛倒，將地面的平行四邊形並置到另一張沒有顛倒的透視圖的地面上，反映了一個房間的整體環境。在建築方面，Lissitzky 在他的 Wolkenbugel 計劃（“horizontal skyscrapers” 地平線上的摩天大樓）中（圖 23e），展示了三個巨型方形柱子頂著一個巨大的水平方管形大量體。量體間些微樓層差異所形成的高差與接合的方式反映了 Lissitzky 在手繪草圖時深淺圖形可能形成的立體關係，而在草圖畫面上的直線與斜線所形成的方形與平行四邊形，則類似室內設計中不同面狀間轉向的關係。

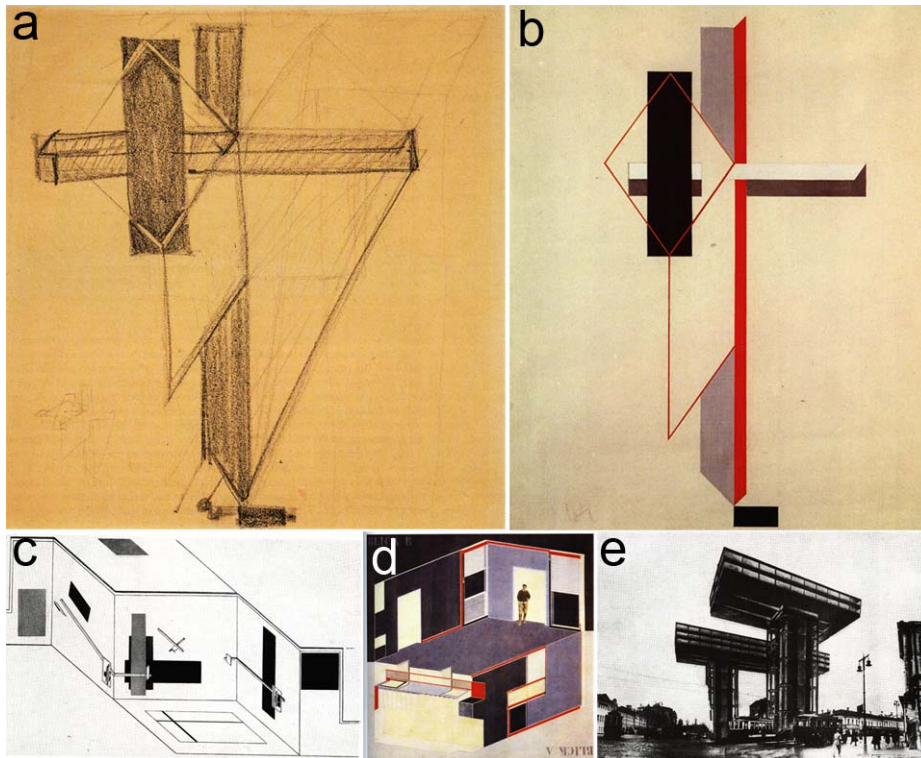


圖 23 Lissitzky 的(a)手繪草圖，(b)平面作品，(c)(d)室內的繪圖，(e)建築的繪圖

總結來說，Lissitzky 在草圖上繪畫不同深淺的簡單形體，加上直線與斜線；形成了量體的高低與重疊，以及向度的轉換等空間詮釋的可能性。

### 3.1.2 Finsterlin 的手繪草圖分析

Finsterlin 為畫家和幻想建築師，他對建築的想像主要停留在畫面上，還包括了少量的石膏模型。他的繪畫以大量的曲線構圖為主，幾乎看不到任何一條直線，表現出抽象的自然有機形體。選取的草圖（圖 24a）顯示出 Finsterlin 探索形體的創造性過程，在半透明的草圖紙上不斷以一筆畫的方式，繪畫出一系列的環狀與抽象的線條。這種潦草而彎曲的線條讓人聯想到潦草的書寫，以近乎瘋狂的動作繪畫出快速、順暢的曲線。很明顯的是，Finsterlin 從他在設計過程中意外因素的出現，透過認知與視覺思考中對圖形相似與組合的理解，他可以從這些模糊的線條中找出任何可能發展成具體形體的機會。從這張草圖中，Finsterlin 更框選了數張有待發展的草圖線條，並開始對原本的一筆畫線條上加上海平線和陰影等空間想像的資訊。

Finsterlin 的建築想像圖（圖 24b, c）可以清楚地看出跟草圖的轉換關係，一筆畫的線條形成了有機形體的邊緣輪廓，而在草圖上的線條重疊關係則被轉換成爲量體間的前後關係。從建築的理解上看，Finsterlin 較注重於有機形體的塑形上，對建築機能與材料的思考主要只有反映在對完成畫像的命名上，如演奏廳等。Finsterlin 同時會爲建築想像圖製作實體的石膏模型（圖 24d, e, f），類似於想像圖面的表現，其模型充滿了豐富的色彩，展示出活潑而生動的有機形體組合關係。

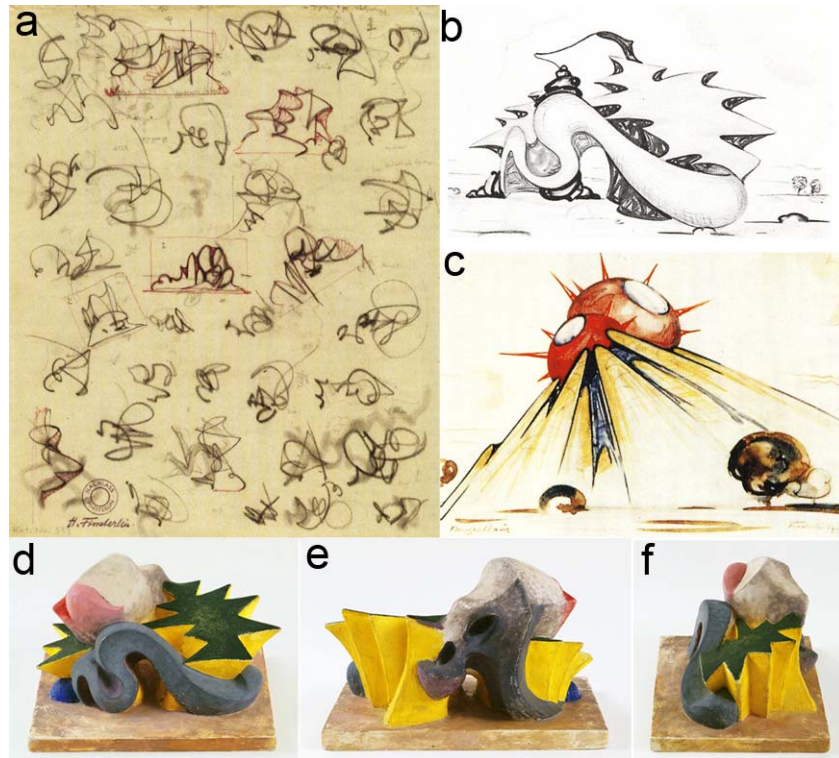


圖 24 Finsterlin 的(a)手繪草圖，(b)(c)建築的想像作品，(d)(e)(f)建築石膏模型

總結來說，Finsterlin 的手繪草圖呈現一筆畫、潦草而彎曲的線條，其空間詮釋的方式是讓線條成爲有機形體的邊緣，而重疊的潦草線條會被分解爲前後有層次的空間關係。

### 3.1.3 Corbusier 的手繪草圖分析

Corbusier 的手繪草圖應用很廣泛，包括了旅遊記錄、概念設計想像與設計過程推演；而且討論其手繪草圖的研究數量很多。本部分的資料主要從 Herbert(1993)對廊香教堂手繪草圖的先前研究整理出來並進行分析。

Corbusier 在設計初期階段中的手繪草圖主要以平面圖的線條操作爲主，並以透視與剖立面草圖作爲輔助。繪畫平面草圖的工具主要在描圖紙上以鉛筆、彩色鉛筆和炭筆進行。選取的手繪草圖(圖 25a)被認爲是 Corbusier 在廊香教堂的設計過程中的首張平面草圖，繪圖的工具是炭筆，紅色鉛筆和較厚的描圖紙。雖然只是第一張平面草圖，這張草圖是有繪圖比例的。由於使用炭筆的原故，筆觸的壓力與方向會形成線條的深淺與粗細，同時手在移動的過程中會觸碰到已在畫面上的線條上的炭粉，形成了線條散開的狀況；此

外，Corbusier 有試圖用手或橡皮擦擦去線條的某些部分，來表現空間中的開口。炭筆的特性是當被擦去時，會留下區域性灰階的痕跡，形成了除了畫面中線條有深淺粗細之分外，在其餘應該「空白」的地方也有深淺之分。

從空間的理解來看，粗黑的線條就是表現空間上牆面的位置，而將手繪草圖局部放大來看，會發現代表廊香教堂主要牆面的四條粗黑線條都不是單一筆觸構成的。每條所謂單一的線條都是由數段筆觸構成，足以證明 Corbusier 在繪畫平面線條的同時是進行著空間思考。而且這樣數段筆觸所形成的線條，加強了線條不同粗細的機會。相較於最初的手繪草圖，越後期的建築圖面（圖 25b, c）顯得越來越準確與清楚。雖然 Herbert(1993)認為首張平面手繪草圖中因思考而不斷重覆筆觸而形成不同粗細的線條，跟最終廊香教堂牆面厚度出現極大的變化性沒有直接的關聯，卻不能否定使用炭筆繪畫加強了畫面與線條以及對設計者在空間概念思考上的變化性。

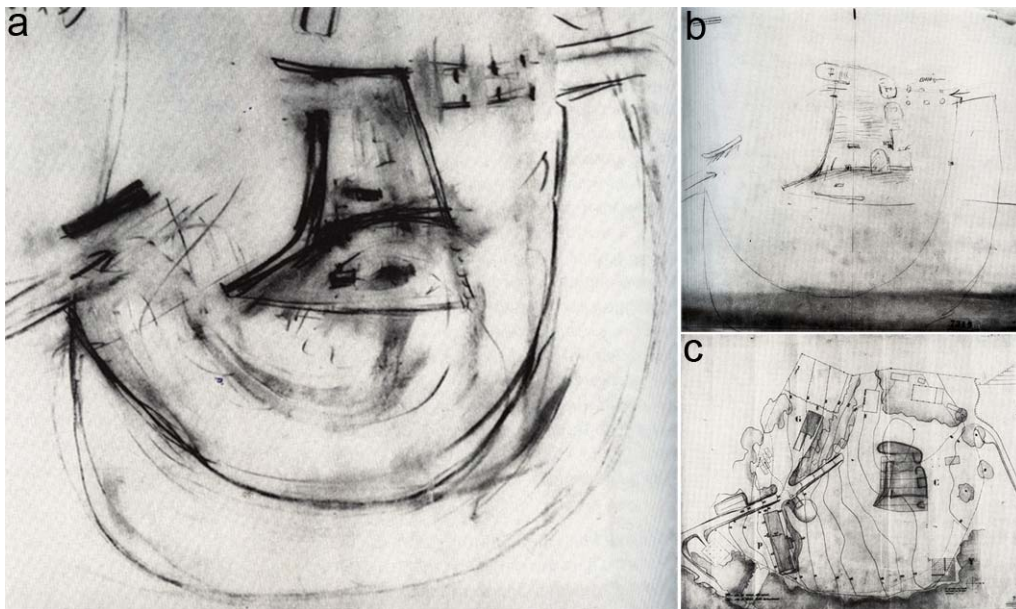


圖 25 Corbusier 在廊香教堂設計中的平面(a)手繪草圖，(b)設計圖，(c)完成圖（Herbert, 1993）

總結來說，Corbusier 以有比例的平面手繪草圖開展設計的初步構想。運用炭筆提供了線條變化的更多可能性，同時採取了用手或橡皮擦擦掉的方式，讓畫面呈現出除了線條的變化外，形成了其餘空的地方不同的深淺。雖然不能指認炭筆草圖對最終設計空間形體的直接關係，這些線條與畫面的深淺，粗細等的變化不能否定地是可以反映出空間上牆面的粗細，空間明亮開放等不同的資訊。

#### 3.1.4 Gehry 的手繪草圖分析

Gehry 主要以鋼筆繪畫手繪草圖。Gehry 的建築設計過程大量依賴數位工具運算技術與不同材料的實體模型。然而他在設計的過程中仍然不間斷的繪畫草圖，對 Gehry 來說，手繪草圖並不只是認知決定的工具，在繪畫時思想與手移動間的互動關係，手繪草圖成爲了他創造的酵素，是他對建築與塑造形體非常有效的工具。

選取的手繪草圖是他在設計畢爾包古根漢美術館時對立面設計的三張手繪草圖（圖 26a）。Gehry 手繪草圖的種類也包括一定數量的平面草圖，但他會習慣性地繪畫更大量的立面草圖；這反映出了他對建築外觀形式看得很重。Gehry 習慣輕握著鋼筆並順著墨水描繪出輕快的線條，他很少會把畫筆提起離開畫紙。Gehry 手繪草圖的流暢度與筆觸來回擺動的方式更接近於雕刻家拿著雕刻刀塑造形體的行為，手繪草圖本身表現出對形式與量體不斷找尋的結果。經過了流暢性線條繪畫出空間實體的輪廓後，Gehry 會在某些線條旁以快速來回的筆觸畫出陰影的部分，來加強三向度立體的視覺效果。Gehry 在立面草圖中會自然地畫出地平線；在這三張草圖中，屋頂與中間的形狀看起來有些不同。中間較右邊的草圖屋頂上表現出有三角形的元素；最上面那一張的屋頂上則呈現弧形元素與一個階梯狀的立面；下面那一張在屋頂上則出現較平緩的線條；而下面兩張草圖可以看出在中間部分有連續的斜線，它們可能是 Gehry 對形體不滿時想要劃掉的線條，也可能有其他紋理或陰影上的意義。

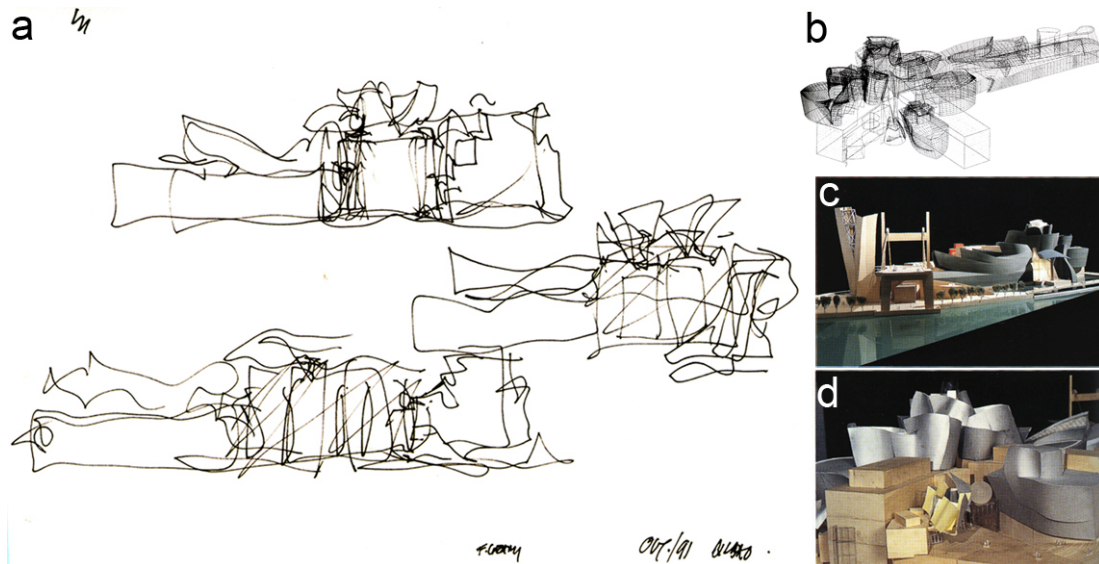


圖 26 Gehry 的(a)手繪草圖，(b)電腦繪圖，(c)(d)設計模型

總結來說，Gehry 的手繪草圖在他設計過程中扮演著塑造形體非常重要的工具，他的手繪草圖線條非常流暢，並表現著大量的空間資訊，清楚地地平線，大量形體相互交錯，一些陰影的描繪可能表達出向度的變化；根據 Gehry 的實體模型與建築完成品中的表現性，說明了在手繪草圖內再怎麼複雜的線條組合關係都是可以被空間詮釋為很瘋狂的實體形態的。

### 3.1.5 Hadid 的手繪草圖分析

Hadid 的手繪草圖充滿了方向性，碎裂的圖形，和流動性而有力量的線條。相對之下，她的建築形式也同時充滿了方向性，傾斜而尖銳的牆角，歪七扭八的柱子等很強烈的空間感受。

選取的手繪草圖是 Hadid 在 Vitra 消防局的設計中初步構想的手繪草圖（圖 27a），繪圖的工具是鋼筆，水彩顏料與筆刷。草圖中的線條以鋼筆先畫出線條，再以筆刷塗上顏料畫出陰影的部分，線條由於較窄的尾巴形成了一種尖銳的線條。而整張草圖就是這些不同方向的線條互相交錯，轉折，退縮等構圖出來的結果。Hadid 概念草圖一般的片斷與碎裂的特性在這裏都有清楚地表現出來，圖形上的線條可以被理解為空間實體中傾斜，尖銳的牆面，畫面上的陰影更可以顯示為牆面傾斜的方向或厚度。除了因寬度改變而形成尖銳的線條外，畫面上還有虛線，分叉和交錯的線條的出現；這些在草圖上穿孔，傾斜，中斷與交錯的特性也正好反映出空間實體間的關係。虛線在繪圖的習慣上可以被理解為頭頂物（即屋頂）的部分，而在畫面的底部的交錯的線條則跟最終的建築物中歪七扭八的柱子或窗框的形式有點類似。

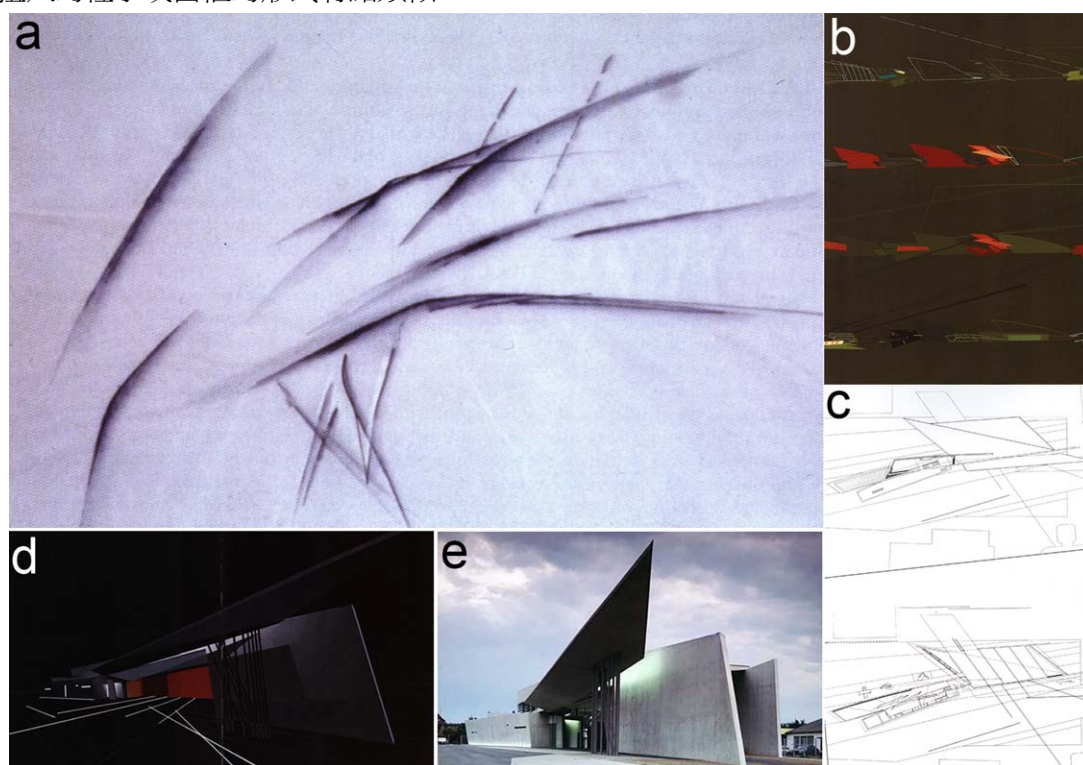


圖 27 Hadid 的(a)手繪草圖，(b)概念發展平面圖，(c)兩張完成平面圖，(d)表現透視圖，(e)建築物

總結來說，Hadid 的手繪草圖顯得相對地簡潔，更有點像 diagram。畫面間主要以線條間的穿插，傾斜，中斷等方式而構成，水彩刷子把線條變柔和，改變了線條的不同厚度，同時讓線的尾巴變得尖銳。顯然地，這些簡單的線條構圖清晰的表達了在空間上牆面間穿插，傾斜和中斷等的形體組合。

### 3.2 手繪草圖特性與空間詮釋的關係

本研究將一般手繪草圖的基本特性分為五種：1.形狀輪廓：以封閉線條或以色塊定義出來的區域；同時，手繪草圖的模糊性可能使一張草圖中藏著大量的形狀，也可能因不同的理解方式而形成不同的形狀輪廓，而有些特定的形狀是可以被命名的，例如正方形、

圓形等。2.深淺度：繪圖者在草圖中使用明暗對照法（*chiaroscuro*）來強調前後、高度深淺、明亮等不同的空間資訊，而其深淺變化間的關係同時可以表現出不同的效果，例如漸層暗示著斜坡，而明暗間清楚的分割則代表著前後是分離的關係。3.線條密度：線條間的飽和度可能是繪圖者故意造成的效果，來表達面狀的平順、粗糙等不同的質感；也可能是繪圖速度所致的結果。除此之外，一張草圖上可能會出現不同飽和度的繪畫方法，例如使用鉛筆或水溶性顏料等不同的繪圖工具對一張草圖進行繪圖，便會形成密度的不同。4.線的方向：持續間斷的線條因為方向的關係可以被理解為同一條線，當很多複雜的線條組合在一起時，可能會形成無限多的形狀輪廓。再者，線條間方向的組合可以暗示出圖形間不同透視視點的訊息。5.線的寬度：初期的手繪草圖中線的寬度大部分都是不太一致的，這些線條上不同粗細的組合反映了設計者對線條關注的多寡，越粗的部分可能是思考越多的地方；除此以外，線的寬度會形成方向性的暗示，例如一般人都會認為線條中從粗到細的部分會形成一種方向的力量。

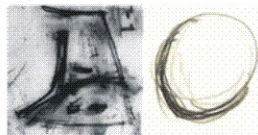

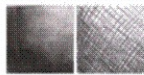


	<b>shape contour</b>	Defines the area of one single sketch or different areas of one sketch.
	<b>darkness (chiaroscuro)</b>	Defines the height and deepness of certain area.
	<b>density (saturation)</b>	Defines the smoothness of certain area.
	<b>line direction</b>	Defines the consistency of certain line.
	<b>line thickness</b>	Defines the width of certain line.

表 1 手繪草圖的基本特性

爲了得到較簡單的空间詮釋方式，在案例分析中選取的手繪草圖主要以正面投影（平面投影或立面投影）的草圖爲主，而較爲省略手繪的透視草圖，以下是其手繪草圖的特性和空間詮釋的方式：

建築師	投影方式	繪圖組合元素	使用媒材
Lissitzky	平面（有些微透視）	不同深淺的面+線	鉛筆
Finsterlin	立面	不同粗細深淺的線	鉛筆
Corbusier	平面	不同粗細的線+擦拭時形成面的深淺	炭筆+鉛筆
Gehry	立面	線	鋼筆
Hadid	平面（帶陰影或透視）	線+不同粗細的陰影	鋼筆+水彩

表 2 案例分析手繪草圖的特性



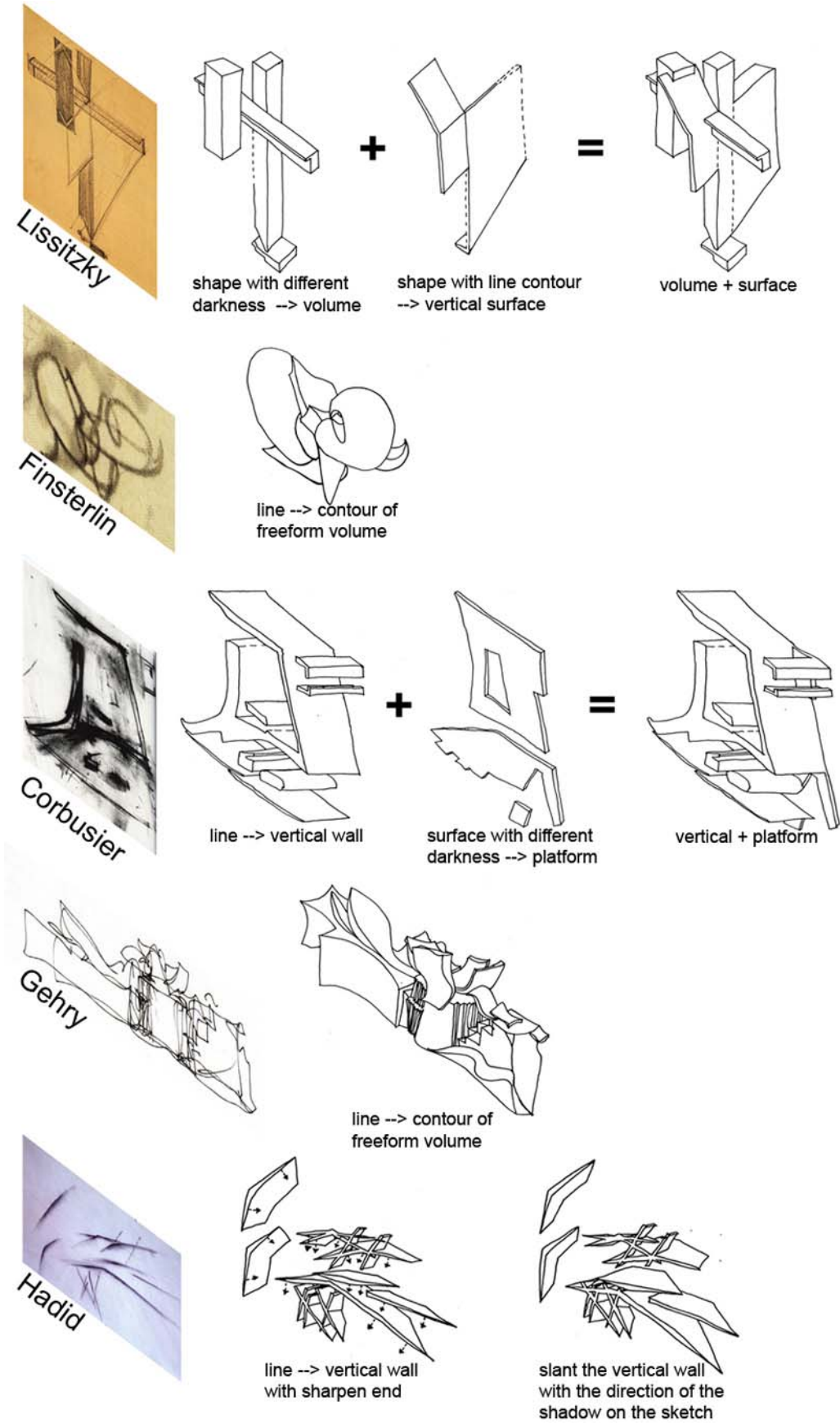


圖 28 案例分析手繪草圖的空間詮釋關係

從手繪草圖轉換成立體形體的過程中，一般被認為是一個單向度的設計過程；然而，空間詮釋的方式影響到立體成形後的形式風格，同時引導設計者繪畫的方式。在設計初期的手繪草圖過程中，設計者必須先大概決定繪圖中線條對應到實體空間的關係，例如 Corbusier 是平面長高而 Gehry 是立面長量體等不同的空間詮釋概念。當設計者是有空間意識地繪畫手繪草圖時，手繪草圖成爲了空間形式塑造的工具，設計者手繪草圖的熟練度與技巧性也都大大影響著其空間形體的風格。因此，空間詮釋方式的建立直接影響到手繪草圖繪畫的方式，以及最後的建築形式與風格（圖 29）。

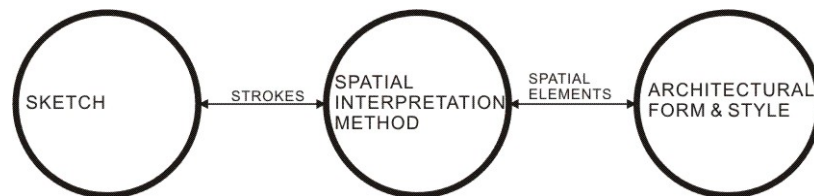


圖 29 手繪草圖，空間詮釋方式和建築形式的關係

除此以外，Laseau(2001)指出繪畫草圖中圖形與設計者之間，會形成「腦—手—草圖—眼」的相互循環過程，強調了設計者經驗對手繪草圖有著關鍵性的角色。Smith(2005)也強調了建築師整體的本質—包括思維、影像、身體記憶與經驗，都會影響其手繪草圖。所以手繪草圖，空間詮釋方式和建築形式並不只是一個線性的關係，應該是一個循環的互動關係（圖 30）。

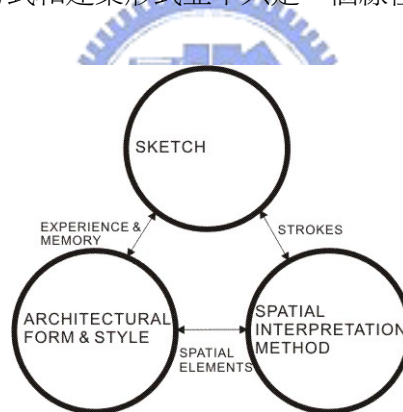


圖 30 手繪草圖，空間詮釋方式和建築形式的互動關係

由於手繪草圖設計過程中三個主要部分是互相影響的，建築師透過手繪草圖找尋自己的建築形式與風格的同時，會影響到手繪草圖本身，建立除了個人繪圖習慣的特性外，形成一種跟其建築形式對應的手繪草圖風格。而這樣的繪圖風格正是因爲空間詮釋方式而形成的，試想想如果 Hadid 的那些有力量的線條表現的是量體的邊緣而不是斜而尖銳的牆面，她的建築形式以及往後的手繪草圖風格都一定會有很大的差別；當然地，每個建築師都會選擇自己最合適的空間詮釋方式，從而使手繪草圖作爲找尋空間形式更有效的工具。

在空間詮釋的過程中，投影方式決定繪圖被詮釋後的使用方式，使用怎樣的投影方式也會直接影響設計者畫出怎樣的組合元素：例如在平面草圖中的元素大部分都會被長高，在立面草圖中的元素大部分會被定義爲量體。然而當先不管被詮釋出來的東西是平面的

還是立面的，繪圖元素（筆觸所留下的東西）要如何被空間詮釋才是影響設計者要如何畫，以及會形成怎樣的建築形式最重要的依據。最普遍的繪圖元素便是線，而高密度的線當形成塊狀時便成為面，線和面是手繪草圖中最主要的元素，所有的手繪筆觸都可以被歸納為這兩者。

Spatial Charcoal 主要針對兩種最普遍的繪圖元素－線條和面狀草圖進行透過空間詮釋方式轉換成空間模型的研究。應用的詮釋方式基本概念為類似平面長高的轉換關係：設計者在繪畫手繪草圖時越重要的部分便會描得越黑，這樣的例子可以在 Corbusier 的平面線條草圖上看出：在其平面線條草圖上，黑深的線條會被長高，在草圖「空」的位置上呈現較淺灰色的痕跡可以被詮釋為地面較低的空間資訊，另一個明顯的例子是 Lissitzky 以構成主義方式繪畫的手繪草圖，草圖上不同的深淺形成不同的面狀區域，而不同面狀在空間上會有不同的高低。Spatial Charcoal 為了讓線狀與面狀草圖的空間詮釋方式是統一的，最基本的詮釋方式為：黑色（較深）的部分會被詮釋為較高的部分，而白灰色（較淺）的部分則會詮釋為較低的部分。



圖 31 面狀與線狀草圖基本的詮釋方式

### 3.3 空間詮釋的可能性

在設計的過程中，詮釋方式會隨著個人的喜好而有所不同，而每個設計者對任何一張手繪草圖的空間辨識方式都是有一定差異的。在一般的手繪草圖中，線條（筆觸）是最基本的組合元素，利用線條的深淺定義為立體化後的高度，讓平面的線條有轉化為立體線條模型的機會。

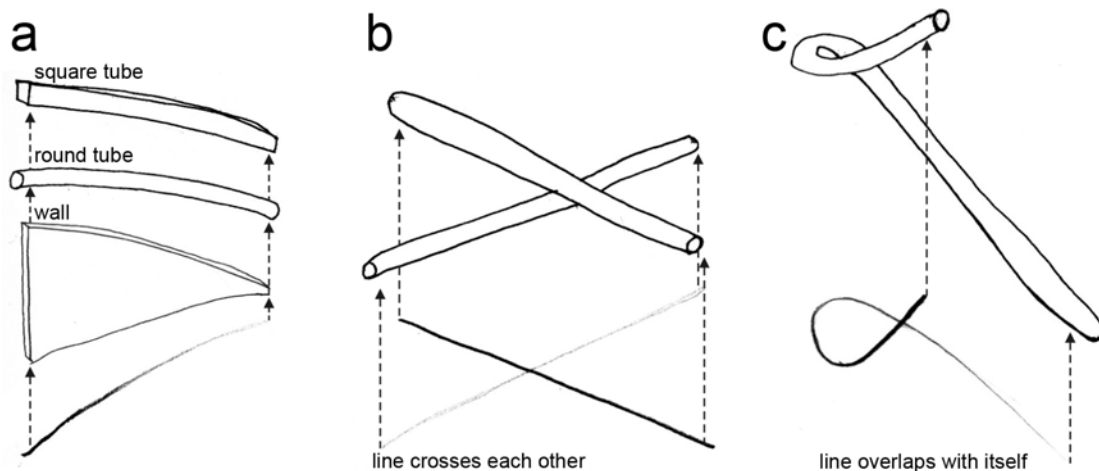


圖 32 線條草圖的詮釋可能性 (a)三種的長高方式，(b)交錯的線，(c)重疊的線

圖 32a 顯示三種線條詮釋後的可能性：方管線狀模型、圓管線狀模型和牆面模型。除此以外，手繪草圖中的線條經常出現交錯或重疊的情況，利用深淺代表高度的詮釋方式，讓交錯（圖 32b）與重疊（圖 32c）的線條在三度空間上形成有高低層次的空間模型。當草圖線條形成完整而特定的圖形（如方形、圓形等）時，可以依照線條的輪廓詮釋為循環的線狀模型或牆面模型，而對特定圖形的辨識是另一種詮釋的可能，例如在圖 33a 中的六個方形線條有被詮釋為六個立方體的機會；因此，草圖中完整的線條同時也有被詮釋為面狀或量體的可能性。然而透過平面線性草圖而轉化出來的形體都沒有辦法詮釋出高度資訊，圖 33b 是利用有深淺差異的面狀草圖轉換成不同高度的方形量體，在草圖中利用深淺分區的繪畫方式增加了更多立體詮釋的可能性。

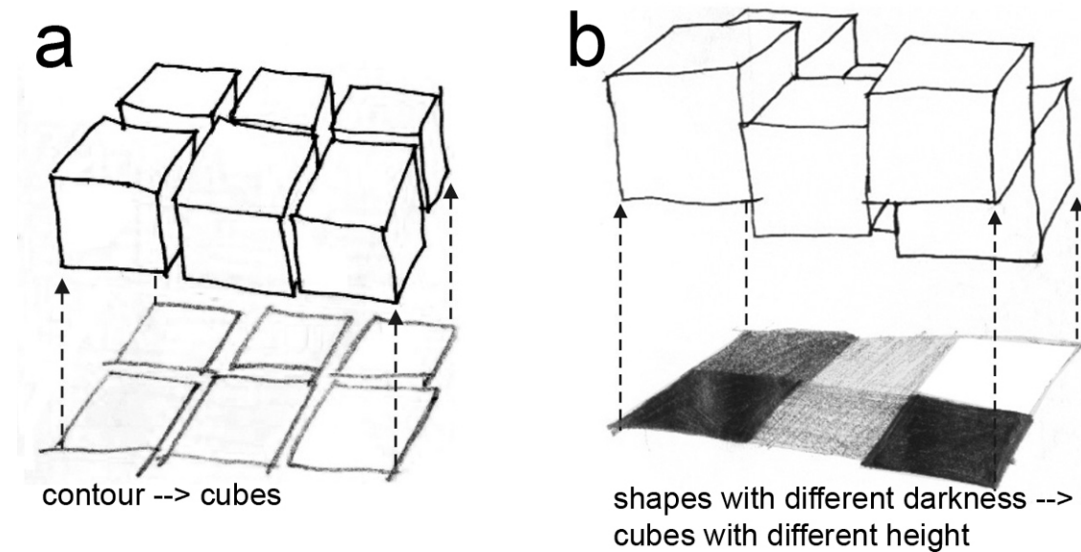


圖 33 詮釋為量體的可能性 (a)輪廓轉換成方形量體，(b) 不同深淺的色塊轉換成不同高度的方形量體

面狀草圖的深淺資訊除了可以被轉化為量體的模型外，也可以產生為面狀模型。對建築設計來說，量體偏向於對整體形式的塑造與考量，而空間性的面狀則同時營造出空間與量體兩個面向的塑形思考。面狀模型的最基本詮釋方式便是將草圖上的所有資訊全部拉高，形成一面方形邊緣的連續模型（圖 34a），詮釋出來的結果類似將一張平面的白紙往上下折成凹凸的結果，然而這是根據手繪草圖的深淺資訊產生而成的；由於利用手繪草圖，不同的設計者能繪畫出不同粗糙程度與紋理的線條、色塊與漸層效果等，讓詮釋出來的空間模型有更多個人的手繪草圖特性。

利用深淺長高的方式，除了可以讓詮釋出來的空間面狀是連續性的，也可以根據深淺的不同區分為獨立而有高差的面狀（圖 34b）。這樣的詮釋方式提供了思考不同層次的機會，類似在建築設計過程中對樓層的思考，當詮釋出來的結果是斷裂而破碎時，設計者必須接著考慮到不同連結的可能性：例如支撐物、類似樓梯、斜坡等。在 *Spatial Charcoal* 的詮釋方式中，越深的部分會詮釋為越高的面狀，而較高的面狀當然有遮蔽較低面狀的可能性，以這樣的詮釋方式進行空間的轉換的話，較低的面狀可以被詮釋為它的深淺範圍再加上更深的範圍的面積，形成更類似建築物中樓層的效果。

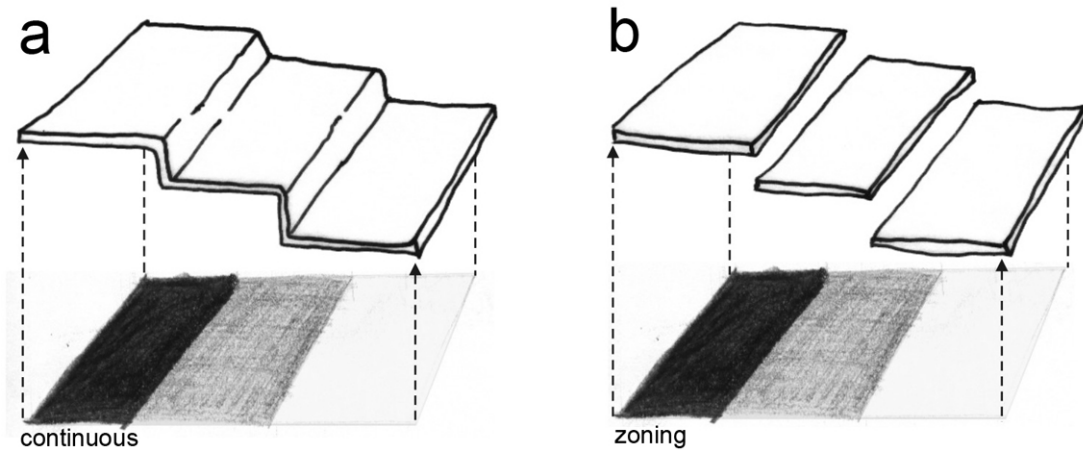


圖 34 面狀草圖的詮釋可能性 (a)連續的空間面狀，(b)分區的空间面狀

除了以深淺長高的詮釋方式外，草圖上的深淺也可以被理解為在空間上的不同元素，例如在圖 35a 中最深的範圍詮釋為立方體，中間的範圍則被詮釋為球體，而最淺的範圍則詮釋為其他的形體。圖 35a 中詮釋出來的形體依然維持著越深越高的對三度空間中高度的定義。圖 35b 中所詮釋出來的組合元素都是立方體，而草圖上的深淺並沒有直接影響到組合元素的高度位置，而是影響到立方體元素的尺寸（寬度、長度與高度），而由於手繪草圖中不飽和的特性，在深色的色塊中往往存在著留白的細縫，形成了詮釋出來的組合元素間高低有序、縱橫交錯的效果。

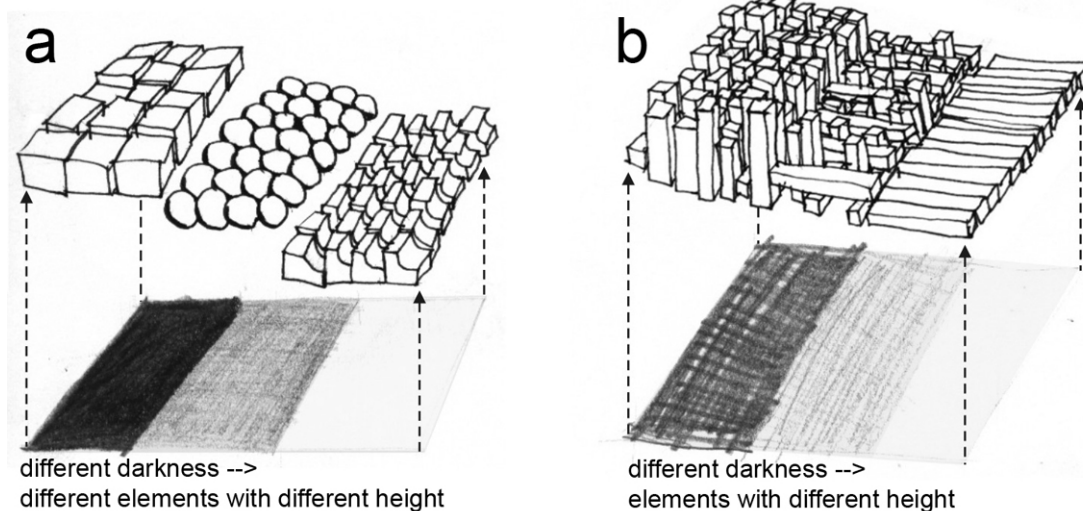


圖 35 (a)不同的深淺詮釋為不同的空間元素，(b)不同的深淺改變元素的不同高度與向度

相對於較為飽和的草圖色塊，設計者在繪畫手繪草圖時經常都保留著在草圖面狀上筆觸的紋路。這些紋路經常都會以近乎平行、快速來回的線條排列著，當要在已繪畫的範圍上重覆繪畫時，很多設計者都會以另一個方向繪畫出重覆性而平衡的線條，當這樣的動作重覆數次後，草圖上的線條便會重疊起來，形成兩個或三個向度相互交錯線條所組成的紋路。圖 36 中的手繪草圖都能清楚看出是由兩個向度的線條組合而成的紋路，圖 36a 的詮釋方式根據草圖上線條的向度產生空間中的立方體，而圖 36b 則是詮釋出兩個向度的立體線條交錯而形成編織的紋路。

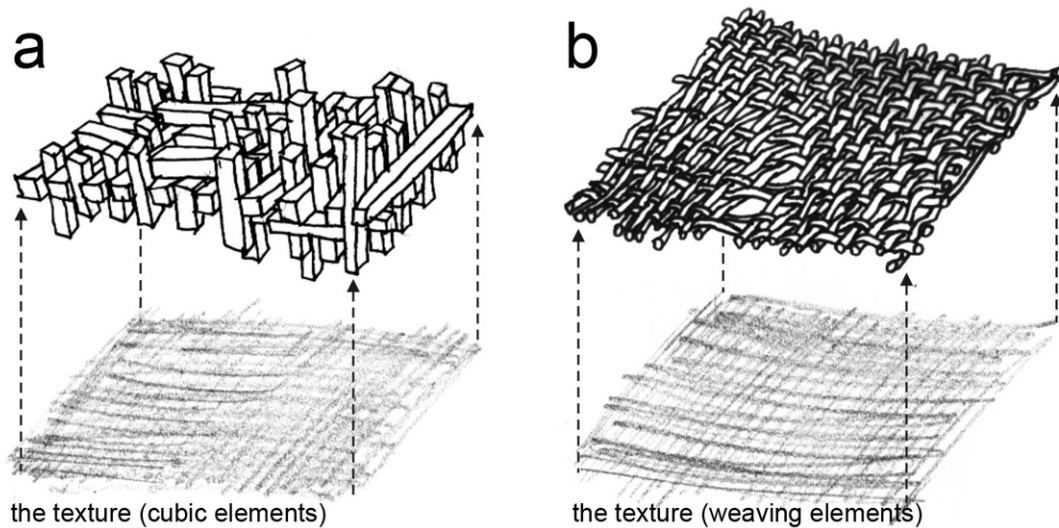


圖 36 形成不同空間紋理的詮釋可能性 (a)以方形量體形成的紋理，(b)以編織方式形成的紋理

### 3.4 空間詮釋方式的建立

在 Spatial Charcoal 系統中，草圖會被基本分為線狀和面狀兩種，而各種類會有其不同的詮釋方式。此外，設計者在畫線條的手繪草圖時，較深的線條代表著較重要的線條；因此，以點陣的深淺作為判斷 z 軸的高低值時，較深的部分會被詮釋為較高，而較淺的部分會被詮釋為較低的部分，由於較深的線條較為重要的道理會同時被應用在面狀草圖和線性草圖，所以各種類的手繪草圖的深跟淺都會被相對地詮釋為高跟低。

#### 3.4.1 線狀模型與牆面模型

在手繪草圖中的線條可以被詮釋為立體的線狀模型或牆面模型，兩種模型對高度的詮釋方式是相同的，在手繪草圖中簡單直線與彎曲的線，以線條上點陣的深淺作為判斷 z 軸的高低值，可產生為立體的線狀模型或牆面模型，兩種模型的差別是線狀為立體線性的模型，而牆面模型則是一個垂直的有厚度的面狀模型，牆高是草圖線條深淺詮釋出來的高度，牆的底部則維持在零高度的位置。

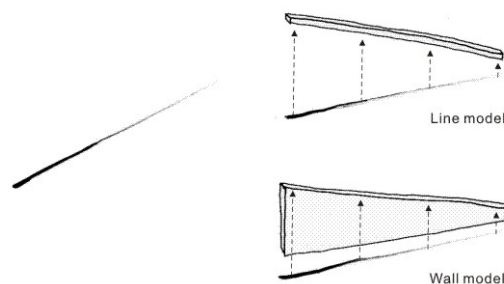


圖 37 線性草圖詮釋為線狀和牆面模型

### 3.4.2 面狀連續模型

在面狀連線模型中所有線條都會被定義為連續的，詮釋後的模型是單層且連續的。

1. 判斷為整塊面狀（方形的），並利用面狀上點陣的深淺作為判斷 z 軸的高低值，產生方形立體的面狀模型。

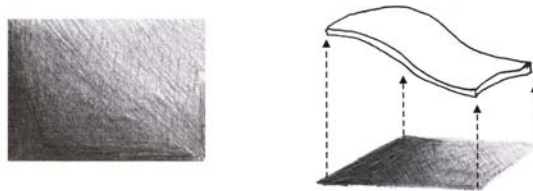


圖 38 方形邊緣連續模型詮釋方式

2. 判斷為區塊面狀（自由邊緣），以面狀上點陣的深淺作為判斷 z 軸的高低值，產生自由邊緣的面狀模型。

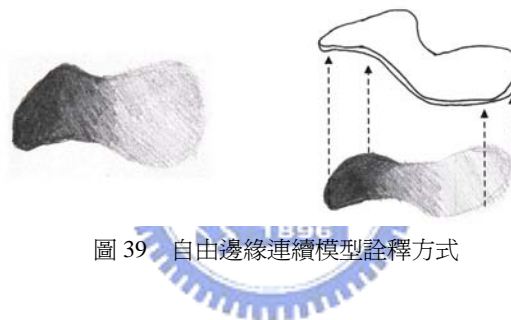


圖 39 自由邊緣連續模型詮釋方式

### 3.4.3 面狀區域模型

面狀區域是另外一種面狀模型的詮釋方式，同時加入了對區塊的詮釋；面狀上的線條會因為其點陣的深淺形成不同的區塊，同時會因應深淺的變化幅度作為建模的依據，詮釋後的模型是多層且不連續的。點陣深淺值形成三種高度範圍（如 0-80，80-150，150-255 三個範圍），最低的範圍（較淺的範圍，150-255）會被連成爲一面底層的方形面狀，其他兩個較高的範圍（或是分開的多個碎塊面狀）則會建立成分離的面狀在底層的面狀之上，再以垂直的支撐物連結。

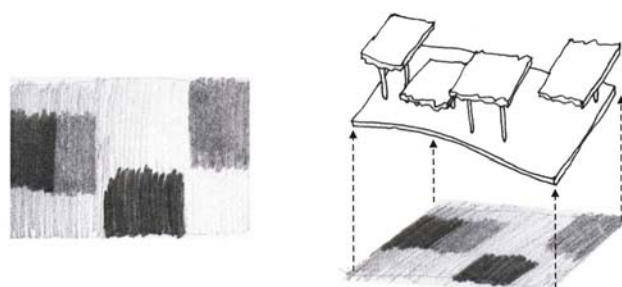


圖 40 區域模型詮釋方式

## 4. Spatial Charcoal 系統實作

### 4.1 Spatial Charcoal 系統程序設計

Spatial Charcoal 系統中最重要的部分便是詮釋方式的建立，因為詮釋方式的不同會同時影響到手繪草圖的繪畫方式以及建構空間模型的運算方式。Spatial Charcoal 對手繪草圖的空間詮釋方式的基本概念是讓平面投影的草圖長高，除了直接在詮釋的過程中抓取草圖上灰值轉化為該位置的立體座標的 z 軸外，Spatial Charcoal 對方形的連續面狀模型會利用程式運算控制 3D 設計軟體內位移貼圖（displacement mapping）的功能進行自動化建模。而面狀區域模型的詮釋方式則是為了確保能詮釋出有層次（layers）的空間模型而建立的，詮釋的過程中會因其點陣深淺的不同而分到不同的範圍。

Spatial Charcoal 是透過對手繪草圖進行空間詮釋，而產生數位和實體模型的設計過程：以手繪草圖作為系統的輸入，設計者可以在畫紙上繪畫草圖，再掃描成為數位圖檔，或是直接以筆式介面在 Photoshop 或小畫家等繪圖的基本軟體進行繪圖並儲檔。Spatial Charcoal 將手繪草圖分為線條和面狀草圖兩種，線條草圖可以被詮釋為線狀和牆面模型，而面狀草圖則可以被詮釋為連續和區域模型，而連續模型則細分為方形和自由邊緣。因此，設計者可以利用同一張的手繪草圖詮釋成不只一種的空間模型。Spatial Charcoal 讀入草圖圖檔後，圖檔會經過包括了詮釋運算、建模運算和輸出 RP 模型的過程，最後生產出實體的 RP 模型，當中包括了一系列轉檔與參數控制的工作。

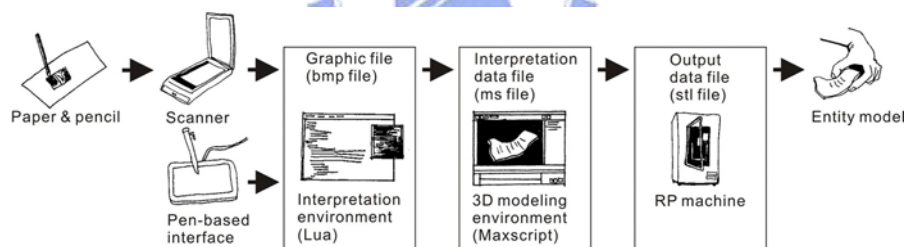


圖 41 Spatial Charcoal 系統基本程序



## 4.2 Spatial Charcoal 系統架構

Spatial Charcoal 主要包括四個部分：1.手繪草圖的圖檔輸入，2.對手繪草圖的空間詮釋，3.建構數位模型，4.數位模型轉檔並生產實體模型。

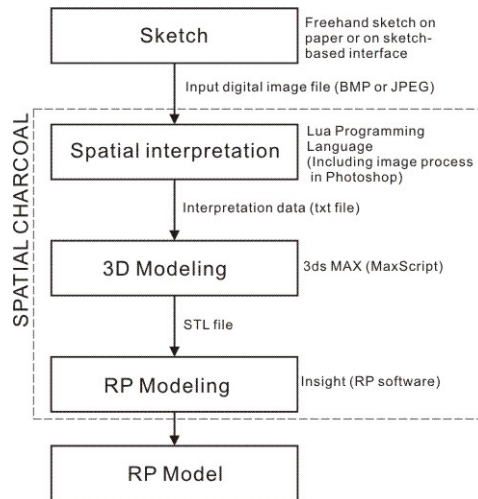


圖 42 Spatial Charcoal 系統架構

紙本的手繪草圖會利用掃描器掃描成數位檔案，或直接在任何的電腦繪圖軟體（如 photoshop 或小畫家）內繪畫並儲存成數位圖檔。Spatial Charcoal 將手繪草圖分類為線條與面狀，圖 43 顯示 Spatial Charcoal 系統的整体運算程序，其中左邊的是線狀草圖的運算程序，而中間與右邊的是面狀草圖的兩種不同詮釋方式的運算程序。

空間詮釋的過程會在 Lua 程式語言內進行，設計者首先要選取手繪草圖要被詮釋的空間模型類別：1.線狀模型，2.連續面狀模型，3.區域面狀模型。Spatial Charcoal 的 Lua 程式語言會對數位圖檔進行分析，並整理出可被利用來建構數位模型的數據資料，此筆資料會被儲存為 txt 檔案。

建構數位模型是在 3D 繪圖軟體 3ds Max 內進行，並利用 MaxScript 進行對被空間詮釋後數據資料的數位建模。三種不同被詮釋的類型：線狀模型，連續面狀模型和區域面狀模型會利用其個別的 MS 建模檔案讀取載有數據資料的 txt 檔案，並建構數位模型，其中線狀模型的 txt 數據資料可同時應用在線狀和牆面的建模上。生產出來的數位模型可以被儲存為 3ds Max 的數位模型檔案，當然最重要的是轉檔並輸出為 stl 檔案，Spatial Charcoal 在 MaxScript 中使用的建模方法已確保了可以被輸出為 stl 檔案並在 RP 機器中生產實體模型的要求（能在 RP 機器順利輸出的數位模型皆必須是有厚度而沒有破面的數位模型）。

在 3ds Max 介面中，把數位模型轉檔為 stl 檔案後，便能開啓輸出 RP 的軟體 Insight。在 Insight 的介面中，使用者要操作四個基本的步驟，stl 檔案便能輸出為生產成 RP 模型的資料，並在 RP 機器中製造出實體模型。

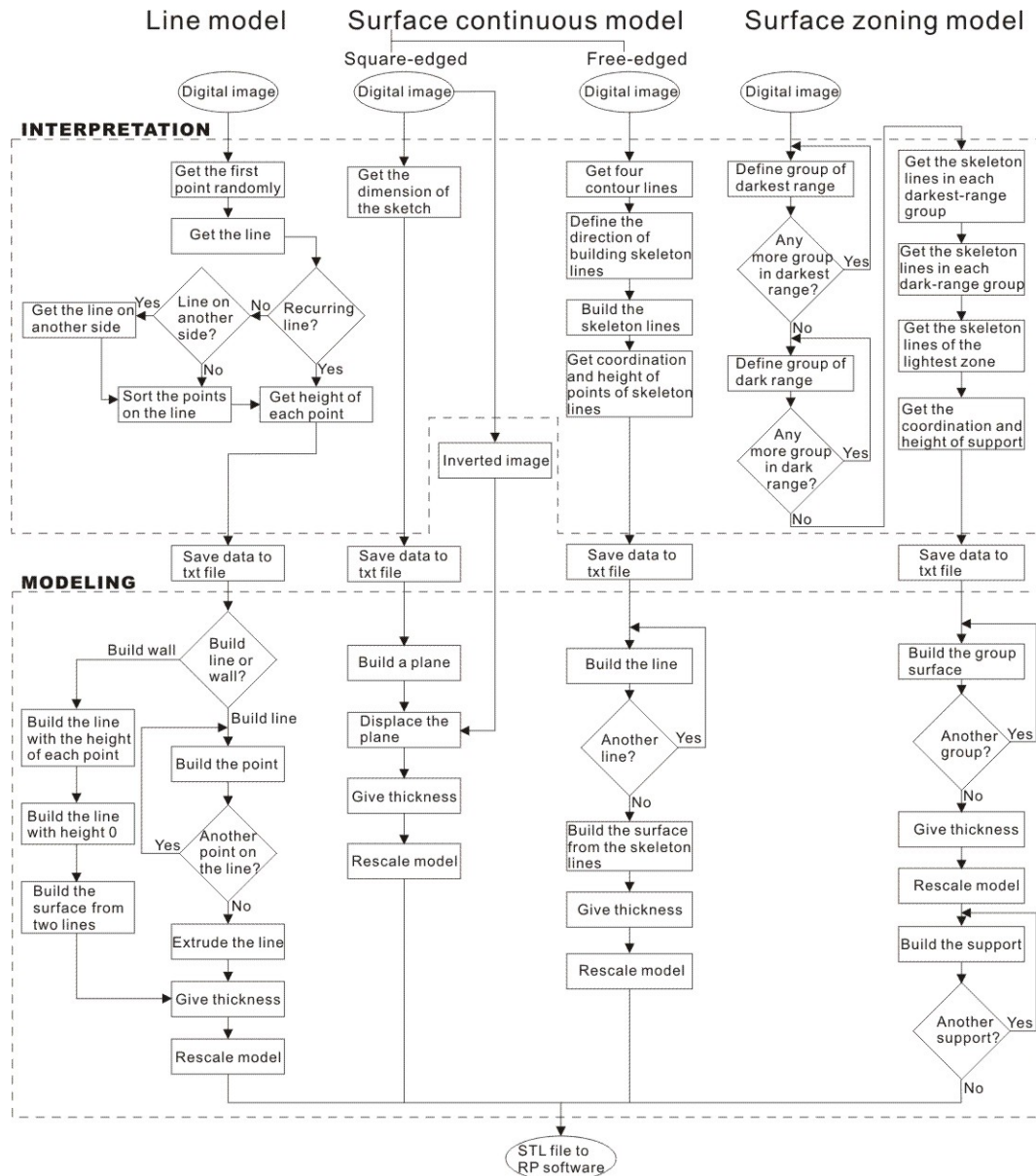


圖 43 Spatial Charcoal 運算程序

### 4.3 Spatial Charcoal 系統實作

Spatial Charcoal 的系統實作包括了空間詮釋的運算過程、數位建模的運算過程和輸出 RP 模型三個程序。本部分會依照詮釋方式對三個程序進行綜合性的基本說明，對空間詮釋、數位建模和輸出 RP 分別會在附錄二、附錄三和附錄四作更詳細技術性的說明。而三種詮釋方式分別為：1.線狀模型，2.連續面狀模型和 3.區域面狀模型。

#### 4.3.1 線狀模型

Spatial Charcoal 可以詮釋的線性手繪草圖分為非循環的線條和循環的線條。兩者在找尋路徑的方法是一樣的，只是由於一種線條有兩個端點而另外一種沒有端點而已。在得到了循環的線條或非循環的線條的軌跡後，程式會把線條的深淺數據記錄下來，平面座標

加上深淺所轉換成的高度即是三度空間上的立體座標。接著，便是把得到線上的點的座標和高度寫入並儲存成數字的資料檔案。

Spatial Charcoal 提供讓線條形成線狀和牆面的兩種建模方式，兩種模型所需要的空間詮釋時記錄在資料檔案的立體座標資料是相同的。在 3ds max 會根據在空間詮釋時記錄在資料檔案的立體座標建構 spline 上的點。為了能輸出為 rp 模型，線狀模型必須為有厚度而沒有破面的。由於得到的模型是以影像圖的像素詮釋出來的，因此，最後建成的模型要修正比例，才會回到跟原本手繪草圖一樣的尺寸。

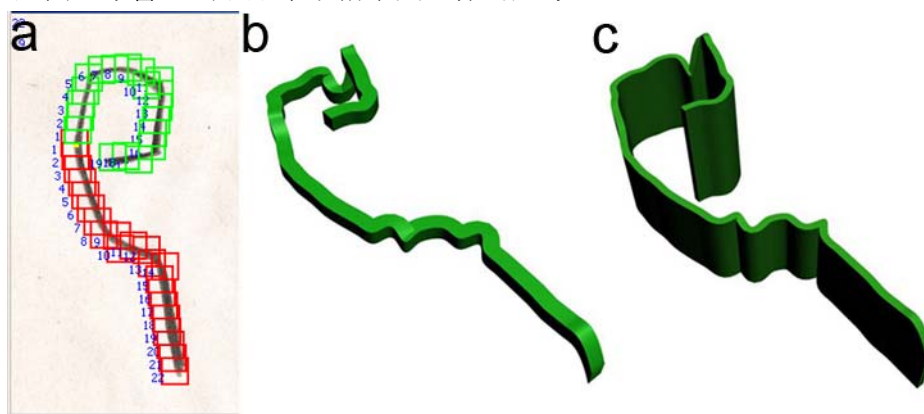


圖 44 (a)非循環線條的詮釋運算，(b)線狀模型，(c)牆面模型

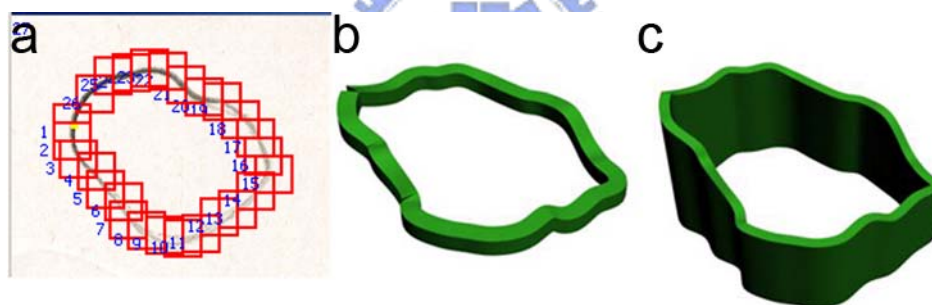


圖 45 (a) 循環線條的詮釋運算，(b)線狀模型，(c)牆面模型

#### 4.3.2 連續面狀模型

Spatial Charcoal 可以詮釋的連續面狀手繪草圖分為方形邊緣面狀草圖和自由邊緣面狀草圖兩種，連續面狀模型是對面狀草圖定義為一個連續面的一種空間詮釋方式。

##### 4.3.2.1 方形邊緣面狀草圖

這種面狀草圖會利用 3ds Max 內的 displace function 進行建模，displace 是利用有灰階深淺的相片讓模型變形的一種功能，在 displace function 內，相片或圖檔越白色的部分代表越高，而黑色的部分則為越低。這跟 Spatial Charcoal 高度的定義剛好相反。因此手繪草圖的數位圖檔（圖 46a）必須先變成負片（invert），再使用 displace 的功能。

接著便是在 3ds max 進行建模，首先建構出基本面狀，接著命令 `displace function` 載入原草圖負片 (`invert`) 的圖檔並改變基本面狀凹凸狀況，同時調整功能內的模糊度改善面狀凹凸不平的狀況。最後是給予面狀模型厚度和修正模型的比例。

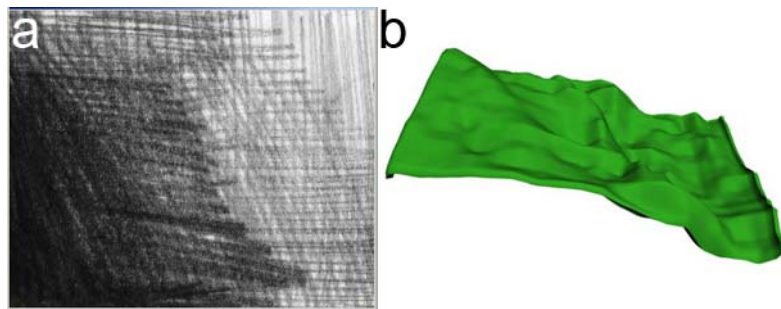


圖 46 (a) 方形邊緣面狀草圖，(b) 詮釋後的模型

#### 4.3.2.2 自由邊緣面狀草圖

自由邊緣面狀草圖使用另一種建模方式，透過建立骨架系統的方式進行建模 (圖 47a)。骨架建模方式是利用面狀內平行的線條建構出立體的自由曲面。這個部分必須順著同一方向去取得每條線上排序的點的立體座標，才能確保建模時不會因為線條方向不一致而形成面狀扭曲的問題。

接著的建模方式首先建構出骨架系統的線條，並將這些平行的空間線條連成一個網狀的面，最後是給予適當的厚度和修正模型比例。

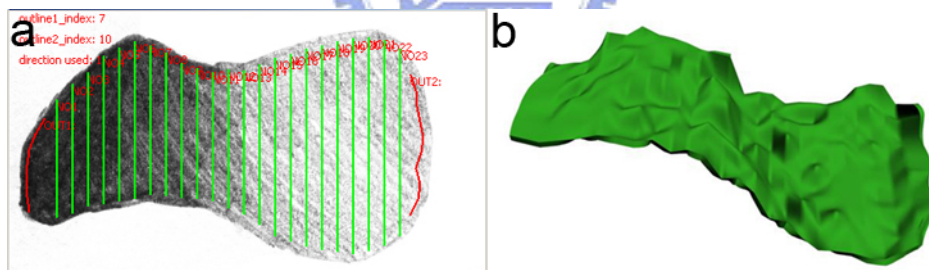


圖 47 (a) 自由邊緣面狀模型的詮釋運算，(b) 詮釋後的模型

#### 4.3.3 區域面狀模型

`Spatial Charcoal` 的區域面狀模型是對面狀草圖中不同深淺進行分區而形成三個不同高度的範圍，並詮釋出有層次的模型。一個深淺範圍中可能會有不止一個區塊的機會。而最低的範圍會詮釋為底板，這是一塊連續完整的方形面狀，當遇到深淺值屬於較高的兩個範圍時，在最低範圍上的這個座標的高度值會用最低範圍中高度的平均值取代，確保這個面狀是連續且完整的。最後，運算程式會計算出要支撐起較深的兩個範圍中的各個區塊的支撐物的座標與所需的高度。

在建模的過程中，首先建構各個區塊的支撐物，接著是建構底座的面，中間範圍和最高範圍的所有面狀。這三個範圍的所有面狀都是跟自由邊緣面狀模型的建構方式相同。最後是給予所有面狀高度並修正模型的比例。

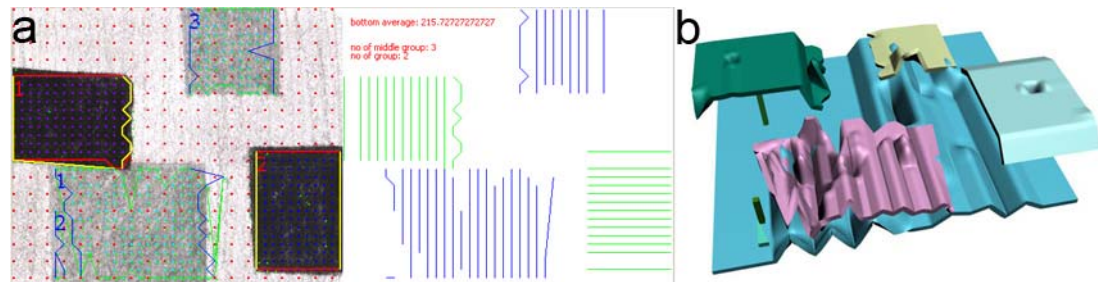


圖 48 (a)區域面狀模型的詮釋運算，(b) 詮釋後的模型

經過對手繪草圖詮釋和建模的運算後，數位模型便能轉檔為匯入到 RP 輸出軟體內的資料檔案，使用者必須要留意軟體內單位、模型大小、模型材料和支撐材等基本的設定。由於 RP 是利用一層一層的堆疊模型斷面，堆積成立體模型的建模方式；因此，在此部分的運算必要先運算出每層斷面的輪廓線，再運算出支撐材的位置，最後運算出既定的工作路徑，便能讓運算後的檔案在 RP 機器內輸出為實體模型。輸出後的 RP 模型需要將支撐材的部分清洗掉，完成清洗後，便能得到詮釋後的實體模型。

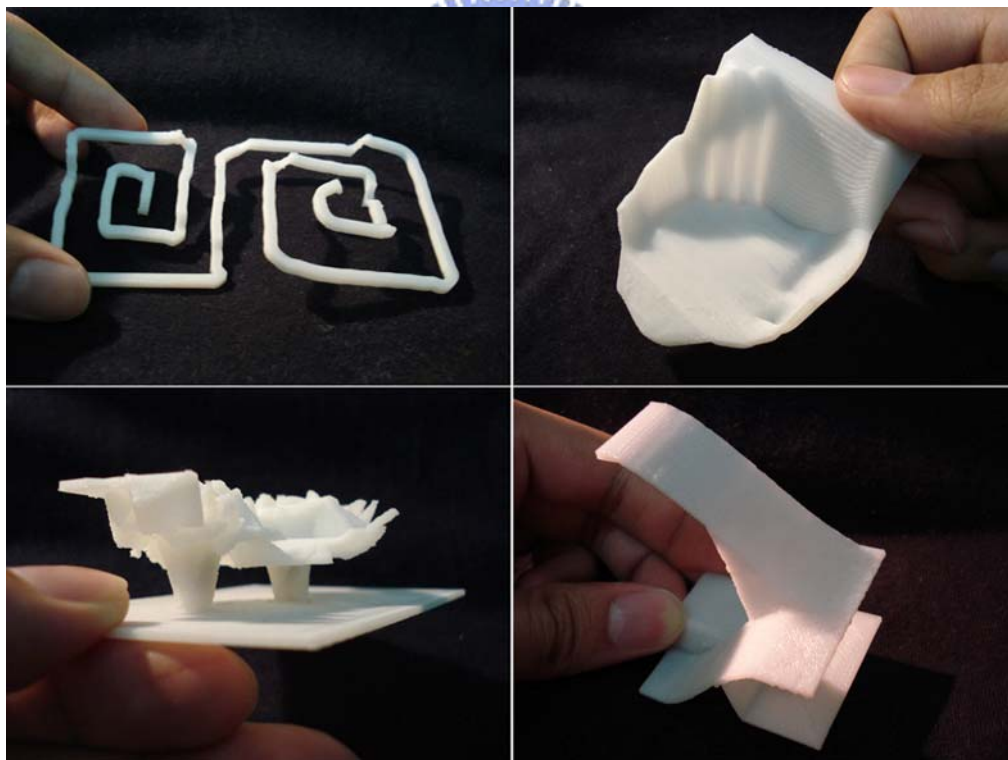


圖 49 輸出的 RP 實體模型

## 4.4 實際應用與設計案例操作示範

Spatial Charcoal 系統可應用在設計過程中的發想階段：建築設計、家具設計、簡單的地形設計、建築裝飾和浮雕等設計層面上。操作示範包括了三個案例：第一個是利用連續面狀的詮釋方式進行椅子的設計，第二個是利用區域面狀的詮釋方式進行小房子的設計，包括了地形與建築物的考量，第三個案例是利用線狀的詮釋方式進行建築裝飾的設計。

### 4.4.1 椅子設計

利用連續面狀的詮釋方式進行椅子的設計，由於只針對概念發想階段的設計過程，設計過程中的手繪草圖與詮釋出來的數位模型可以較不受尺寸與比例的規範，主要以構想與形式的思考與表達為主。設計過程會以手繪草圖到數位模型的來回操作為主；以下是利用方形邊緣連續面狀模型的詮釋方式的椅子設計操作。

Spatial Charcoal 在沒有設計者介入控制參數時，在空間詮釋的高度與平順度會控制在固定的數值，方形邊緣連續面狀模型是透過 3ds Max 的 displace 功能建模，功能內有 strength（控制高度）和 blur（控制平順度）的控制。設計者可以透過 Spatial Charcoal 程式內的參數的更改來控制這兩個數值，圖 50 和圖 51 中的各兩個數位模型皆是從左邊的手繪草圖詮釋出來，圖 50 是由於 blur 數值的不同而形成紋理的差異性，由於手繪草圖不可能達到完全的飽和度，而其漸層的描繪往往不會很平順，因此 blur 的調高是必須的，左邊模型（圖 50a）的 blur 值是 0.2 而右邊模型（圖 50b）是 1。圖 58 是由於 strength 數值的差異形成模型的高低，不同的椅子類型需要不同的尺寸，透過 strength 數值從 500 降到 200，同樣的手繪草圖詮釋的結果從左邊（圖 51a）的一張高椅變成了右邊（圖 51b）的一張躺椅。

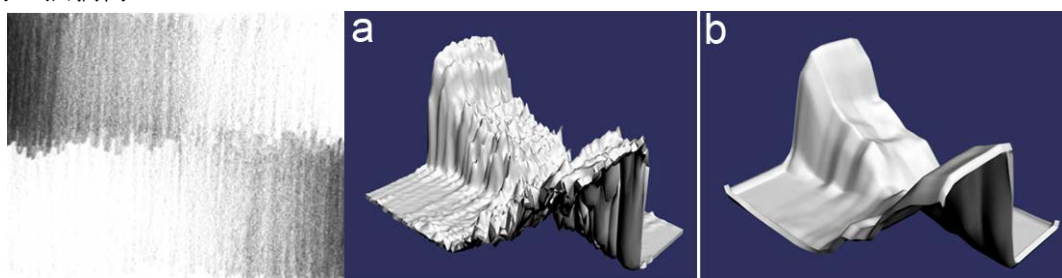


圖 50 方形面狀模型，利用調校 blur 數值來控制平順度

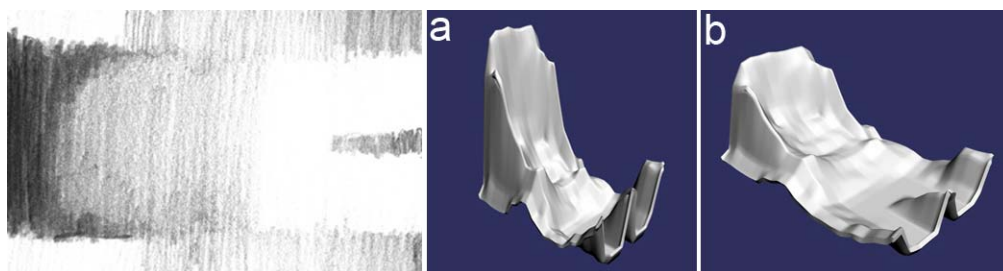


圖 51 方形面狀模型，利用調校 strength 數值來控制高度

除了對 Spatial Charcoal 的數值的調校會影響詮釋的結果外，在方形邊緣的詮釋條件下，如何框選詮釋的手繪草圖也會對結果造成很大的改變，圖 52 的兩個數位模型是由於對手繪草圖框選留白位置的不同，來設計出觸地位置不同的椅子形式。

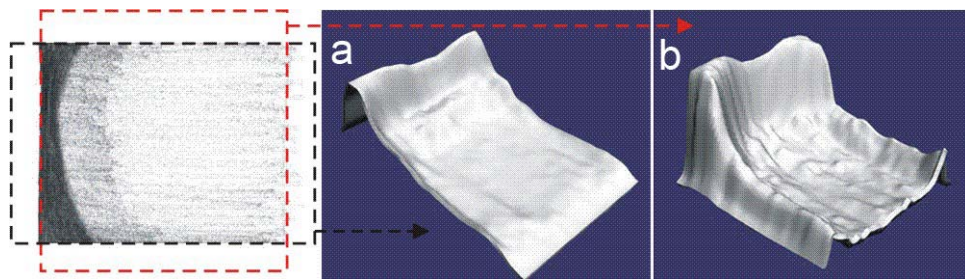


圖 52 方形面狀模型，對同一草圖不同的框選詮釋出不同的設計

以下兩個例子是利用自由邊緣連續面狀模型的詮釋方式的椅子設計操作。為了能容納手繪草圖的不準確性，自由邊緣詮釋方式有兩項消除雜訊的調整數值，一項是調整骨架系統中線條和線上分佈點的間距，另一項是調整等高容許相差值。圖 53 顯示的是透過對線和點的間距數值的調整，來獲得較合適的詮釋結果，圖 53a 線和點的間距都較密，皆為 8 (每 8 個像素得到一個點的高度值)，而圖 53b 線和點的間距都是 15；從結果來看，利用間距 8 所詮釋出來的空間模型較為參差不平，但利用更多的點和線來建構數位模型較能保存手繪草圖中圖像的輪廓。在間距 15 的空間模型由於點跟點，線跟線的距離都較遠，因此所生產出來的數位模型較為平順，但其缺點則是點和線的間距越大，其輪廓的保存則越不精準。

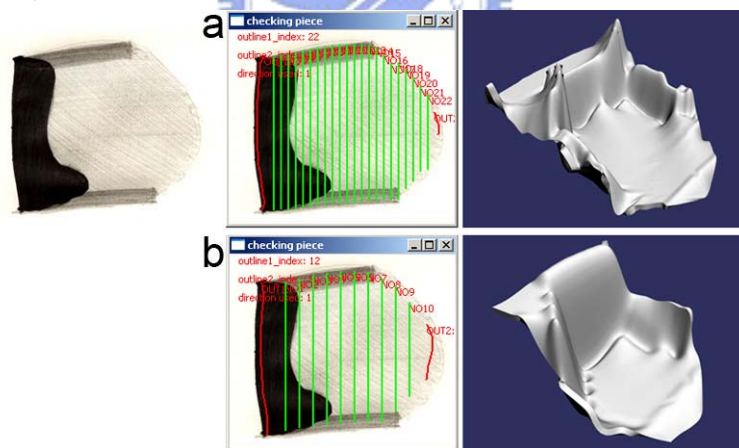


圖 53 自由邊緣面狀模型，調整抓點的間隔詮釋出兩個不同的設計

圖 54 顯示的是透過對等高容許相差值的調整，來修正空間模型的平順度，其功能的效果類似在 displace 中對 blur 的控制。等高容許相差值是針對手繪草圖深度不均勻而建立的消除雜訊數值，指的是當下一點抓到的高度值跟前一點的高度值相差不超過等高容許相差值時，下一點便會被定義為跟前一點同高。圖 54 中兩個數位模型詮釋的線和點的間距都是相同為 10，左邊 (圖 54a) 不太平順的數位模型的等高容許相差值為 10，而右邊 (圖 54b) 模型的等高容許相差值為 20。

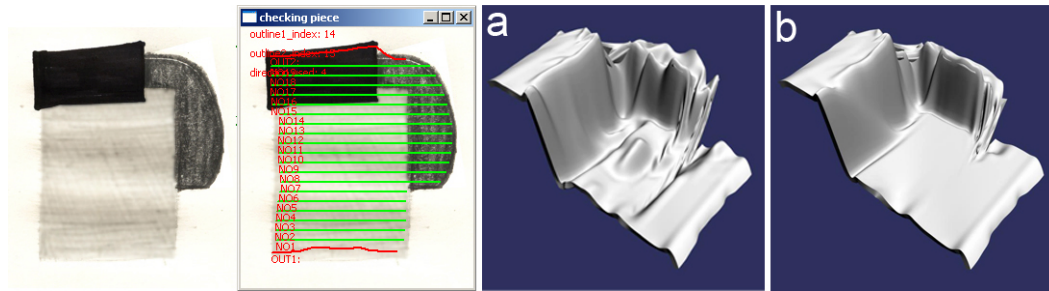


圖 54 自由邊緣面狀模型，調整等高容許相差值修改模型的平順度

#### 4.4.2 小房子設計

利用區域面狀的詮釋方式，設計一間四人家庭居住的小房子，要求是一般家庭的機能；由於是概念發想階段，所以設計的方向主要以構想與形式的思考為主。同時，說明設計者如何透過 Spatial Charcoal 內參數的調整，對手繪草圖詮釋出更符合設計者要求的設計。

圖 55 進行了對連續面狀和區域面狀詮釋方式模型的比較。由於手繪漸層的效果往往都不太均勻，因此詮釋後的模型會形成稍為凹凸不平連續的面；在區域面狀的詮釋中，為了讓原本連續的漸層草圖的各高度區域有相連的機會，每個高度範圍間都有深淺度重疊的範圍：最高的範圍的門檻值為深淺度低於 70 (0-70) 的像素範圍，中間區域的門檻值為 50 到 150 之間的範圍，最淺的範圍則會設定在高於 130 (130-255) 的範圍。為了克服手繪草圖的不均勻性，圖 55b 的區域面狀模型詮釋時線和點的間距是稍寬的 12，而且在同一高度範圍內的等高容許相差值調整到非常高的 40。詮釋後的空間模型形成一個方形的底座上支撐著兩片半分離稍為有起伏的斜屋頂。

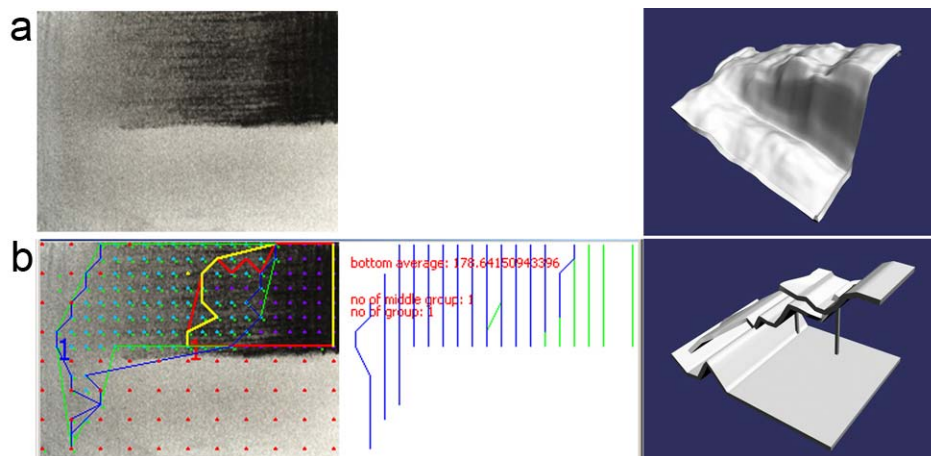


圖 55 同一張手繪草圖進行 (a)連續面狀和 (b)區域面狀詮釋方式

為了更有效地比較連續面狀和區域面狀對漸層草圖詮釋的差別，圖 56 的草圖是利用電腦軟體 Photoshop 所畫的，圖中的漸層效果非常平順而且飽和，圖 56a 是連續面狀空間模型，幾條反方向的漸層梯形在空間上連成一片連續且有結構性的面狀。圖 56b 是利用區域詮釋的運算過程與模型。這是精準的電腦繪圖，所以等高容許相差值調整為 1。由



於每個梯形的漸層範圍都是從最深（0）到最淺（255）的圖形，梯形的較寬，深色的部分會形成各自獨立的區域，經過空間詮釋後會在最高的位置。所有漸層梯形的中間部分因深淺值相近而連成爲同一塊的區域。詮釋後的空間模型運算出支撐物後，各梯形最深的部分形成量體中獨立而飛起的部分，而其下方底座因在草圖上被較深的部分覆蓋，所以這分會詮釋爲平整的，詮釋後的模型形成由五個傾斜而獨立的單元組合而成的小房子。

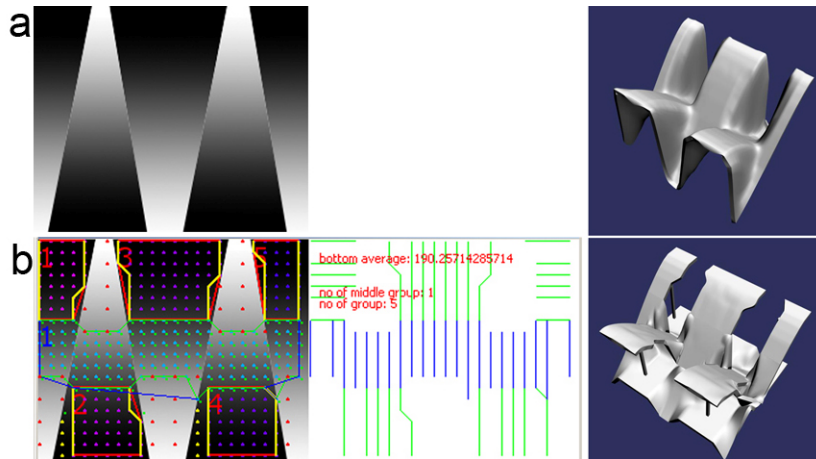


圖 56 同一張在電腦內繪畫的圖進行 (a)連續面狀和 (b)區域面狀詮釋方式

除此之外，透過高度值參數的控制可以調整空間模型的高度，爲了較符合小房子的設計題目，空間模型的高度值從圖 57a 的 1.5（原本的高度除以 1.5）調整爲圖 57b 的 2.5（原本高度除以 2.5），讓空間高度調低到較適合人類居住的空間。

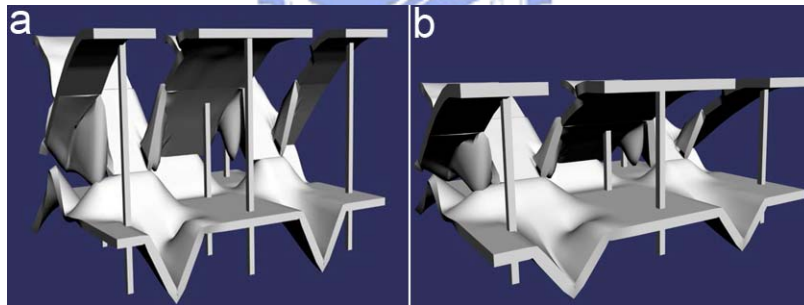


圖 57 區域面狀模型，透過高度值參數的控制調整模型的高度

除了對漸層草圖的詮釋外，簡單以深淺色塊區分的草圖也可以利用區域面狀詮釋方式進行建模，圖 58 中的手繪草圖是以近乎純黑跟純白的構圖方式。由於圖形的黑色框在整張草圖的最邊緣，整張草圖都被詮釋爲最深範圍中的一個區塊，而這區域的構成除了框是黑色以外裏面都是白色的，因此在空間詮釋後除了黑色的框維持在最高的位置外，中間的部分都是在最低的位置，形成了四面牆的空間關係，而底座的方形區塊則維持在零高度的位置。由於已有牆面作爲支撐物，因此在此草圖並沒有加入支撐物的建模運算。

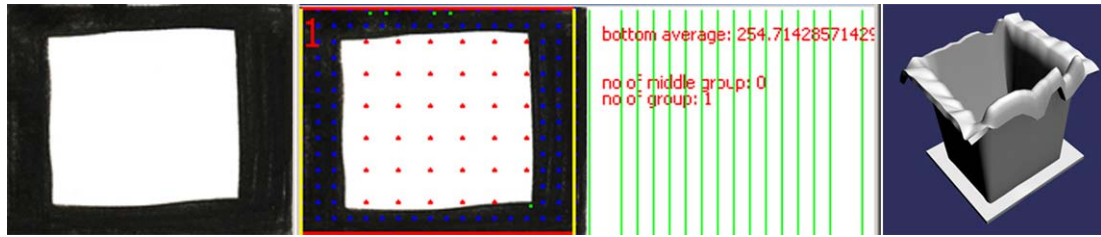


圖 58 區域面狀模型，利用黑中有白的手繪草圖詮釋出來的數位模型

運用圖 58 黑中有白的繪圖方式，圖 59 的構圖方式以不同大小黑跟灰中有白的方形作為基本構圖，較深的部分作為建築物屋頂的部分，而在較深區域中的白的部分作為建築物的結構。這樣的繪圖方式免取了以運算的方式隨意外加支撐物的不確定性，設計者可以對結構和整體的建築物造型有較大的控制權。

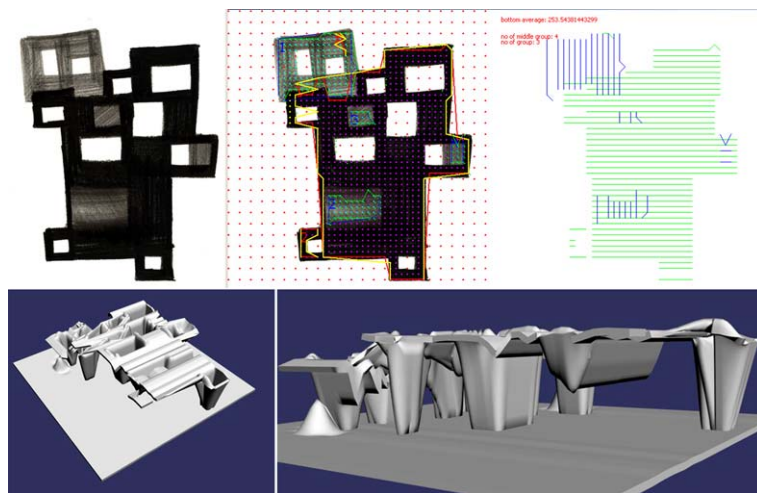


圖 59 區域面狀模型，利用黑中有白的方式繪畫出的手繪草圖和其詮釋出的數位模型

#### 4.4.3 建築裝飾設計

利用線狀的詮釋方式，包括了應用線性和牆面兩種建模的方式，設計出簡單的建築裝飾。建築裝飾的設計準則主要以簡單的圖案長高為主，再由設計者定義每個空間線條適當的寬度與高度。

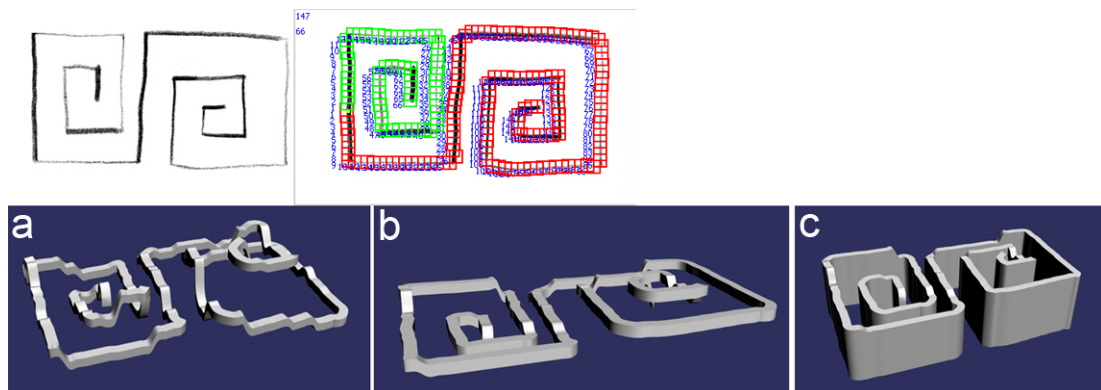


圖 60 對同一張手繪草圖詮釋為線狀和牆面模型，產生不同效果的建築裝飾

傳統的建築裝飾中多出現漩渦與連續帶狀的線條，圖 60 是兩個方形漩渦圖案組成有深淺變化的線條，詮釋線條草圖時也會遇到深淺不飽和的狀況，圖 60a 中空間模型的等高容許相差值為 5，模型的高低有明顯的參差不平順，然而這其實是真實反映出手繪草圖中深淺的狀況。圖 60b 模型的等高容許相差值則調高到 20，線條變得很平順，但其高低的表現卻不太明顯。由於這是建築裝飾設計，並沒有像建築設計中對高度較嚴格的限制，其高度與線條寬度等可變動的數值主要取決於美觀。圖 60c 的等高容許相差值跟圖 60b 的線狀模型的設定的是相同的，但其使用牆面的建模方式，這樣的作法在建築裝飾中突顯了凹凸對比，製造產生光影的另一層次。圖 61 是描繪帶狀建築裝飾的手繪草圖，這樣的線條會被詮釋為循環的線條，同時可以被建模為線條或牆面模型。

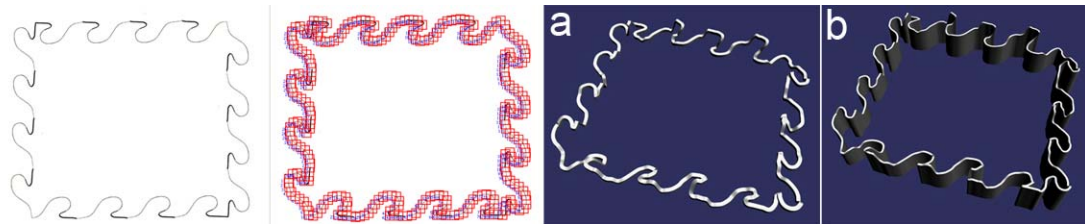


圖 61 對循環的線條詮釋為建築裝飾模型



## 5. 測試

本研究主要對 Spatial Charcoal 分為兩階段的實驗，第一階段是在 Spatial Charcoal 的發展過程中進行的，針對 Spatial Charcoal 利用深淺給予高度的詮釋方式進行使用者意見評估，討論的重點是對詮釋方式的可行性。第二階段針對 Spatial Charcoal 整體過程進行操作性的使用者評估，討論的重點是 Spatial Charcoal 對使用者在設計上的幫助與限制，以及設計者對 Spatial Charcoal 操作過程與此設計方法的意見。

### 5.1 詮釋方式實驗

本實驗在 Spatial Charcoal 發展的過程中進行，爲了了解使用者對 Spatial Charcoal 深淺給予高度的詮釋方式的看法，本實驗假設 Spatial Charcoal 能對方形面狀和線狀草圖以及其混合式進行詮釋，受測者繪畫出此類型的手繪草圖。在繪畫完成後進行面談，以了解受測者對此詮釋方法的理解與建議。

#### 5.1.1 詮釋方式說明

此階段的 Spatial Charcoal 還沒有完成，詮釋方式是以深淺作爲空間高度的判斷依據：越深的部分會被詮釋爲越高，線條和面狀皆如此，除了對受測者說明線條和面狀單一詮釋方式外，並假設 Spatial Charcoal 能對線條和面狀的混合草圖進行詮釋，形成面狀和線條兩層次的詮釋結果，當然線條必須比面狀爲深才能夠被理解。

#### 5.1.2 詮釋方式實驗設定與步驟

此階段主要讓受測者繪畫草圖和詢問他／她對 Spatial Charcoal 的高度詮釋方式的意見。實驗的工具爲一支 HB 鉛筆、一支 2B 鉛筆、橡皮擦和 A4 圖畫紙。本實驗主要分爲三個階段：

1. 對受測者進行詮釋方式和設計題目的說明。
2. 受測者繪畫手繪草圖，受測者要在 15 分鐘內繪畫出一張根據 Spatial Charcoal 詮釋概念的手繪草圖，在設計的過程中可以利用更多不同類型的手繪草圖去輔助繪畫出將被詮釋的手繪草圖，設計的題目不限，但有提示小房子、公車亭或家具。
3. 在實驗後與受測者面談以立即得到建議。

### 5.1.3 詮釋方式實驗受測者

本實驗包括了四位受測者，兩位為學習五到六年的建築學生，另外兩位則是學習建築一到兩年的建築設計初學者，五到六年的建築學生已對一定的建築媒材較為熟悉，而建築設計初學者則還沒對傳統或數位的媒材有相當的熟悉。

### 5.1.4 手繪草圖過程

本實驗中四位受測者都選擇公車亭作為設計題目；公車亭的形態一般的理解是較為簡單的，也許是由於受測者們認為現在的詮釋方式只能設計出較為簡單的連續面狀，公車亭比較符合這樣的空間概念。在繪畫草圖的過程中，雖然題目只要求畫出一張設計圖，三位設計者都不止畫出一張，兩位較有經驗的測試者都以更完整的方式描繪出自己想像的設計：受測者 A（圖 62 左）從兩張透視圖開始思考他的設計，接著他才繪畫出要被詮釋的平面草圖，在右下角甚至多了兩筆，極可能想要將建築細部繪畫出來，他那要被詮釋的平面手繪草圖中以菱形作為構圖，兩邊各預留兩個小的白圓形，預計在詮釋後作為結構之用，其他部分則以漸層的方式塑造高度變化的空間形體。受測者 B（圖 62 右）將平面與立面放在一起繪畫，他認為兩張草圖都可以被系統詮釋出空間模型，再跟原本想像的草圖作對照，應該能找出更有趣的可能性，由於是垂直投影的繪畫方式，所以平面和立面手繪草圖基本上都是可以利用 Spatial Charcoal 詮釋出空間模型的，他繪畫的方式是以大量不同深淺的色塊與線條交疊進行構圖，由於深淺不同形成在空間詮釋後水平面狀與垂直面狀交錯的效果。

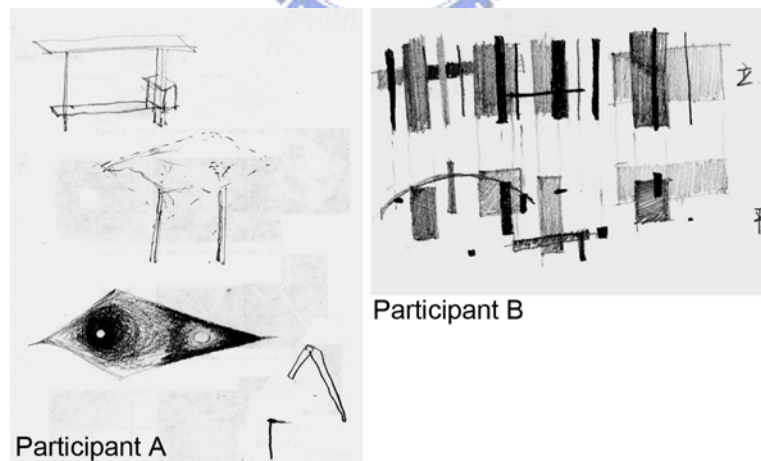


圖 62 較有經驗的兩位受測者的手繪草圖（受測者 A 與受測者 B）

另外兩位建築設計初學者除了繪畫出題目要求的平面手繪草圖外，並沒有利用其他的投影法去輔助思考。兩位初學受測者的完成手繪草圖皆有清楚的方形邊緣並畫得較為整齊。受測者 C（圖 63 左）除了完成的平面手繪草圖外，也畫出了類似嘗試筆觸的簡單線條草圖，她的手繪草圖中主要以中間大塊的方形漸層進行構圖，在畫面上明顯有深淺線條的筆觸，她希望這些線條能在空間上作為欄杆、扶手和椅子等用處。

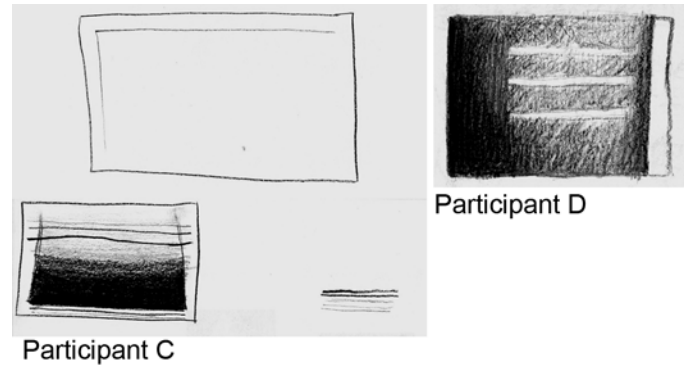


圖 63 兩位建築初學受測者的手繪草圖（受測者 C 與受測者 D）

### 5.1.5 使用者經驗與意見

對於利用手繪草圖的深淺作為高度詮釋的測試，受測者意見的方向主要分為兩大類：第一類使用者認為 Spatial Charcoal 並不是一個直覺性的系統；他們需要重新組織他們的繪圖邏輯才能為 Spatial Charcoal 繪畫設計草圖。這一類的设计者都對時下的 3D 繪圖軟體和等角透視法相當的熟悉，他們認為 Spatial Charcoal 只能提供單一面向的設計條件：在 Spatial Charcoal 內所產生的模型都只有一個層次，並不滿足建築師對多層空間設計的思考。而且都只能對上面的物件進行思考（由於較深才能被詮釋出來），沒辦法繪畫出在面狀下的結構性的線條。另外的意見包括了如何控制面狀與線條的厚度，同時也有認為用另外的投影法進行詮釋或許會更佳的意見。

第二類使用者則是認為 Spatial Charcoal 很有趣味性；這一類的使用者都是較熟悉於繪畫手繪草圖和炭筆畫。他們認為 Spatial Charcoal 是類似於將實物素描反過來的一種設計過程，因此他們很容易便能熟悉 Spatial Charcoal 的思想模式，並認為這樣的詮釋方式同時可使用在平面和立面的設計過程中，對他們有一定的幫助。

詮釋方式實驗的結果直接影響了 Spatial Charcoal 詮釋方式的重新整理與建立，除了保留對連續面狀與線條的詮釋方式外，更發展出區域面狀模型的詮釋方式，確保詮釋後的空間模型有更多層次的機會。

## 5.2 Spatial Charcoal 系統測試

本實驗在 Spatial Charcoal 發展完成後進行，爲了了解使用者對 Spatial Charcoal 整體過程的意見而進行操作性的使用者評估，本實驗主要針對區域面狀模型爲主，以連續面狀模型爲輔進行詮釋與建模，受測者繪畫出面狀的手繪草圖，掃描成電腦圖檔後用 Spatial Charcoal 將其詮釋爲數位模型。經過 Spatial Charcoal 生產出來的模型刺激後，設計者可以繼續進行手繪草圖以推演他的設計，也可以利用 Photoshop 等電腦修圖軟體對手繪草圖進行修正，再讓 Spatial Charcoal 運算程式生產出更佳的设计方案。因此，設計者在 30 分鐘的设计過程中是一個手繪草圖↔spatial charcoal 系統來回互動的设计過程。在繪畫完成後進行面談，討論的重點是 Spatial Charcoal 對使用者利用手繪草圖在设计上的幫助與系統的限制，以及設計者對 Spatial Charcoal 操作過程與此詮釋方法的意見。由於輸出 RP 模型需要太長的時間，因此本測試並沒有進行實體模型製作的部分，受測者只會針對 Spatial Charcoal 從手繪草圖到數位建模的部分進行測試。

### 5.2.1 系統測試設定與步驟

此測試中受測者都會被要求繪畫面狀草圖，強調以區域面狀爲主要的詮釋方式，並可以對詮釋過程中的數值進行調校，從而獲得最滿意的空間模型；而受測者也可以在設計過程中使用連續面狀的兩種詮釋方式（方形邊緣和自由邊緣）進行建模。

實驗工具包括了手繪草圖工具和數位工具：

#### 手繪草圖工具

- 一支黑色 marker 筆(含粗細筆頭)
- 一支炭筆
- HB、2B、7B 鉛筆各一支
- 一塊橡皮擦
- 一張衛生紙（擦拭筆觸讓它更均勻）
- 2 張 8K 圖畫紙

#### 數位工具

- 掃描器
- Spatial Charcoal 系統(LUA 程式空間詮釋部分與 Maxscript 數位建模部分)
- Photoshop(開放讓設計者以電腦軟體修改手繪草圖或直接繪畫電腦圖檔)

本實驗主要分爲六個階段：

1. 對受測者進行詮釋方式、Spatial Charcoal 系統和设计题目的說明。
2. 繪畫手繪草圖，设计出一個 4 人居住的小房子，包括了對地形、建築物形成與空間架構等基本的考量。
3. 把草圖掃描成數位圖檔，利用 Spatial Charcoal 對草圖詮釋並建模。

4. 設計者調整 Spatial Charcoal 詮釋的參數，以獲得更佳的詮釋結果。
5. 設計者利用 Photoshop 修改手繪草圖、直接繪畫電腦圖檔或重覆 2、3、4、5 步驟直到受測者主動停止。
6. 在實驗後與受測者面談以立即得到建議。

### 5.2.2 系統測試實驗受測者

本實驗包括了五位受測者，皆為學習兩到七年的建築所學生，他們的繪畫經驗都是 10 年或以上的經驗，同時會在概念設計發展過程中使用手繪草圖的設計者。測試的受測者除了被要求有建築設計的想像外，更要求他們發揮一些素描繪圖的技巧，希望能測試出 Spatial Charcoal 應用在概念設計過程的幫助程度外，同時討論 Spatial Charcoal 對詮釋不同手繪草圖類型和特性時的極限性。

	受測者 A	受測者 B	受測者 C	受測者 D	受測者 E
繪圖經驗	14	10	10	20	13
建築經驗	2	5	7	5	6

表 3 五位受測者的繪圖與建築經驗

### 5.2.3 手繪草圖過程

本實驗的設計題目為小房子的設計，由於在題目說明時有要求受測者盡量以素描的方式進行繪圖，幾乎全部的受測者所繪的草圖都跟一般的建築平面圖有所差別，他們把這個設計過程看似利用手繪草圖跟 Spatial Charcoal 系統進行互動「玩耍」的過程，多於認真地在設計一個四人居住的小房子。





受測者 A (圖 64) 主要利用不同深淺的色塊進行構圖，模型 A1 明顯的顯示出色塊中不均勻而形成面狀的強烈凹凸起伏，而且最深和中間範圍的門檻數值太低，詮釋後的面狀不太完整。模型 A2 的等高容許相差值、最深和中間範圍的門檻數值同時提高，產生出較完整和起伏有一點改善的面狀。經過對掃描的手繪草圖進行詮釋與數值的調校後，受測者 A 嘗試在 Photoshop 把草圖變得模糊化，以改善草圖中不飽和的問題，詮釋出來的空間模型 A3 上的面狀顯得更完整了少許，但改善不大；因此，受測者 A 決定在 Photoshop 對原本的手繪草圖重新描繪一次，詮釋出來的模型 A4 在凹凸起伏方面也有了一定的改善，最後受測者 A 嘗試用連續面狀的詮釋方法對相同的電腦圖產生出模型 A5。

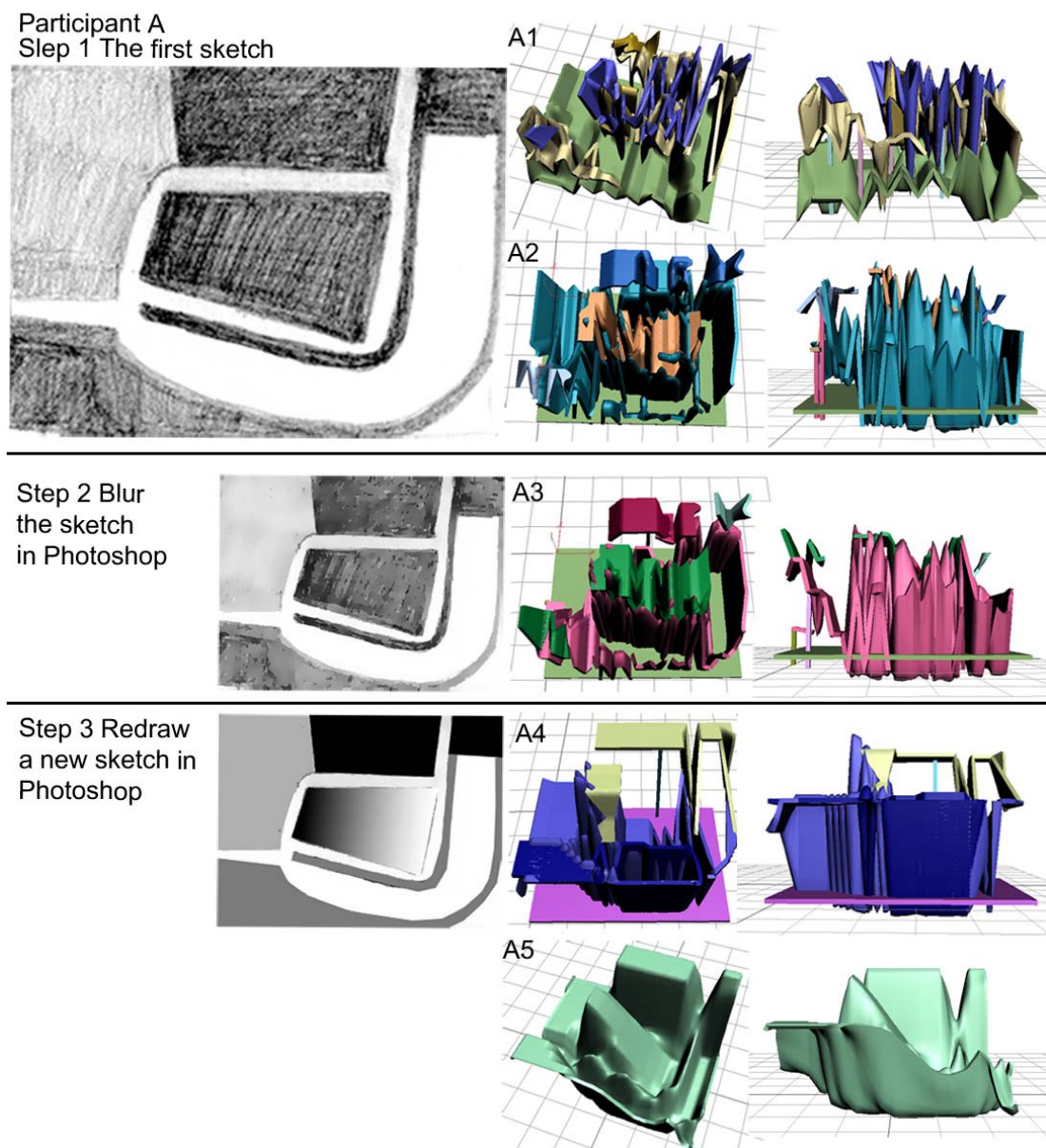


圖 64 受測者 A 的實驗過程

受測者 B (圖 65) 的手繪草圖很像是對植物的想像，由於草圖中很多線條都比在區域面狀詮釋時抓點的間距還要細，因此很多設計者想表達的細節都沒辦法在詮釋後的區域面狀空間模型表現出來。模型 B1 中等高容許相差值、最深和中間範圍的門檻數值都偏低，模型 B2 是將以上數值稍為調高後的詮釋出來的區域面狀模型，但一些較細的線條都被 Spatial Charcoal 誤以為是區塊的邊緣或甚至沒有被詮釋出來。因此受測者 B 決定以連續面狀的詮釋方式對相同的手繪草圖進行詮釋，模型 B3 的建模的模糊度調得太高，依舊看不到草圖中細的線條，模型 B4 是將模糊度的數值調得很低後詮釋出來的結果，有點類似浮雕的效果。模型 B5 是經過在 Photoshop 調整過後所詮釋出來的，由於手繪草圖中圖形的部分都調校得較深而且飽和，所以詮釋出來的結果起伏有所改善，詮釋後的模型很明顯較為完整，而且有架空的效果。

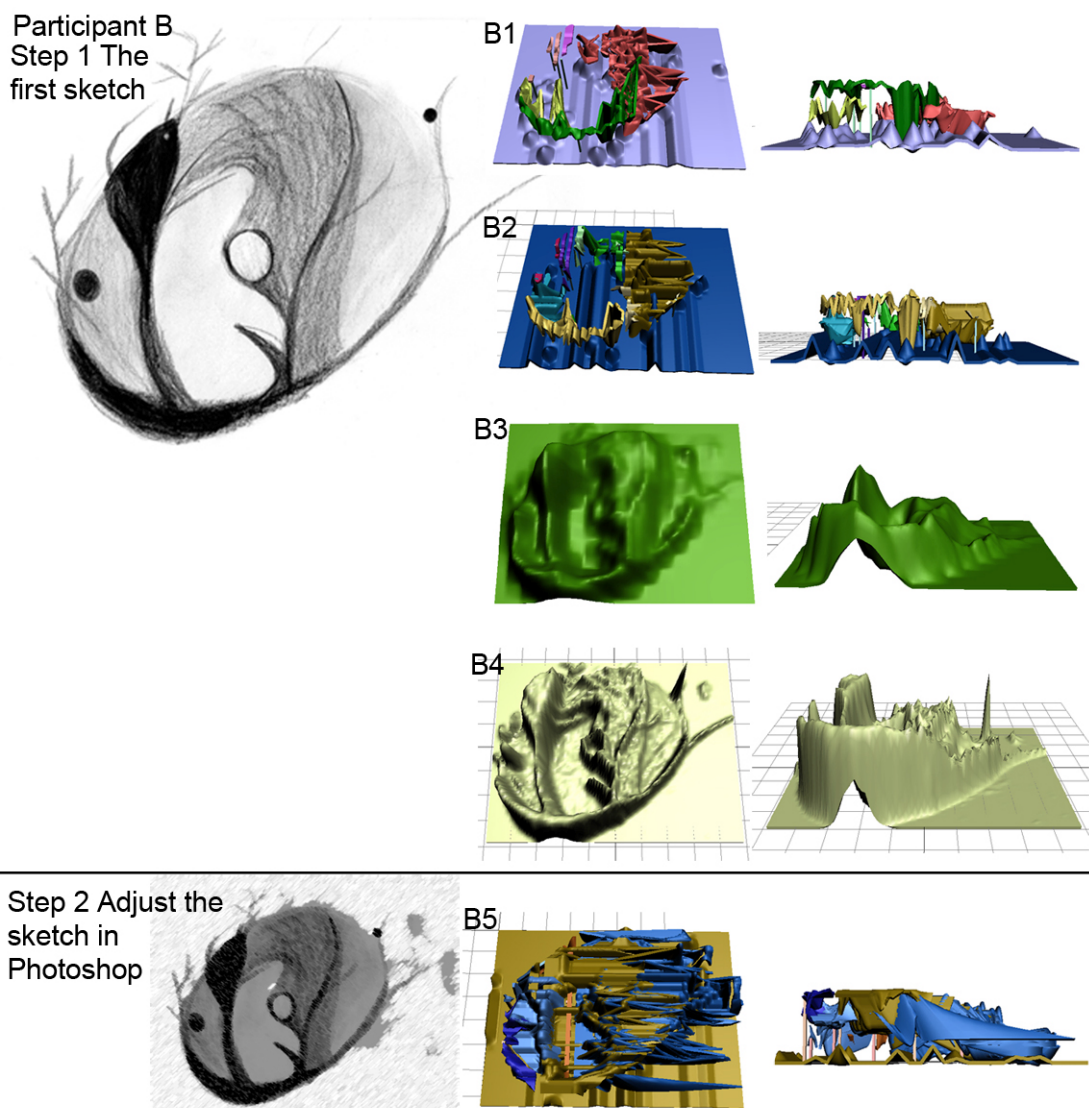


圖 65 受測者 B 的實驗過程

受測者 C (圖 66) 是之前在詮釋方式實驗的受測者，他企圖先用連續面狀的方式對手繪草圖進行詮釋，C1 是自由邊緣的面狀模型，而 C2 則是方形邊緣面狀模型。由於受測者 C 的手繪草圖除了邊緣的很故意較深的部分外都明顯很淺，區域面狀詮釋模型 C3 的最深和中間範圍的門檻數值都偏低，草圖中很多部分都沒有被長高，模型 C4 將兩個門檻的數值都調高，並將等高容許相差值和抓點的間距調高，企圖詮釋出較流暢的空間模型。由於受測者 C 的手繪草圖本身除了邊緣外都很淺，模型 C5 是在 Photoshop 調整了草圖中的灰度後詮釋出來的結果，由於圖形加深後從深淺上來看明顯從白色的背景中抽離出來，詮釋後的模型也因此較有架空的效果，圖形中兩個白色的形狀也被詮釋出結構體的空間關係，同時起伏的狀況也有明顯的改善。

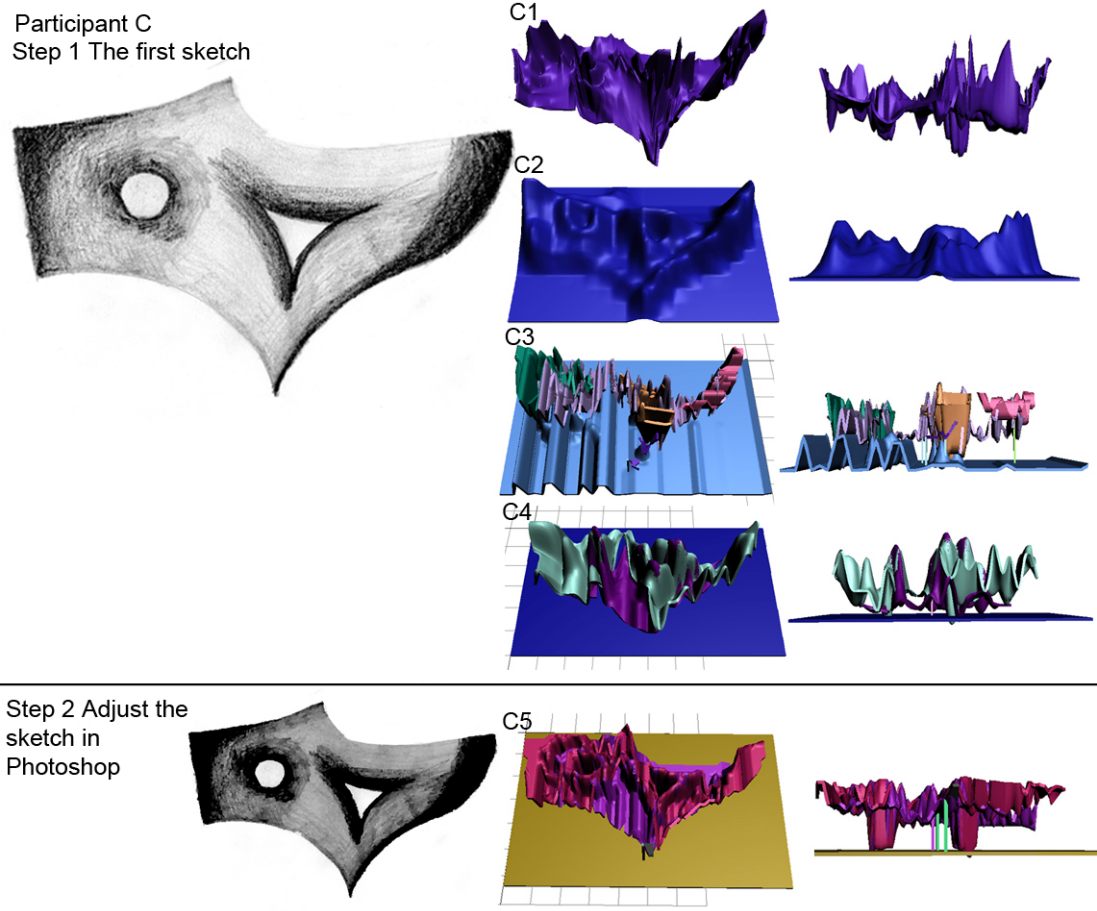


圖 66 受測者 C 的實驗過程

受測者 D (圖 67) 首先利用連續面狀詮釋方式對草圖進行詮釋，D1 是方形邊緣而 D2 是自由邊緣的連續面狀模型。受測者 D 的手繪草圖是邊緣很深而其他部分為灰淺，當邊緣都屬於最深範圍門檻內的深度時，幾乎整個圖形都會被詮釋為模型 D3 中的最高的區域，模型 D3 中的等高容許相差值和抓點的間距都偏低，形成了面狀起伏不平的效果，在模型 D4 中的等高容許相差值和抓點的間距都提高，同時最深和中間範圍的門檻範圍都降低，結果顯示詮釋出來的區域面積減少和較為平順，但跟原本草圖的輪廓有點落差。接著受測者 D 在 Photoshop 內對草圖產生以黑圓點形成的特別效果，由於圖上的色調除了邊緣上很小的灰點外其他的圓點都是黑色的，而剩下的地方都是白，所以詮釋出來的模型 D5 中的面狀產生反覆內外的齒狀邊緣，而高度則形成不斷從最高往返最低的結果。模型 D6 是 D5 的局部放大，可以看出更明顯的齒狀關係。

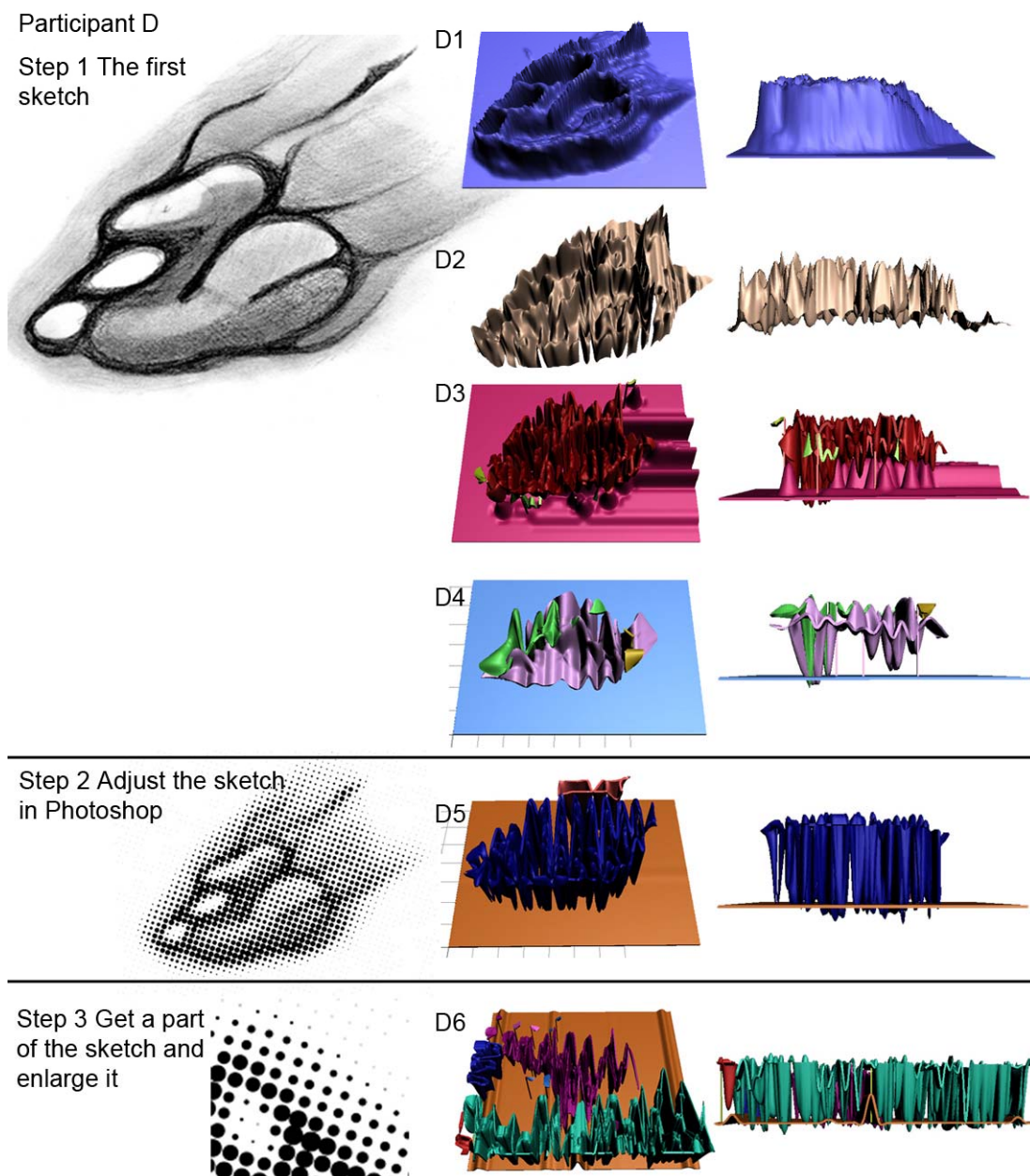
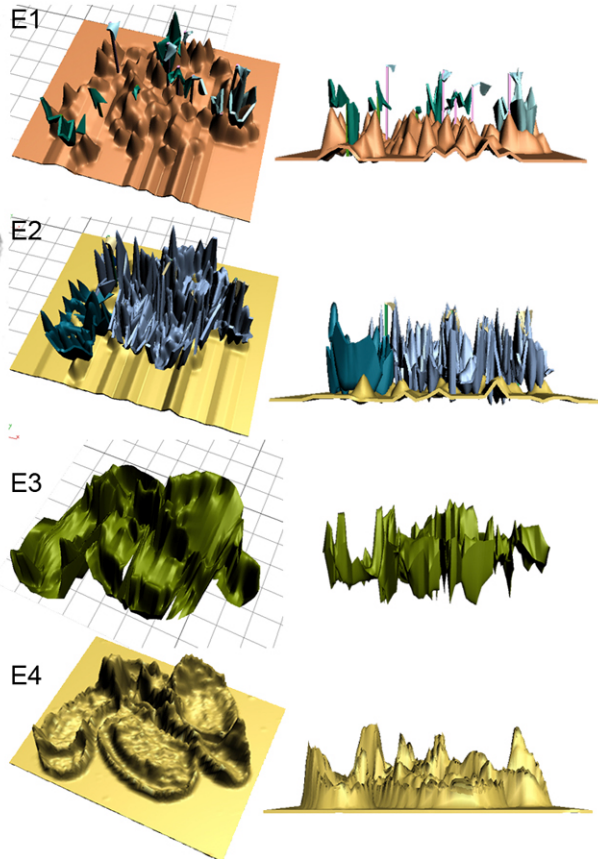
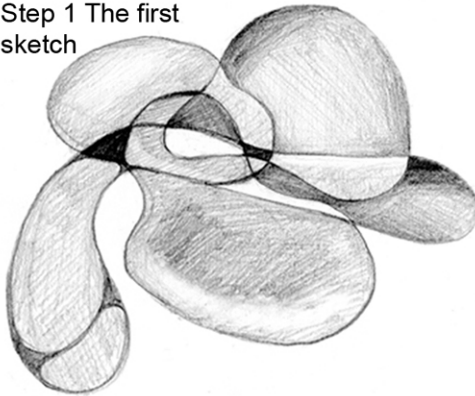


圖 67 受測者 D 的實驗過程

受測者 E (圖 68) 的手繪草圖的邊緣線條非常細，除了這些較深的線條外幾乎都是很淺的區域，因此模型 E1 由於最深和中間範圍的門檻數值都偏低，大部分的圖形都詮釋為底座的範圍，模型 E2 的兩個門檻都調整為較高，因此中間和最高範圍中的面狀面狀都較完整，但仍是起伏不平。E3 和 E4 是利用連續面狀詮釋出來的自由邊緣和方形面狀模型。接著受測者 E 在 Photoshop 內對原來的草圖產生模糊和提高對比，E5 是根據 E2 的數據相同設定並詮釋出來的模型，邊緣明顯較為完整，而起伏不定的面狀有些微的改善。

Participant E  
Step 1 The first sketch



Step 2 Contrast and blur the sketch in Photoshop

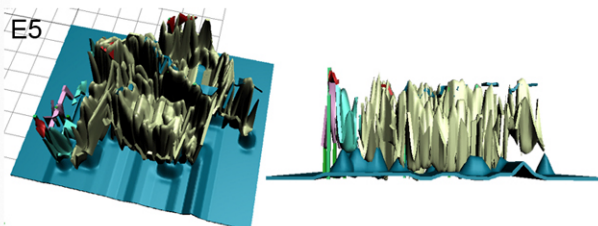


圖 68 受測者 E 的實驗過程

## 5.2.4 使用者經驗

此測試的受測者除了都有一定的繪畫經驗外，他們都皆會在概念設計發展過程中使用手繪草圖。在受測者中有比較不熟悉電腦輔助設計軟體的設計者，認為在設計過程中使用手繪草圖能在不受比例和太多的限制的情況下找感覺，同時會持續在設計過程的不同階段中使用不同投影的手繪草圖。而較熟悉電腦繪圖軟體的受測者則認為在概念設計階段使用手繪草圖較容易勾勒出設計的雛型，才會接著使用數位 3D 軟體。

由於測試的時間只有 30 分鐘，一般受測者繪畫完手繪草圖後已過了 15 分鐘，再經過掃描，Spatial Charcoal 的詮釋建模與數值調整後一般都已花了 20 到 25 分鐘；因此，沒有任何一名受測者繪畫第二張的手繪草圖。受測者在調整詮釋數據後選擇使用 Photoshop 對原本草圖進行修正或重繪，一般修正的部分包括草圖的模糊度、圖形的灰度加深和黑白對比。除了時間的限制外，Spatial Charcoal 詮釋過程中調整的數值和不同詮釋方式都是程式語言，而沒有完整的使用者介面，因此受測者在對詮釋的數值進行調校時都需要本人在旁協助；加上對系統根本上的不熟悉也會造成受測者操作上的混亂。

使用者繪畫手繪草圖，詮釋出空間模型，接著調校詮釋的數據再生產出模型，修改自己的手繪草圖再重覆以上的操作過程，類似 Schon 所提出的看－動－看模型 (Schon and Wiggins, 1992)，在 Spatial Charcoal 中動的部分包括了繪畫、調整詮釋數據和修改手繪草圖，而看的部分則是手繪草圖和詮釋出來的空間模型 (圖 69)，而細節的口語分析則需要在未來研究中深入探討。

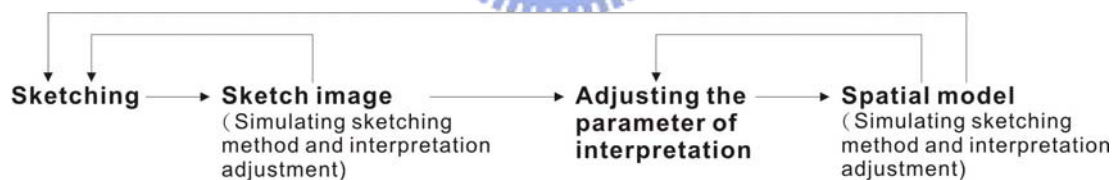


圖 69 Spatial Charcoal 設計行為循環

## 5.2.5 使用者建議

使用者的建議主要分為詮釋方式的建議、操作過程的建議和其他建議。關於詮釋方式的建議，大部分的受測者都認為詮釋出來的結果跟想像有點類似，但又有點意想不到的效果，很有啟發性。當然這樣意想不到的效果其實也包括了一些 Spatial Charcoal 詮釋誤差與詮釋出來的模型不夠平順的結果，因此也有受測者認為詮釋的結果要盡量準確與平順比較好。一位受測者認為手繪草圖時跟素描認知中，較深的部分應該詮釋為較低的地方有反過來的感覺，但以建築觀念來看卻是很合理的，就像繪畫平面圖時，深的便應該在較高的地方。除此之外，大部分的受測者都認為詮釋方式還有更多可能性，例如以立體透視的詮釋方式、往另一個向度長出形體的詮釋方式、以草圖上打格子或斜紋等資訊詮釋出不同的長高方式。

而在操作上的建議，大部分的受測者都認為現在 Spatial Charcoal 系統並沒有使用者介面，讓使用者沒辦法在很短的時間內即時有效地使用。一位受測者認為區域面狀詮釋方式中層次（深淺範圍的數量）的數量如果可以調動的話會更好。一位受測者則認為詮釋時數據的控制很繁瑣，而且使用者不可能一次便了解數據要如何組合才能詮釋出最佳的空間模型，因此應該整理成例如均勻漸層或階梯效果等圖形（icon）按鍵，越簡單且精確的操作方法才能對設計過程更有幫助。另一位受測者則認為 Spatial Charcoal 的詮釋過程很像在電腦 3D 軟體中實行 Photoshop 濾鏡(filter)的做法，並認為可以繼續發展出 Gehry filter 和 Hadid filter 等，以簡單按鍵進行詮釋的功能。除此之外，兩位受測者均認為手繪草圖詮釋後有 RP 模型會很有幫助，因為這樣能更了解立體的概念。

在 Spatial Charcoal 的可行性與使用領域方面的建議，全部的受測者都認為 Spatial Charcoal 很有趣，而且想花更多時間多玩玩嘗試出設計不同的可能性。其中一位受測者則認為 Spatial Charcoal 對數位藝術的領域應該也可以有一定的幫助。



## 6. 結論

本研究針對概念設計發展階段，利用對手繪草圖進行空間詮釋並生產出 RP 實體模型，突破時下雖要長時間操作才能建造出數位模型與 RP 模型的困境；同時希望詮釋出來的數位與 RP 模型能刺激設計者更多的想像，讓設計者同時受惠於天賦的手繪草圖能力以及強大運算與塑型能力的數位工具。本研究發展出 Spatial Charcoal 系統，當中包括了詮釋與建模的運算功能。使用對象主要針對熟悉手繪草圖，並同時對數位工具有需求的設計者。Spatial Charcoal 的使用者首先繪畫線狀或面狀的手繪草圖，再選擇以不同的詮釋方式進行數位建模，設計者可以改變詮釋的運算數值從而得到更佳的空間模型，這樣的從手繪草圖到空間模型的设计過程是循環性的，直到設計者得到了合適的设计方案為止。本研究在詮釋方式建立的過程中，發現了詮釋方式的不同會引起對繪圖方式與建築形式關鍵性的影響，三者間更會形成循環的互動關係。

### 6.1 研究重要性與回饋

在一般使用手繪草圖的设计過程中，設計者在繪畫草圖時同時也建立著空間詮釋的方式，設計者對手繪草圖和空間形式的經驗會因為空間詮釋的方式同時受到影響，因此，繪圖與空間形式有著相互作用的關係，久而久之，設計師甚至會在繪圖與空間設計上有著連貫的形式或風格。Spatial Charcoal 利用實作的方式強調從草圖轉化為空間形式與設計思考過程中，空間詮釋方式的重要性。

電腦和紙筆不應只是各自獨立的设计工具，電腦和手繪草圖使用上的結合增加了手繪草圖應用上更多的可能性。Spatial Charcoal 讓設計者在概念设计的過程中，可以利用草圖直接產生數位與實體模型，刺激设计的想像。利用手繪草圖的自動數位建模提供方便的轉換方式，取代了以往為了輸出數位形體而費力建模的设计過程。除了快速的數位建模外，Spatial Charcoal 的最大目的是讓手繪草圖直接輸出為實體的 RP 模型，設計者可以直接跳過在電腦中繁瑣的操作，並享受到數位工具所帶來塑型的趣味性，以及實體模型所帶給設計者可觸碰立體化的设计經驗。

本研究讓不同設計者以不同繪圖方法繪畫草圖，系統可以直接輸出相對應的有手繪特性的概念模型。設計者在簡單熟悉整個的设计過程後，便由於操作經驗所驅使下回饋到手繪草圖上，對繪畫線條與深淺等作出修正的控制而產生出更符合他們想像的實體概念模型。設計者可以在繪畫概念草圖時想像成同時操作實體模型，加強了設計者繪畫手繪草圖時立體形體的想像。在應用層面上，Spatial Charcoal 除了適合在一般建築概念设计模型的生產外，同時強調非建築的 3D 創作可能性，應用的層面包括了家具设计、地景设计、浮雕和建築裝飾等實體模型的製作上，當然也可以應用在數位藝術的創作領域上。



## 6.2 研究限制

由於本研究只有對較簡單的草圖深淺長高詮釋方式進行發展，很多的繪圖方式和思考模式都會因為詮釋方式的單一性而形成限制，更多的空間詮釋方式可以在後續的研究中繼續發展。

在技術的發展方面，由於研究者過去為純建築背景，對程式語言間的整合能力較為欠缺，並沒有把系統中所用到的程式語言連貫起來：讀取的方式都是從 Lua 程式語言建立建模資料檔，然後用 Maxscript 讀取資料檔並建立出空間模型，最後輸出 RP 模型時則在 Insight 內進行。至於詮釋與建模運算方面，本研究只有對部分的雜訊進行處理，為了得到更準確與精細的空間模型，這方面的處理需要更多的努力。另一方面，現在使用者對詮釋運算參數的控制，皆只能在程式語言內直接進行，造成了使用者操作上額外的困擾，簡單易用的操作者介面是絕對需要在後續的研究中被開發的。

本研究所利用 RP 而不是較快速與廉價的鐳射切割機 (laser cutting machine)，RP 的模型輸出後不用透過手動組裝，較適合初學者，但較長的輸出時間與不便宜的價格可能會對一般學生操作概念模型有一定的困擾。而本研究在很多的案例說明與系統測試中，由於時間上的限制都只有詮釋出數位模型，而沒有輸出實體的 RP 模型，造成了在討論實體模型對設計者的影響這一議題上不夠深入的探討，也是本研究的一點缺陷。

## 6.3 未來研究

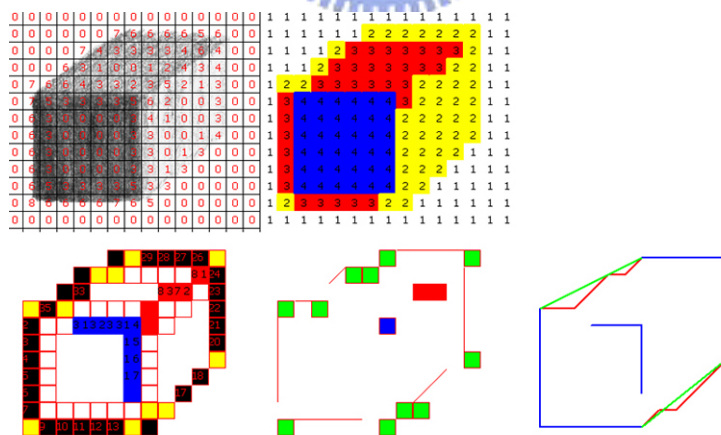


圖 70 未來研究－Spatial Charcoal 對等角透視的手繪草圖進行詮釋

在設計過程中，從平面繪圖轉化為立體空間概念的詮釋方式是非常多樣性的，繪圖投影法，空間概念等因素都會影響詮釋方式的建立。Spatial Charcoal 所應用的平面深淺長高的詮釋方式是根據較為簡單的空间概念發展而來的，未來研究可以發展以不同投影的手繪草圖進行詮釋的可能 (圖 70)；另一方面，詮釋的空間設定也應該被更深入的探討，

例如深淺可以詮釋為不同的傾斜度、草圖上線條和面狀可以被詮釋為不同的空間元素等。

回應研究限制中使用者介面的問題，未來研究中除了要解決基本的使用者介面外，可以進一步以不同的詮釋方式發展成不同的圖形按鍵；更可以讓設計者以個人的空間概念挑選自己的詮釋方式組合，再加上人工智能等技術對設計者詮釋習慣的記錄，自動控制詮釋系統的運算參數，從而發展出個人化的詮釋系統。

對 CAD/CAM 不同技術的加入應用也可以在未來研究中進行探討。可以發展讓詮釋後數位形體的自動化攤平，並符合鐳射切割機輸出，這樣讓設計者對詮釋出來的實體模型要自行組裝的操作，說不定會讓設計者有更多對設計的刺激與想像。此外，本研究所針對的是較小尺度的概念模型輸出，較大的實體模型將改變詮釋與輸出等方式，同時會影響到繪畫草圖尺度上的關聯。



## 參考文獻

- Anzalone, P. and Clarke, C.: 2003, The Siren's Call, ACADIA 22, Indianapolis, pp.325-335.
- Bechthold, M.: 2004, Surface Structures: digital design and fabrication, ACADIA 23, Cambridge, pp.88-99.
- Bimber, O, Encarnacao, L. M. and Stork, A.: 2000, A Multi-layered Architecture for Sketch-based Interaction within Virtual Environments. Computers & Graphics 24, pp.851-867.
- Breen, J. and Stellingwerff, M.: 2005, Towards Ornamatics, eCAADe 23, Lisbon, Portugal, pp.253-260.
- Do, E. Y.-L.: 1996, The Right Tool at the Right Time-drawing as an interface to knowledge based design aids, ACADIA '96, Design Computation: Collaboration, Reasoning, Pedagogy, University of Arizona, Tuscon, AZ, USA pp.191-199.
- Do, E. Y.-L.: 2001, VR Sketchpad: create instant 3D worlds by sketching on a transparent window, CAAD Futures 2001. Eindhoven, the Netherlands, Kluwer Academic Publishers. pp.161-172.
- Dritsas, S.: 2005, The MiranScript: intuitive calculations, eCAADe 23, Lisbon, Portugal, pp.705-712.
- Elys, J.: 2006, Digital Ornament, ACADIA 25, Louisville, pp.68-78.
- Faruque, O.: 1984, Graphic Communication as a Design Tool, New York, Van Nostrand Reinhold.
- Fraser, I. and Henmi, R.: 1994, Envisioning Architecture: An Analysis of Drawing, New York, Van Nostrand Reinhold.
- Friedman, M.: 1999, Gehry Talks: Architecture + Process, New York, Universe Publishing.
- FRONT: 2006, <http://www.frontdesign.se/>
- Gao, W.-P.: 2004, Tectonics? A Case Study for Digital Free-form architecture, CAADRIA 9, Seoul, pp.519-534.
- Goel, V.: 1995. Sketches of thought. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Goldberg, S. A.: 2005, Designing Continuous Complex Curved Structures to be Fabricated from Standard Flat Sheets, SIGraDi 2005, Lima – Peru, vol.1, pp.114-119.
- Gross, M. D.: 1996, The Electronic Cocktail Napkin-working with design diagrams, Design Studies 17(1), pp.53-69.
- Guena, F. and Untersteller L.-P.: 2006, Towards a Sketching Tool for Architects: 3D Reconstruction of Polyhedron, eCAADe 24, Volos, Greece, pp.132-135.
- Hanna, S. and Mahdavi, S.: 2004, Modularity and Flexibility at the Small Scale: evolving continuous material variation with stereolithography, ACADIA 23, Cambridge, pp.76-87.
- Harrop, P. H.: 2004, Agents of Risk: embedding resistance in architectural production, ACADIA 23, Cambridge, pp.66-75.
- Herbert, D. B.: 1993, Architectural Study Drawings, New York, Van Nostrand Reinhold.
- Igarashi, T., Matsuoka, S. and Tanaka, H.: 1999, Teddy: A sketching interface for 3D freeform design, SIGGRAPH 99, Los Angeles, CA, USA, pp.409-416.
- Igarashi, T., Edwards, W. K., LaMarca, A. and Mynatt, E. D.: 2000, An Architecture for Pen-based Interaction on Electronic Whiteboards, AVI 2000, Plermo, Italy, pp.68-75.
- Janke, R.: 1968, Architectural models, London.

- Jung, T., Gross, M. D. and Do, E. Y.-L.: 2001, Space Pen: annotation and sketching on 3D models on the internet. CAAD Futures 2001. Eindhoven, the Netherlands, Kluwer Academic Publishers. pp.257-270.
- Kai, S. and Russell, L.: 2005, The Redefinition of Ornament: using programming and CNC manufacturing, CAAD futures 10, Vienna, Austria, pp.373-382.
- Kapellos, A., Voser, M., Coignet, P. and Ebnother, I.: 2006, CNC Morphological Modelling in Landscape Architecture, eCAADe 24, Volos, Greece, pp.336-340.
- Kilian, A.: 2003, Fabrication of Partially Double-Curved Surfaces out of Flat Sheet Material Through a 3D Puzzle Approach, ACADIA 22, Indianapolis, pp.75-83.
- Kilian, A.: 2004, Linking Digital Hanging Chain Models to fabrication, ACADIA 23, Cambridge, pp.110-125.
- Kolarevic, B.: 2001, Digital Fabrication: Manufacturing Architecture in the Information Age, ACADIA 21, Buffalo, pp.268-278.
- Krawczyk, R. J.: 2002, Architectural Interpretation of Cellular Automata, Proceedings of the 5th International Conference on Generative Art, Milan, Italy, pp.7.1-7.8.
- Laseau, P.: 2001, Graphic Thinking for Architects & Designers, New York, John Wiley & Sons.
- Lim, C.-K.: 2003, An Insight into Freedom of Using a Pen: Pen-based System and Pen-and-paper, ACADIA 22, Indianapolis, pp.383-391.
- Lim, C.-K.: 2004, A Revolution of the Design Process, CAADRIA 9, Seoul, pp.571-583.
- Lim, C.-K.: 2006, Towards a Framework for Digital Design Process: In terms of CAD/CAM fabrication, CAADRIA 11, Kumamoto, pp.245-252.
- Lissitzky-Kuppers, S.: 1967, El Lissitzky: Life, Letters, Texts, New York, Thames and Hudson.
- Liu, Y.-T.: 1995, Some phenomena of seeing shapes in design, Design Studies Vol 16 No 3, pp.367-385.
- Liu, Y. T.: 1996, Understanding Architecture in the Computer Era, Taiwan, pp.127-153.
- Loukissas, Y. and Sass, L.: 2004, Rulebuilding: a generative approach to modeling architecture using 3D printers, ACADIA 23, Cambridge, pp.176-185.
- Lyon, E.: 2006, Component Based Design and Digital Manufacturing: A DFM model of curved surfaces fabrication using three axis CNC router, eCAADe 24, Volos, Greece, pp.342-350.
- McDonnell, K. T., Qin, H. and Wlodarczyk, R. A.: 2001, Virtual Clay: A Real-time Sculpting System with Haptic Toolkits, Proceedings of the 2001 symposium on Interactive 3D graphics, pp.179-190.
- Mitchell, W.: 1998, Picture This. Build That. Harvard Design Magazine, Fall, 1998, pp.8-11.
- Rappolt, M. and Violette, R.: 2004, Gehry draws, Cambridge, The MIT Press.
- Robbins, E.: 1994, Why Architect's Draw?, Cambridge, MIT Press.
- Sass, L.: 2004, Design for Self Assembly of building Components using Rapid Prototyping, eCAADe 22, Copenhagen, Denmark, pp.95-104.
- Schein, M.: 2002, Applied Generative Procedures in Furniture Design, Proceedings of the 5th International Conference on Generative Art, Milan, Italy, pp.21.1-21.10.
- Schnabel, M. and Kwan, T.: 2004, 3D Crossover – From 3D Scanning to Digital Modelling, Rapid Prototyping and Physical Depiction, eCAADe 22, Copenhagen, Denmark, pp.304-311.

- Schon, D. A. and Wiggins, G.: 1992, Kinds of seeing and their function in designing, *Design Studies*, Vol 13 No 2, pp.135-156.
- Schumacher, P. and Fontana-Giusti, G.: 2004, *Zaha Hadid Complete Works: Major and Recent Works*, London, Thames and Hudson.
- Schumacher, P. and Fontana-Giusti, G.: 2004, *Zaha Hadid Complete Works: Process: Sketches and Drawings*, London, Thames and Hudson.
- Seichter, H.: 2003, *Sketchand+*: a Collaborative Augmented Reality Sketching Application, *CAADRRIA 8*, Bangkok, pp.209-222.
- Sliwka, R.: 2004, *Untimely Fabrications*, *ACADIA 23*, Cambridge, pp.52-65.
- Smith, K. S.: 2005, *Architects' drawings: A Selection of Sketches by World Famous Architects Through History*, Oxford, Architectural Press.
- Suwa, M. and Tversky, B.: 1996, What Architects See in Their Sketches: Implications for Design Tools, in *CHI'96 Conference Companion, Human Factors in Computing System*, Vancouver, pp.191-192.
- Suwa, M., Tversky, B., Gero, J. and Purcell, T.: 2001, Seeing Into Sketches: Regrouping Parts Encourages New Interpretations, *Visual and Spatial Reasoning in Design II*, Sydney, pp.207-219.
- Thomsen, C.W.: 1994, *Visionary Architecture: From Babylon to Virtual Reality*, Munich, Prestel-Verlag.
- Van Elsas, P. and Vergeest, J.: 1998, New functionality for computer-aided conceptual design: the displacement feature, *Design Studies* Vol 19 No 1, pp.81-102.
- Wesche, G. and Seidel, H.-P.: 2001, *FreeDrawer-A Free-Form Sketching System on the Responsive Workbench*, Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology, Banff, Alberta, Canada, pp.167-174.
- Won, P.-H.: 2001, The comparison between visual thinking using computer and conventional media in the concept generation stages of design, *Automation in Construction* 10 (3) (2001) pp.319-325.

## 附錄一 空間詮釋的相關技術討論

### A 手繪草圖轉化為數位影像的基本運算

數位影像是以像素 (pixel) 的方式所顯示，是電腦影像中最小的組成單位，一個像素代表一個獨立的小方塊，有其固定明確的位置，以黑白的圖像為例，每一個像素只有一個灰值。灰值範圍從 0-255 共 256 個數值，0 代表全黑，255 代表全白，數值越低為越黑，數值越高為越淺。Spatial Charcoal 透過獲得此數值轉化為立體座標的 z 座標 (高度值)；本系統取得高度的計算如下：

$$\text{point\_height}=(255-\text{im:GetGreen}(x,y))/\text{height\_index}$$

point\_height 是空間詮釋後的高度，(x,y)是該點的平面座標，灰階圖檔中的灰值等同在 RGB 中任何一個值；這裏是用 GetGreen 取出該點的灰值。由於灰值中越深的數值越小，然而在空間高度上卻是越高，所以利用 255 減去取得的灰值，再除以用來控制空間高度比例的 height\_index，便是定義該點高度的基本數值。除此之外，在區域面狀模型中，point\_height 進行跟門檻值的比對後便能將該點分為深、灰、淺的區域。

圖的解析度代表在一定的面積內像素的數量。為了取得線條軌跡或面狀輪廓，程式運算必須跑遍圖檔上所有的或平均間距上的像素。當遇到某一點的灰值高於門檻值時，運算程式便會依據其運算的目的將這定義為線條或任何面狀的輪廓。這樣抓點的準確性跟圖的解析度以及抓點的平均間距有絕對的關係。

當圖的解析度過低時，原本線條的筆觸低於一個像素的大小時，由於每個 pixel 都必須是一個特定的灰值，原本的線條會變得模糊和不銳利。在線條清楚與不失真的情況下，解析度大概要維持在 100 上下的範圍，然而這種情況下，線條的筆觸會橫跨數個像素點陣。當解析度過高時，線條的筆觸中像素點陣數變得很大量。當筆觸中像素點陣數過大，抓點時會沒辦法判斷點是在線的邊緣還是在中心的位置，而且像素點陣數過大會影響程式運算的效率。

解析度維持在 100 上下範圍時，線條的筆觸會橫跨數個像素點陣。因此程式運算在抓線條或輪廓的點時並不用跑遍數位圖上所有的像素，而是以平均間距的方式抓取草圖上的線條和面狀輪廓。以平均間距抓手繪草圖上的點，再重新建構出由點所建構出來的線條，這樣的線條就是手繪草圖在詮釋後所得到的線條，平面線條上的點加上由灰值運算出來的高度，便是空間詮釋後的立體座標 (x,y,z)。抓點的平均間距會影響到詮釋後線條的準確度，當然間距數值越小，抓點時的點數量便會越多，詮釋後重建的線條就會越精準，但由於手繪草圖有其本身不準確與不飽和的特性，加上線條的筆觸會橫跨至少 3 到 4 個像素點陣，利用一般大約以 10 個像素作為間距來抓點便已足夠，以很小的間距

進行抓點會突顯出手繪草圖不準確的特性，而以越大的間距進行抓點會造成跟原圖越大的偏差。

## B 凹凸貼圖（bump mapping）與位移貼圖（displacement mapping）

在當下的 3D 電腦輔助設計軟體中，利用電腦圖檔的深淺，作為數位皮層建模運算的例子有凹凸貼圖（bump mapping）和位移貼圖（displacement mapping）。凹凸貼圖是常見的貼圖功能，其功能是利用輸入一張有黑白深淺的圖片，淺色部分代表凸出處而深色部分代表凹入處，並形成為在輸出的圖像上所顯示的凹凸紋理。凹凸貼圖主要是讓算圖引擎在運算時以改變頂點法向量的方式來產生明暗不等的紋路，產生出算圖後凹凸紋理的影像而沒有直接改變數位模型的形體；而位移貼圖是凹凸貼圖的進化模式，直接利用輸入的圖片改變數位模型的網格高度，讓模型皮層本身的表面呈現有紋理的效果，多被使用在動畫與遊戲工業中對人物或動物的皮膚和臉部輪廓的建模上。

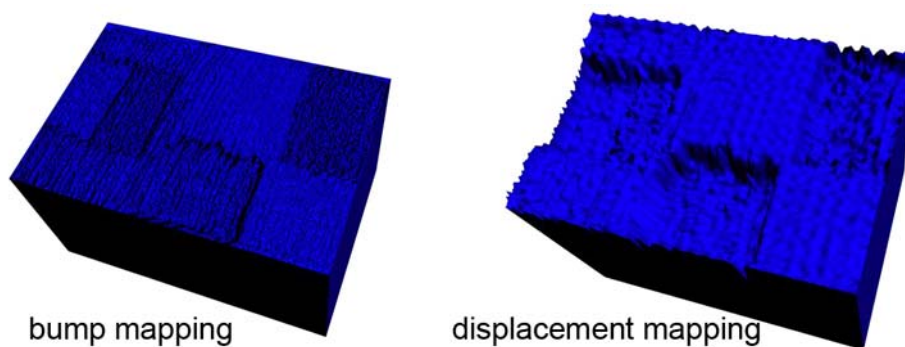


圖 71 凹凸貼圖和位移貼圖

凹凸貼圖和位移貼圖是在立體建模中利用平面圖片深淺的資訊將 2D 轉變為 3D 常見的方式。由於 Spatial Charcoal 企圖要將手繪草圖詮釋後的建成的空間模型輸出成實體模型，位移貼圖對數位模型的網格高度直接移位的功能，可以被利用在 Spatial Charcoal 對方形面狀連續模型的建模運算內。

## 附錄二 空間詮釋的運算方式

空間詮釋的部分皆在 Lua 的程式語言進行，Spatial Charcoal 的 Lua 程式部分會讀取數位圖檔並對它進行空間詮釋，詮釋後的數據會被輸出到 txt 文字檔案，讓繼後的 MaxScript 讀取，本部分會分為 1.線狀模型，2.連續面狀模型和 3.區域面狀模型三個部分進行說明。

### A 線狀模型

Spatial Charcoal 可以詮釋的線性手繪草圖分為非循環的線條和循環的線條。兩者在找尋路徑的方法是一樣的，只是由於一種線條有兩個端點而另外一種沒有端點而已。

找尋路徑的基本方法（圖 72）是先從線條上最左端的一點作為起點，因此這個起始點可能是線條的端點，也可能是線條上任何的一點。每一個已找尋的點都會有一個將要找尋下一點的框線和記錄不讓找尋路徑重覆的範圍。每找尋了新的一點便會利用新的一點的框線找尋下一點，直到沒有路可以走或是回到了第一點的防止重覆範圍，找尋路徑的工作才會停下來。

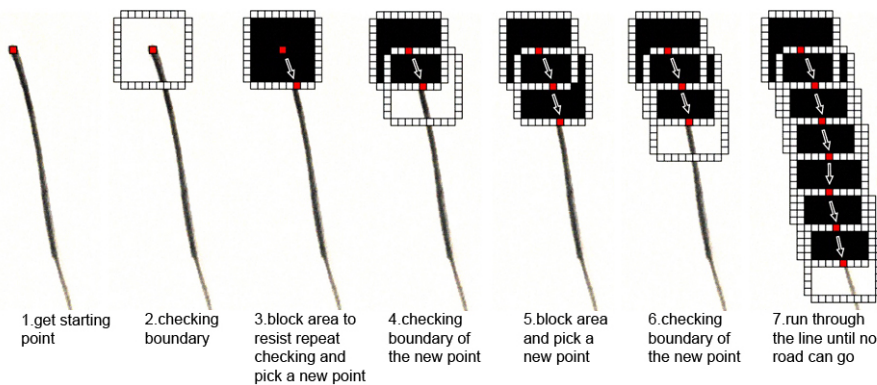


圖 72 對線條追蹤的詮釋方式

在找尋路徑的過程中，最後一點遇到第一點而停下來的話，這樣的線條會被定義為循環的線條（圖 73），線條中的第一點會同時被定義為線條上的最後一點，這樣才能讓之後建模的過程中建構出一條循環的線。

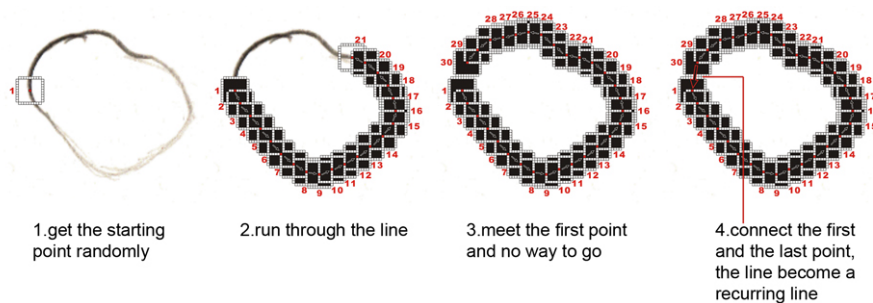


圖 73 循環線條的詮釋方式



另一種在找尋的過程中停下來的判斷，是由於沒有去路而不是遇到點的防止重覆範圍，這樣的線條會被定義為非循環的線條（圖 74）。當被定義為非循環的線條後，由於起點可能是線上的任何一點，所以暫時被記錄下來的線條軌跡可能只是這條線條的其中一段。因此，找尋路徑的運算會在起點的反方向繼續進行，使用相同的方法，直到走到另一頭的端點為止。如果起點的兩邊方向都有線條軌跡的記錄，線條會從一邊的端點作為起點重新排序，走到另一頭的端點，確保一條線條是單方向的記錄資料。

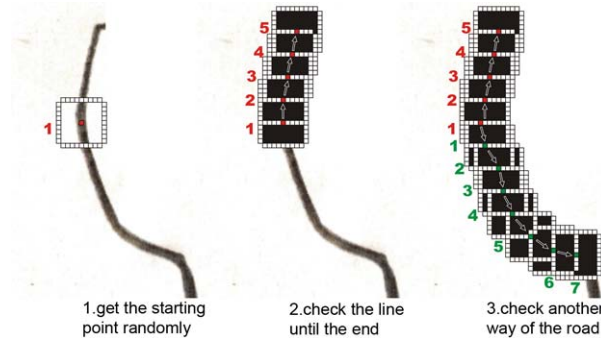


圖 74 非循環線條的詮釋方式

在得到了循環的線條或非循環的線條的軌跡後，程式會把線條的深淺數據記錄下來，作為之後建模定義高度的依據。接著，便是把得到線上的點的座標和高度寫入並儲存成 txt 資料檔案，平面座標加上高度即是三度空間上的立體座標。在 txt 檔案內會先記錄線上點的數量，再順著點的排序把每個點的立體座標記錄下來，形成在圖 75b 的數據資料檔案。

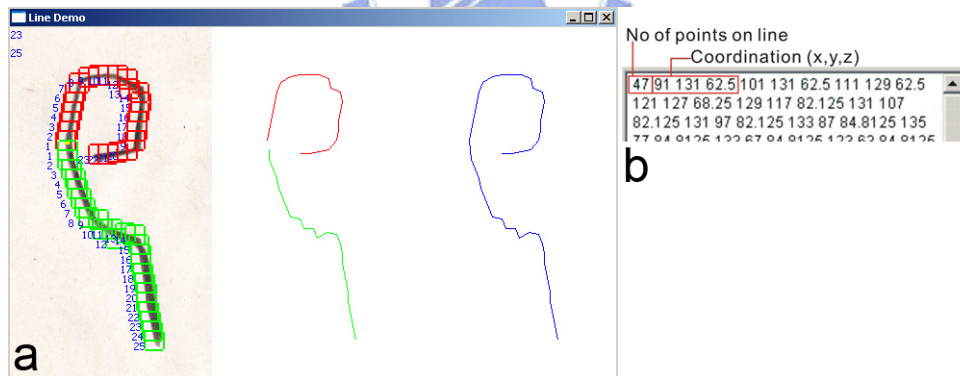


圖 75 (a)Lua 程式中對線條詮釋的過程，(b)對線條詮釋並記錄在 txt 檔案內的資料

## B 連續面狀模型

Spatial Charcoal 可以詮釋的連續面狀手繪草圖分為方形邊緣面狀草圖和自由邊緣面狀草圖兩種，連續面狀模型是對面狀草圖定義為一個連續面的一種空間詮釋方式。兩種不同邊緣的面狀草圖的空間詮釋方式因其建模方式的不同而有異，因此會分開說明。

### B1 方形邊緣面狀草圖

這種面狀草圖會利用 3ds Max 內的 `displace` function 進行建模，`displace` 是利用有灰階深淺的相片讓模型變形的一種功能，在 `displace` function 內，相片或圖檔越白色的部分代表越高，而黑色的部分則為越低。這跟 Spatial Charcoal 高度的定義剛好相反。因此手繪草圖的數位圖檔（圖 76a）必須先變成負片（invert）（圖 76b），再使用 `displace` 的功能。在 Lua 程式運算的變成負片的影像的解析度會大幅減少，因此，為了影像品質的原故，變成負片的過程會在 Photoshop 內進行，並儲存為負片的圖檔。而 Lua 程式運算則會記錄草圖的長度跟寬度，並儲存為 `txt` 檔案並供建模時使用（圖 76c）。

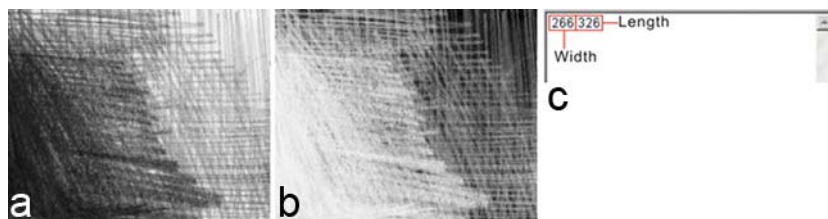


圖 76 (a)草圖原圖，(b)草圖的負片，(c)記錄草圖尺寸的 `txt` 檔案內的資料

### B2 自由邊緣面狀草圖

由於 `displace` function 不提供自由形體的邊緣塑形，因此，自由邊緣面狀草圖使用另一種建模方式，透過建立骨架系統的方式進行建模（圖 77）。骨架建模方式是利用面狀內平行的線條建構出立體的自由曲面。Lua 程式會首先從上，下，左，右四個方向找出四條面狀上的輪廓線，找出四條輪廓線後會根據線上點的數目，決定較長而相對的兩條輪廓線會作為找出面狀內部骨架線條的依據，而較短且相對的兩條輪廓線則會保留中間不超過往內第一條內部骨架線的部分，以作為兩條最外圍的骨架線條。

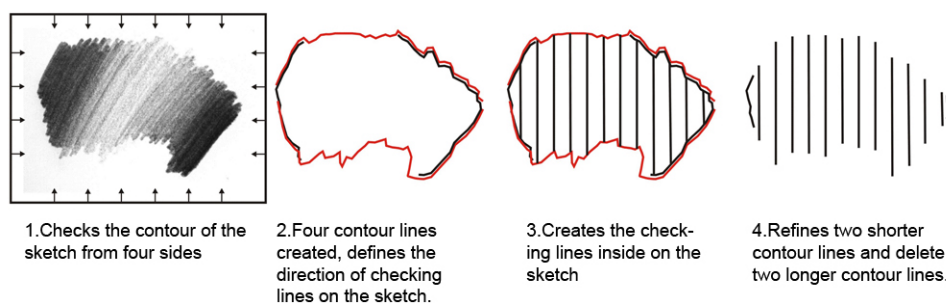


圖 77 自由邊緣面狀草圖的詮釋方式

當外部兩條和內部一定數量的骨架線條被建立後，接著便是要得到這些線上一定間距下所形成的一系列的點的座標以及它們的深淺值。這個部分必須順著同一方向去取得每條線上排序的點的立體座標，才能確保建模時不會因為線條方向不一致而形成面狀扭曲的問題。最後是把運算出來的資料寫在 txt 檔案內並儲存起來，資料寫入的順序依次為線的數量，每條線上點的數量，和順著第一條線的第一點到最後一條線的最後一個點的立體座標（圖 78b）。

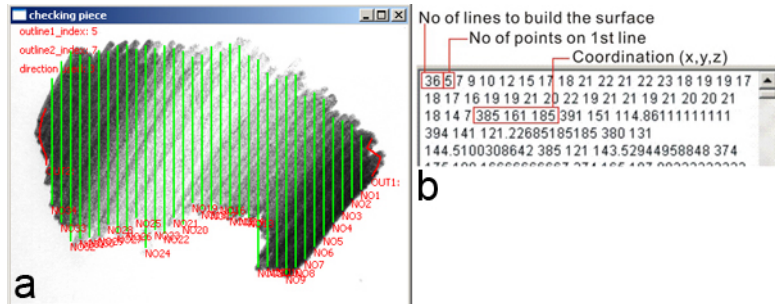


圖 78 (a)Lua 程式中對自由邊緣面狀詮釋的過程，(b)草圖詮釋並記錄在 txt 檔案內的資料

### C 區域面狀模型

Spatial Charcoal 的區域面狀模型是對面狀草圖中不同深淺進行分區而形成三個不同高度的範圍，並詮釋出有層次的模型（圖 79）。最深與中間深的範圍會依照其繪畫的深淺而定義出其區域的邊緣，因為該深淺的筆觸所形成的色塊可能分佈在草圖的不同位置，所以在一個深淺範圍中會有不止一個區塊的機會。而最低的範圍會詮釋為底板，這是一塊連續完整的方形面狀，當遇到深淺值屬於較高的兩個範圍時，在最低範圍上的這個座標的高度值會用最低範圍中高度的平均值取代，確保這個面狀是連續且完整的。最後，運算程式會計算出要支撐起較深的兩個範圍中的各個區塊的支撐物的座標與所需的高度。

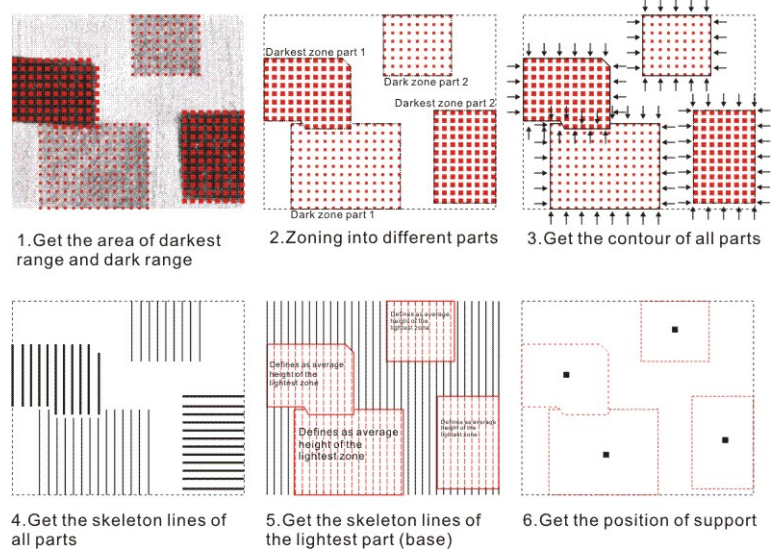


圖 79 區域面狀模型的詮釋方式

在 Lua 的運算過程中，首先會透過草圖上的深淺值定義出三個將會分開處理的範圍：最深的範圍，中間的範圍和最淺的範圍。最深的範圍和中間的範圍的運算方式是相同的，它們最大的差別是空間詮釋後高度的不同因而儲存成兩筆資料而已。因此，此部分只會針對最深的部分進行說明。所謂已定義出最深的範圍，其實這時只有找到了一堆符合該範圍深淺值的點，接下來是要將這些點分區，形成最深範圍的不同區塊。運算程式會根據以下四個條件分區（圖 80）：

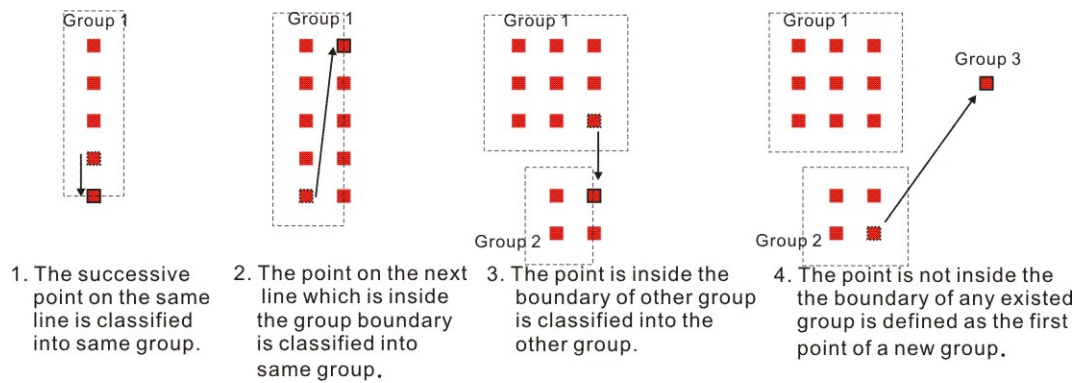


圖 80 區域面狀詮釋時分區的條件

分區後的資料也只是點的座標數據，建模運算所需的資料是每一區的骨架線條上的點的立體座標，每個小區域的建模方式是跟連續面狀模型中自由邊緣草圖的骨架系統的建模方式是相同的。因此，Lua 運算程式必須先找出每個小區域的四條上，下，左，右的輪廓線。每行的最左點和最右點會相對地連成爲小區域左邊和右邊的輪廓線，而每列的最頂點和最低點會相對地連成爲小區域中上面和下面的輪廓線。接下來運算的程序跟連續自由邊緣面狀模型的運算是完全相同的：利用較長而相對的兩條輪廓線找出內部的骨架線條，而較短且相對的兩條輪廓線則會保留不超越最接近的內部骨架線條的中間部分，作爲骨架系統的外圍線條。最後便是取出骨架線條上一定間距的所有點的立體座標。

運算程式在取得了最深和中間範圍的小區域的建模資料後，便是要得到最淺的範圍的座標資料。由於底座是連續且完整的，當遇到較深的區域時，運算程式會將這些較深的區域全都定義爲兩個層次的，在較深的區域下隱藏著底座的部分。因此，當遇到該座標的深淺值高於最淺範圍的標準時，將會以這個範圍中的高度平均值取代。

較高的兩個範圍的小區域很有可能是分散而跟底座部分是分開的。因此，運算程式會在區域的中間部分給予支撐物，從高度零的位置一直撐到被支撐區域的高度。而由於支撐物是從高度零開始，所以包括底層，中間層和最高層的所有區域在有支撐物的情況下都有可能是架空的。

最後的部分，當然是把運算出來的資料寫在 txt 檔案並儲存起來，資料寫入的順序是：底層區域線的數量，線上點的數量，所有點順序的立體座標，中間範圍區域數量，區域

內線的數量，線上點的數量，所有點的立體座標，接下來最高範圍區的數據跟中間範圍相同，最後是支撐物的數量，平面座標與高度。

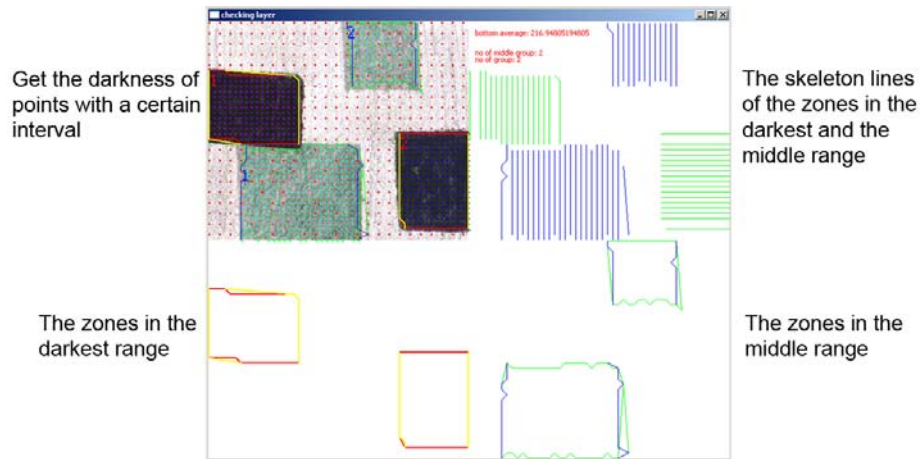


圖 81 Lua 程式中對區域面狀詮釋的過程



### 附錄三 數位建模的運算方式

數位建模的部分皆在 3ds max 軟體內進行，Spatial Charcoal 利用 MaxScript 讀取 txt 檔案的建模資料並控制 max 的內建功能把空間詮釋後的數位模型建造出來。本部分同樣分為三種模型進行說明。

#### A 線狀模型

循環的線和非循環的線的建模方式都是運用建構線狀模型的 ms 檔案。ms 檔案會根據在空間詮釋時記錄在 txt 檔案的立體座標建構 spline 上的點。為了能輸出為 rp 模型，線狀模型必須為有厚度而沒有破面的。因此 maxscript 運算會給予線寬度與高度，讓它變成立體線狀模型（圖 82）。

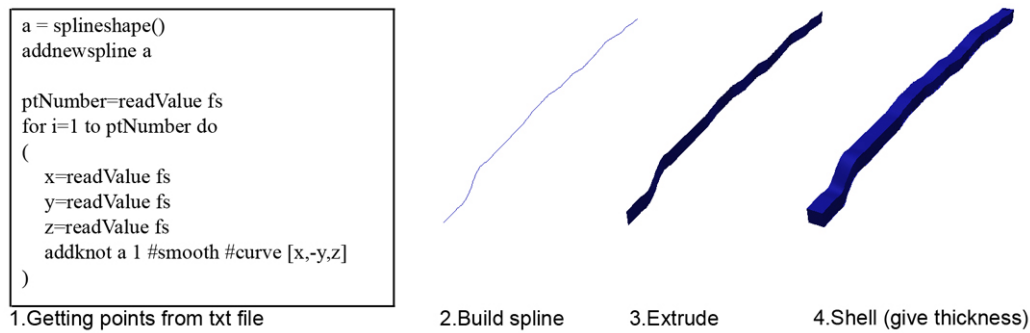


圖 82 線狀模型建造過程

除了立體線狀模型外，Spatial Charcoal 提供讓線條形成牆面的建模方式，兩種模型所需要的空間詮釋時記錄在 txt 檔案的立體座標資料是相同的，最大的差別是牆面模型會多建出一條零高度的線條，運算程式會將這條線條和詮釋高度的線條建構出牆面（圖 83）。

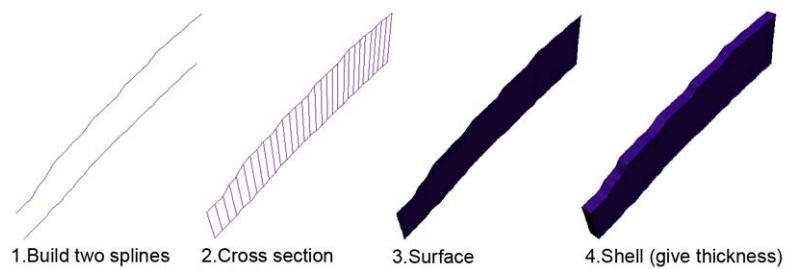


圖 83 牆面模型建造過程

由於得到的模型是以影像圖的像素詮釋出來的，因此，最後建成的模型要修正比例，才會回到跟原本手繪草圖一樣的尺寸。這樣的數位模型便能轉檔為 stl 檔案並在 rp 機器內輸出為實體模型。

## B 連續面狀模型

### B1 方形邊緣面狀模型

方形邊緣連續面狀模型是利用 3ds max 內建的 displace function 進行建模。displace 是根據一張相片圖檔上的深淺對面狀產生凹凸的變形。maxscript 從 txt 檔中得到需要被變形的面狀尺寸，建構出基本面狀，接著命令 displace function 載入原草圖負片 (invert) 的圖檔並改變基本面狀凹凸狀況，同時調整功能內的模糊度改善面狀凹凸不平的狀況。最

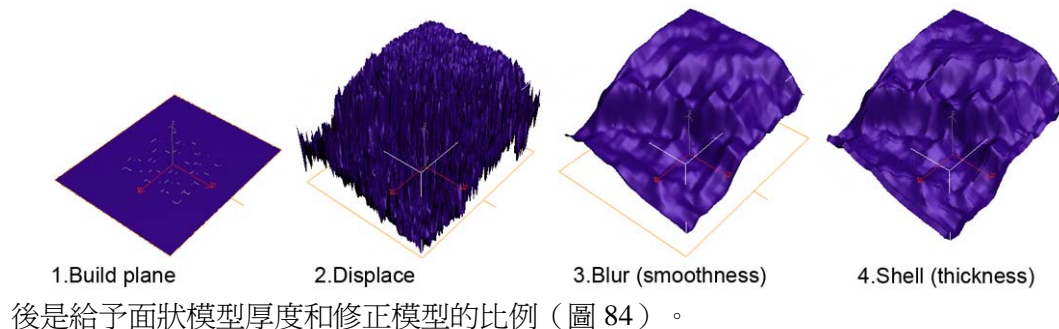


圖 84 方形邊緣連續模型建造過程

### B2 自由邊緣面狀模型

自由邊緣面狀模型的建模方式是以空間詮釋過程中運算出來的骨架系統的線條作為依據，利用 cross section 功能將所有平行的空間線條連成一個網狀系統，並用 surface 功能將面建出來，最後給予適當的厚度和修正模型比例，自由邊緣面狀模型便能輸出為 stl 檔案 (圖 85)。

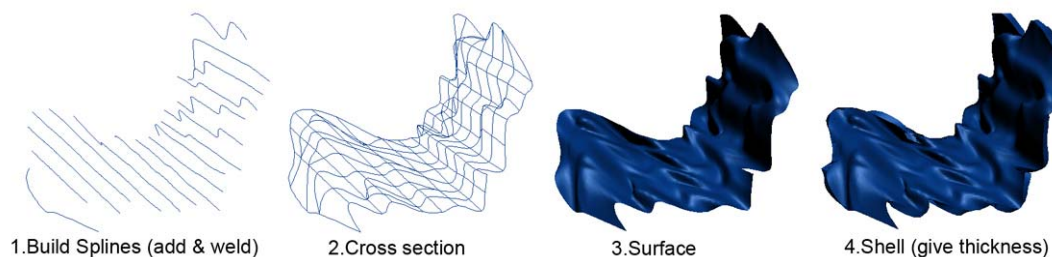


圖 85 自由邊緣連續模型建造過程

### C 區域面狀模型

區域面狀模型中三個區域的所有面狀都是跟自由邊緣面狀模型的建構方式相同。其建模的順序為：首先跟著數據中的立體座標資料建構支撐物，接著是建構底座的面，中間範圍和最高範圍的所有面狀。最後是給予所有面狀高度並修正模型的比例（圖 86）。

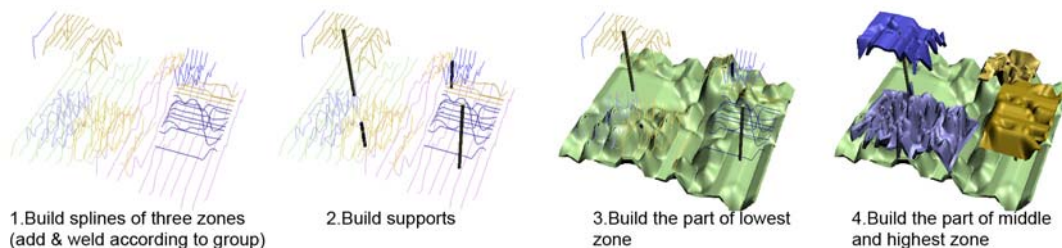


圖 86 區域模型建造過程





## 附錄四 輸出 RP 模型

stl 檔案能夠輸出為 RP 模型必須具備三角平面、封閉型體和法線朝向一致的要求，3ds Max 提供所建構出的數位模型完全符合能轉檔為 stl 格式並能在 RP 機器中生產出來的要求。當設計者將數位模型轉檔為 stl 格式後，Insight (RP 輸出軟體) 讀入 stl 檔案後便能開始計算製作實體模型所需的資料，RP 軟體 Insight 是提供 CAD 和 CAM 之間資料轉換的平台，讀入後的模型資料需要經過簡單的設定和四個按鈕的操作步驟，才能經由 RP 機器輸出實體模型。本研究在 Insight 的基本設定如下：

1. 製造模型裝置 (Configure Modeler) — 這是軟體對輸出機器、模型材料、支撐材材料、噴頭和每層切片高度 (slice height) 的最基本設定，主要是視乎 RP 機器的型號來決定的。交通大學建築研究所使用的 RP 裝置為熔解沉積法 (Fused Deposition Modeling, FDM) (以平面成形的的方式，一層一層的堆疊模型斷面，堆積成立體模型)，機器名稱稱為 Prodigy Plus (圖 87a)，模型材料為 ABS P400，支撐材為 ABS P400SR，模型材料和支撐材的噴頭皆為 T12，而切片高度 (slice height) 的設定選定為中等的數值 0.2540。

2. 單位和大小 (Units and Scale) — Insight 提供兩種單位：英吋 (inches) 和公釐 (mm, millimeters)；在輸出實體模型前，設計者必須將單位設定為 3ds Max 所常用的單位，即是公釐 (mm)，才能確保模型輸出的比例。除此之外，設計者要注意的是 RP 機器輸出槽的大小，Prodigy Plus 輸出槽的大小為寬長 20x20 公分，高度 30 公分，如果發現模型過大，設計者可以在 Insight 內以控制比例的數值來調整輸出模型的大小。

3. 製造模型設定 (Modeler Setup) — 這裏的設定主要視乎輸出模型的品質來決定，越好的模型品質需要越久的輸出時間，Spatial Charcoal 所要輸出的 RP 模型皆為概念模型，因此設定為一般的品質即可。在這裏包括了四個設定：在部分填充模式 (Part fill style) 中選取最常用的 Perimeter/rasters，先造出一圈外圍邊緣再填滿內部；在部分內部模式 (Part interior style) 中有三種模式可以選擇，包括兩種程度的實體 (solid) 和空心 (sparse) 模式，本研究挑選最省材料和輸出時間最短的空心模式；在可見的表層 (visible surfaces) 的設計中選取一般光柵 (normal rasters) 的模式；而支撐材模式則選取最基本的空心 (sparse) 模式。



圖 87 (a)RP 機器 Prodigy Plus，(b)超音波清淨機

第一部分製造模型裝置的設定基本上只需要第一次的使用設定，第二部分單位和大小由 3ds Max 轉檔成的 stl 檔案匯入時便會自然設定為公釐的單位，因此設計者較需要注意的是第三部分的製造模型設定。Insight 的運算過程包括四個步驟：1.利用 slice 功能運算出每層切片的邊緣（圖 88b）；2.利用 support 功能運算出支撐材的位置（圖 88c）；3.利用 create toolpaths 功能運算出既定的工作路徑（圖 88d）；4.利用 build 功能建立輸出 RP 檔案並傳送工作到 RP 機器。

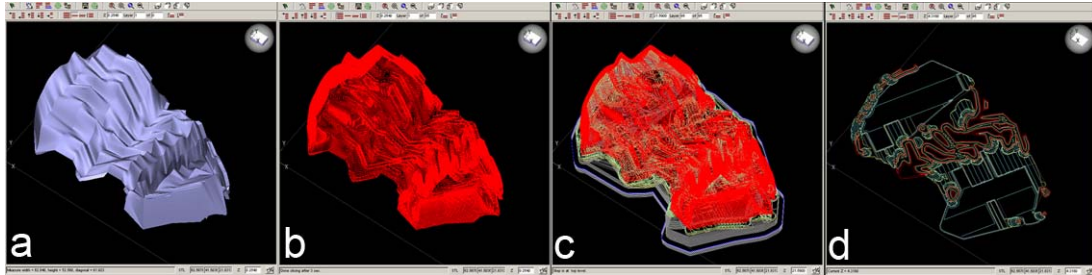


圖 88 Insight 的運算過程，(a)從 stl 檔案開啓的模型 (b) slice (c) support (d) create toolpaths

在 RP 機器所輸出的 RP 模型會同時有模型材和支撐材的存在，支撐材是 RP 輸出過程中穩固模型材的支撐物，輸出後要利用超音波清淨機將支撐材清洗掉（圖 87b）。完成清洗後，便能得到詮釋後的實體模型（圖 89）。



圖 89 輸出的 RP 實體模型