

國立交通大學

建築研究所

碩士論文

初探參數化開口的空間感知

A Study of Parametric Opening for Space

研究生：林庭羽

指導教授：林楚卿 教授

中華民國一〇一年七月

初探參數化開口的空間感知

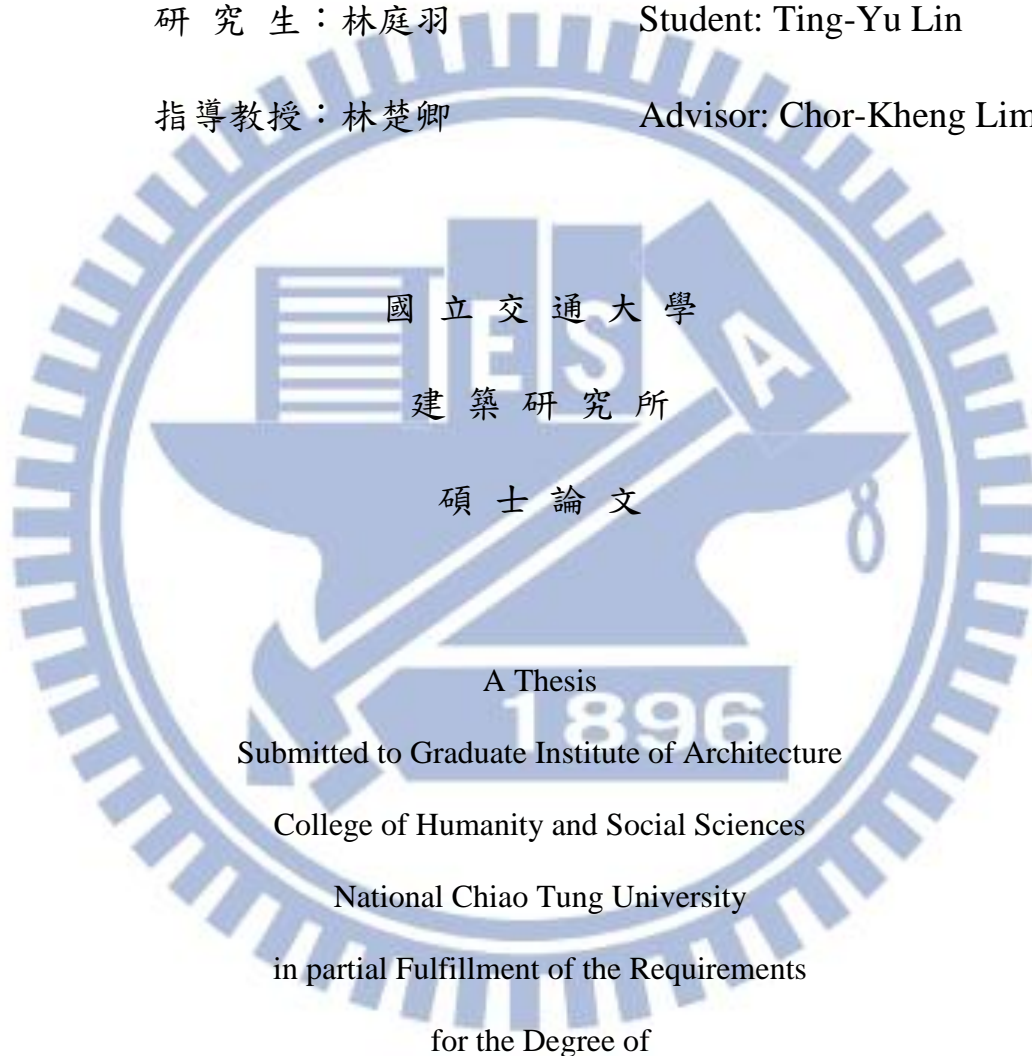
A study of parametric opening for space

研究生：林庭羽

Student: Ting-Yu Lin

指導教授：林楚卿

Advisor: Chor-Kheng Lim



A Thesis

Submitted to Graduate Institute of Architecture

College of Humanity and Social Sciences

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science in Architecture

July 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇一年七月

中文摘要

對空間和居住者來說，開口扮演著舉足輕重的角色，開口的存在，使人們得以感知空間的存在，不同的開口表現，有可能使人們感知到不同的空間體驗。建築師透過設計開口的表現形式來傳達建築師的設計理念，開口的表現形式亦因應各個時期的設計趨勢與構造技術的進步而有各種不同的形態表現，隨著數位設計工具的成熟，開口形式亦因應複雜的建築形態而產生前所未見的樣貌，數學演算法(algorithm)的應用亦促進電腦輔助設計更進一步的發展(Shaghayegh & Jean-Claude, 2009; Bosia, 2011)，於是，愈來愈多的設計師意識到參數式設計造成獨特的形式和組織上的可能性(Schumacher, 2008)。互動設計技術的加入，更改變了原本的開口設計思維與方法。應用互動設計技術支援開口形式表現，開口便可以回應當地的環境變化與使用者的行為造成空間形式改變，也會改變現有的設計方法。

參數式設計雖然讓開口得以呈現出嶄新的風貌，但是有時卻因此而捨棄了開口應當具有的基本條件，為了讓設計者在盡情發展開口之餘時，又能同時兼顧功能、構成或形式這些與形成開口相關的開口因子，本研究試圖探尋參數式開口形成空間感知的可能性，在開口的功能需求、構成方式與形式表現的限制下，以參數形成的開口是否亦能成就空間感知。

本研究從過去的案例中探討開口的功能需求、構成方式和形式表現這三項組成開口的重要因子，以及這三者與空間感知的關係，並整理出主要影響空間感知形成的開口因子，以此進行參數式開口的設計操作，採用 Grasshopper 作為建立參數式開口的設計工具，試驗出以參數式開口塑造空間感知的方法，這些可能的開口設計方式提供設計者在以參數式設計工具進行開口設計時一個可供參考的設計範例。本研究過程分為三個步驟：Step 1. 歸納開口因子。Step 2. 案例分析。Step 3. 設計實作。

關鍵字：開口、空間感知、參數式設計、演算法、Grasshopper

ABSTRACT

The openings play a crucial role as far as space and inhabitant are concerned. The people can sense the space in the openings exist. The different openings present maybe let people sense the space experience is different. Architects express design thinking through the design of openings which moving with every period of design trends and tectonic developments have various presents. The digital design tools maturity made the opening form became more complex by the architecture appearance complexity. The algorithm application also promoted computer-aided design to toward advanced level (Shaghayegh & Jean-Claude, 2009; Bosia, 2011). Therefore, more and more designers realized the unique formal and organizational opportunities that are afforded via sophisticated parametric techniques (Schumacher, 2008). After that, the emergent interactive design influenced the current design thinking and techniques. Applying the interactive design technique to support presented the openings which can respond local environment and user behavior to change the sense of space and the method of design.

Parametric design made openings appear novel forms, but sometimes the openings basic requirements had been lost. When the designers expend their opening design, they have to consider the factors of the openings about function, tectonic and form. This paper tried to search the parametric openings to cause the sense of space. Under the premise of include the factors of the openings about function, tectonic and form. The parametric method creates openings if achieve the sense of space.

This paper discussed the important factors of function, tectonic and form about openings by last cases and the relationship with the sense of space and found the main factors of openings to influence the sense of space be created. Then, using the parametric opening design tool, Grasshopper, executed opening design implement to seek the methods about the parametric openings to create the sense of space. These feasible methods provided openings prototype by using parametric design tools. The research process includes three steps: Step 1. Induce openings factor, Step 2. Case study, Step 3. design implement ◦

Keywords: openings, sense of space, parametric design, algorithms, Grasshopper

誌謝

在此，首要感謝我的指導教授林楚卿老師，謝謝老師從未放棄對我在論文上的指導，關切我的生活，校正我的態度，並提供我所需要的資源，甚至在臥床安胎之時，還得分神照看我的碩士論文，謝謝老師的指導與支持讓我能夠完成這篇論文，願您在生產時平安順利。

感謝口試委員，侯君昊老師、許倍銜老師和李元榮老師在口試時指正論文中的缺失和疏漏，老師們精闢的見解，使我明白自己在論文寫作時的迷思與偏頗，謝謝老師們的指教，讓我獲得不少收穫。

感謝交大建築所的老師們，引領我進入數位設計的大門，謝謝老師們在課堂上傳授的知識，豐富了我的見識與視野。

感謝博士班學長姐們，姿汝、唯晏和凱翔在論文寫作期間的督促與協助，尤其謝謝姿汝提供我在完成論文最後階段時，得以心無旁騖的安身之處。

感謝數位組的同學，Blacka、哲維、黃道和宏賓，懷念與你們一起學習新知、一起分享討論、一起解決問題，還有一起挑燈夜戰的日子，謝謝你們在學習路上的陪伴。

感謝交大建築所的所有同學們，謝謝你們給予的友誼和援助，與你們舉杯對飲的時光是如此暢快。

感謝我的母親，謝謝你在我成長路上的包容與溫柔，讓我可以選擇自己的方向，這些年讓您擔心了，。

感謝所有曾經跟我說過「加油！」的你們，帶著你們的祝福和關懷，讓我可以更堅定地繼續往前走。

目錄

中文摘要	I
ABSTRACT	II
誌謝	III
目錄	IV
第一章 緒論	1
1.1 前言	1
1.2 研究問題與目標	2
1.3 研究方法與步驟	3
第二章 文獻探討	5
2.1 開口的組成	5
2.1.1 開口的功能	6
2.1.2 開口的構成	7
2.1.3 開口的形式	8
2.1.4 開口的功能、構成和形式與空間的關係.....	10
2.2 開口的演進	11
2.2.1 工業革命以前的開口	12
2.2.2 工業革命之後的開口	13
2.2.3 數位時代的開口	14
2.2.4 數位時代，加入互動設計技術的開口.....	17
第三章 開口因子	19
3.1 功能因子	20
3.2 構成因子	21
3.3 形式因子	22
3.4 開口因子與空間感知的關係	24

第四章 案例分析	28
4.1 分析對象	28
4.2 分析	29
4.3 綜合分析	42
4.3.1 功能因子變數	43
4.3.2 構成因子變數	46
4.3.3 形式因子變數	48
4.3.4 空間感知的方向性	50
4.3.5 空間感知的通透性	50
4.3.6 空間感知的裝飾性	51
4.3.7 空間感知的可變性	52
4.4 總結	53
第五章 設計實作	55
5.1 演算法(ALGORITHM)	55
5.1.1 L-SYSTEM(LINDENMAYER SYSTEM).....	55
5.1.2 VORONOI DIAGRAM.....	57
5.1.3 CELLULAR AUTOMATA	58
5.2 參數式開口設計	62
5.2.1 方向性	62
5.2.2 通透性	66
5.2.3 裝飾性	70
5.2.4 可變性	75
第六章 結論	83
6.1 結果	83
6.2 研究貢獻	84
6.3 研究限制與未來研究	85
REFERENCES.	86

第一章 緒論

1.1 前言

牆，圍塑出空間；「開口(opening)」，鑿破了空間，
牆，分隔出室內與室外；「開口」，聯繫起室內室外，
牆，是內外空間的轉換介面；「開口」，是內外空間的通連介質。

作為空間元素，牆，劃分內部與外部的空間關係，界定人們的活動範圍，導引人的行動，更具有保護室內居住者的功能，阻絕外在環境對人類造成直接的傷害，在心理層面上，提供人們安全感，使人們得以安心居住在其中，但是為了開拓視野，讓人們可以看見外部的景色，同時引進光線和新鮮空氣，以及追求視野的遼闊，必須在牆上做開口，正如文藝復興時期的建築師 Alberti 所言：「無論從任何地方引進光線，都必須為它做個開口，使我們可以時時自在地看到天空。(Alberti et al, 1991)」，然而，這樣的舉措卻破壞了牆面的整體性，於是，設計者妥善安排開口，使得牆面變的生動。現代主義建築師 Louis I. Kahn 表明了牆與開口的定位(Louis & Dung, 1998)，妥善處理開口為設計者進行設計時需要特別考量的要點。

開口引入光線在空間中產生光影效果，光與影塑造出空間的明部與暗部，激發我們對空間的感知，而空間的感性和功能價值取決於它的採光效果 (Bruno, 1978; Krier, 2010)，開口會促使空間感的形成，使人們得以感知空間的存在，不同的開口表現，有可能使人們感知到不同的空間體驗。

除了光線之外，視野也很重要，窗，框起了環境的一部分，使它成為不斷改變的圖畫受到光線和外界景觀的吸引，人們總是習慣往窗口方向行動(Alexander et al., 1977)。開口與環境相互作用，為空間注入活力，表現了空間與環境之間的關係(Norberg-Schulz, 1971)。空間形象領域轉移到情緒領域的過程，由空間概念來表現，它表明了人與環境的關係，人們面前的世界因空間概念而改變(Giedion, 1967)。Meiss(1990)說明了開口作為窗戶所具備的多重角色，它介入人們與環境之間，又連繫起人與環境之間的關係，開口，試圖消去隔絕外部的藩籬，使人們藉由視覺、嗅覺、聽覺或觸覺來感知外部環境的變化，模糊內外空間的分界，與外部環境相連接，移轉空間知覺，建立延伸到室外的空間體驗，因此，即便身處於室內空間中，人們仍可以得知天氣的變化、室外傳來的氣味、聲響等等。開口，擴展了視野，使人們能夠更為客觀地領略周圍環境的語言。

開口建立空間的連續性，破除牆所圍塑的空間體系，卻被迫收斂於自身的框架之中，在過去，開口困於技術的限制，表現在牆的形式上是固定的、不可變動的，開口比例和尺度只能侷限在人力所能完成的範圍(Frederick, 2007)。工業革命之後，建築技術的進步，鋼構與鋼筋混凝土的發明，牆體不再需要承擔建築體大部分的重量，牆與柱可以各自獨立，外牆僅只作為建築體的皮層(skin)(Ching, 1996; Schittich, 2002; Reiser & Umemoto, 2006; Lang & Schittich, 2007)，窗戶因而可以大面開窗、或者是呈現各式造型的開口形式(Meiss, 1990; Bruno, 1978)，牆面的表現形式因此而得以展現不同於以往的風貌，這些新的構造方式與新的建築材料，使建築師的設計創意得到莫大的發揮，豐富了開口的形式表現，並透過各種構成方式，開口可以兼具許多功能。

隨著數位設計工具的成熟，開口形式亦因應複雜的建築形態而產生前所未見的樣貌，電腦輔助製造(CAM)技術協助參數化(parametric)建築形體得以在真實世界中實現(Barrios, 2005)，利用數位時代的構築技術，讓牆面開口形態可以隨著建築形體生成而依附於結構本身，數學演算法(algorithm)的應用亦促進電腦輔助設計更進一步的發展(Shaghayegh & Jean-Claude, 2009; Bosia, 2011)，於是，愈來愈多的設計師意識到參數式設計造成獨特的形式和組織上的可能性(Schumacher, 2008)，參數式成形讓建築結構體彙集成一個系統，而非以往樑、柱、板、牆有明確定義的建築框架體系(Reiser & Umemoto, 2006)，構件單元構築出整個建築體，同時也生成開口，牆的視覺意象成立於開口組織，空間內部與外部的界線逐漸模糊化。

1990年代開始，互動設計(interactive design)興起，人們的生活型態改變，強調物件必須對外界的刺激做出「直覺的」、「即時的」回應，設計師們開始將互動設計技術引入日常生活之中，創造新的空間形式與生活體驗，恰如 William Mitchell 教授所言：「建築不再是在日光下玩量體的遊戲，而是演變成在空間中玩資訊的遊戲。」(Mitchell, 2000)，若是應用互動設計技術支援開口形式表現，開口便可以回應當地的環境變化與使用者的行為造成空間形式改變，也會改變現有的設計方法。在這樣的發展趨勢下，開口表現形式呈現愈來愈多元的風貌。

1.2 研究問題與目標

對空間和居住者來說，開口扮演著舉足輕重的角色，具有引入光線照亮室內，兼之流通空氣並提供視景的基本功能，開口的存在讓人們能夠感知空間的存在，居住者亦須藉由開口來感知外界的訊息，建築師透過設計開口的表現形式來傳達建築師的設計理念，開口的表現形式亦因應各個時期的設計趨勢與構造技術的進步而有各種不同的形態表現，互動設計技術的加入，更改變了原本的開口設計思維與方法。

不同時代的建築構造技術影響開口形式的表現，設計者必須針對不同的空間條件，設計出能夠滿足其各自不同功能需求的開口形式，在尚未加入互動設計技術之前的開口設計，開口受固定的框架所限制(Frederick, 2007)，從古典建築中常見的豎形窗，一直到數位時代複雜多變的

開口形式，無論是何種開口表現，其形狀、大小、位置都是固定且不可變動的，設計者設計開口形式，讓開口滿足空間的功能需求並建立空間意識，但是這種開口形式是由設計者決定且不可任意更改，使用者無法自行決定開口的表現形式和高低位置，開口被限制在設計者所加諸的框架裡，使用者永遠只能從這個框架裡觀看設計者所框選的風景。

為了調整開口與使用者之間的相互關係，設計師去思考開口能夠給予使用者何種回饋，近年來，有許多設計師所設計的開口可以與使用者互動，讓開口可變動並可回應使用者行為，隨著數位科技的技術愈來愈成熟，互動機構裝置有更高規格的技術支援，在資訊傳遞快速的時代，人們對開口也提出了許多以傳統構築方式難以達到的功能需求，在上述的條件交互作用下，互動的概念運用於牆面開口的設計得以成形，牆面開口變化愈來愈多元且充滿趣味性，當開口模組接收到使用者給予的訊息時，開口可以做出相對的回應。

在目前流行的開口設計中，我們看到許多有趣的案例，參數式設計工具讓設計者達到以往手繪方式難以完成的開口型態，並使開口形式更加千變萬化，科技的進步亦改進了開口的構成技術，連帶使得開口可以具備更多元的功能，參數化的開口與互動開口是當前流行並極力發展的開口表現手法，設計者致力於讓開口可以對使用者行為與環境條件產生反應，並且調整自身機制以回饋使用者與外界環境所釋放的訊息，達到設計者所希望成就的人性化和節能……等等的的需求。互動機制讓開口具備通訊的功能，然而，卻很可能失去了開口應當具有的基本功能，這些失去的功能或許可以由空間中其他的機制取代，但是開口也因此而喪失了最根本的性質，為了讓設計者在設計開口時，仍不忘卻開口最基本的元素，因此，本研究試圖從過去的案例中探討開口的功能需求、構成方式和形式表現這三項組成開口的重要因子，以及這三者與空間感知的關係，目的在於探尋參數式開口形成空間感知的可能性，在滿足功能、構成或形式這些與形成開口相關的開口因子的前提下，讓設計者在架構開口形式與空間形態時，可以盡情發揮想像力與創造力而不至於失去開口的本質，又能達到設計者希望能讓室內居住者感受到利用參數式開口所建立的空間感知，強調人們在感受到開口形式的視覺衝擊、光線通過開口進入空間中產生的光影變化，以及開口將外部環境景色納入室內空間後的空間感知，這些因素讓室內居住者經由視覺上觀察到開口在空間中建立的種種跡象，因而能夠感受到空間感的形成。本研究從開口原本的功能需求、構成方式與形式表現來討論以參數形成的開口是否亦能成就空間感知。

1.3 研究方法與步驟

由於本研究目的在於探尋參數式開口形成空間感知的可能性，設計者在發展參數式開口設計的同時，必須考慮功能因子、構成因子或形式因子這些影響空間感知的開口因子，因此本研究從參考文獻中找出與塑造空間感知密切相關的開口因子，並列舉在不同時代中，具有代表性的 10 個開口案例，以開口因子歸納並分析這些開口案例所具備的功能需求、構成方式與形式表現造成何種空間感知，並整理出主要影響空間感知形成的開口因子，以此進行參數式開口的設

計操作，試驗出以參數式開口塑造空間感知的方法，這些可能的開口設計方式提供設計者在以參數式設計工具進行開口設計時一個可供參考的設計範例。本研究過程分為三個步驟：

Step 1、歸納開口因子

回顧過去的文獻與開口方式，歸納出開口角色須滿足的基本功能需求，建築師必須在現有的構築技術中，找出或發展適宜的建構方式來構成開口，依據不同的空間用途，安排適切的開口形式，藉由開口來定義空間表徵，創造不同的空間感知，由此可見，開口形式表現與功能需求、構成方式和空間氛圍之間有著唇齒相依、密不可分的關連。因此，本研究將建置開口形態的開口因子分為三個主要因子，將這三個因子作為下一步案例分析時的主要依據，其各自的主要元素包含：

- (1) 功能因子：引入光線、流通空氣、提供視景、傳遞訊息。
- (2) 構成因子：材料堆疊、混凝土構築、數位構築、互動組件。
- (3) 形式因子：方向性質、視覺比例、單元重複、動態呈現。

Step 2、案例分析

依時代劃分，在工業革命以前、工業革命之後、數位時代-參數式開口、數位時代-互動開口這四個時期中分別舉出各別具有代表性的開口案例，以 Step1 所整理出的開口因子針對各個開口的功能需求、構成方式與形式表現加以分析，比較出在不同時期下，各種形態各異的開口因子，以及在開口因子交互影響下形成之空間意義，並在最後綜合討論這 10 個案例，歸納出功能因子、構成因子與形式因子所架構出的空間感知為：方向性、通透性、裝飾性、可變性，並整理出主要影響空間感知形成的開口因子，以此進行下一步參數式開口的設計操作。

Step 3、設計實作

依據 Step 2. 所得之足以影響空間感知形成之開口因子作為操作開口設計的條件，在滿足這些條件的前提下，採用參數式設計工具 Grasshopper 進行開口設計實作，以建立指定的空間感知，在本研究中選擇 L-system, Voronoi Diagram, Cellular automata 這三種當前流行的演算法，觀察其圖形結構之特性，在滿足開口因子的前提下，設計可建立指定之空間感知的參數化開口。

第二章 文獻探討

由於本研究目的是為了讓參數式開口也能夠保有其基本的性質，因此，本研究的文獻內容主要在於檢視開口的組成，包含開口的功能需求、構成方式和形式表現，以及因開口而產生之空間感，並回顧過去在不同時代下開口的表現方式。以下即針對開口的組成與開口的演進作為本章文獻探討的內容。

2.1 開口的組成

建築師 Alberti 認為：「每一個房間，都應該要有窗戶，允許光線進入並進行空氣交換，它們應當被應用於室內需求並考慮到牆的厚度。」又說：「無論從任何地方引進光線，都必須為它做個開口，使我們可以時時自在地看到天空。」(Alberti et al., 1991)，完全封閉的空間，容易使居住者感到不安與絕望，只要開一個開口，便可使內部世界與外部世界相通連(Norberg-Schulz, 1971)。由此可見，「開口」一直是建築師在設計建築時必須審慎考量的重要元素之一。最早，人類是為了躲避風雨的侵襲、抵禦寒暑冷熱的變化和防止其他自然現象或野獸的騷擾，需要一個可以保護自身不受傷害，又能維持基本生存條件的安全場所，於是人們利用牆體圍塑出空間，並在牆面上開鑿出開口，藉由開口引進光線和風，可以使室內空間明亮開敞、空氣得以流通。

Meiss(1990)表明了開口作為窗戶的角色定位，包含人們生活的跡象、建築立面的表情、建立居住者觀察外部環境的視野，並且引進光線使室內空間明亮、導入新鮮空氣和室外的氣味，Ching(1996)亦在「Architecture: Form, Space, and Order」一書中陳述了牆與開口在空間中所扮演之角色，牆體本身之存在即劃分出空間領域，並為室內空間提供私密性與保護性，避免室內環境受到外部天氣的影響，於此同時，牆上之開口則重新聯繫起室內空間與室外空間，決定牆面所界定的空間性質，亦決定了鄰近空間彼此相關連的程度。

牆限定了空間，除了具有屏障與分隔出內部和外部空間的功能，兼之具備擔任保護室內居住者的機能，居住者在牆上做開口，追求視野的遼闊，但是卻破壞了牆面的整體性，設計者妥善安排開口，使得牆面變的生動。現代主義建築師 Louis I. Kahn 的詩作中(Kahn & Ngo, 1998)，敘述牆保護了人們不受外部的侵害，然而，因為人們有了想要向外看的慾望，使得人們破壞牆體產生開口，牆因此而感到悲傷，但是後來人們開始妥善安排開口的表現形式，於是牆便高興了，Louis I. Kahn 藉由此詩作表明了牆與開口的定位，妥善處理開口為進行設計時需要特別考量的要點。

就力學而言，在牆上作開口，便破壞了牆的結構體，干擾力的流動(Alexander et al., 1977)，窗戶的存在卻減弱了牆隔絕外部的機能，並中斷了牆的連續性，構造因此而變得脆弱(Meiss, 1990)。Krier(2010)對於在牆面上做開口，視為對牆體的干擾行為，開口打斷了牆面的連續性，卻使空間有了意義。

開口為空間定義出空間關係，決定空間是獨立自主的，或是與其他空間有關連的。一旦牆上沒有開口，就不可能與相鄰空間產生空間或視覺上的連續性(Ching, 1996)。開口使光線穿過空間並照亮室內，提供外面的視野，建立空間和相鄰空間的視覺關係，提高視覺的穿透性，使得空間層次更加豐富。

2.1.1 開口的功能

功能的定義是針對某件事物提出具體的目的與使用需求。現代建築遵循功能作為設計時的先決條件(Bruno, 1978)。空間必須體現功能，並根據其功能要求而進行精確的調整，功能隨時間而改變，它可能與其他功能結合，甚至會為了因應社會發展和技術改變而被取代(Lawson, 2001)。功能作為人們建造建築的首要目的，人們必然得盡力滿足功能上的需求，尊重功能的限制條件，因此，當建築師在設計建築量體時，同時也必須妥善處理開口的形式表現，盡可能以現有的構成技術完成開口裝置，並符合結構與美感的要求。

美國建築師 Sullivan 提出『形隨機能(Form follows function)(Frampton, 1992)』，意即建築的形式，深受建築物的功能需求所牽引，Frank Lloyd Wright 更進一步說明『形式與功能應是精神上的合而為一(Form and function should be one, joined in a spiritual union)』，由此可見，建築形式與功能之間具備緊密的關聯性，建築物的功能需求為建築師進行設計行為的首要考量，而開口作為組成建築的基本元素之一，開口的形態表現也必然深受功能的影響。

人們對開口的基本功能需求是要能夠引入光線，並提供內部空間的通風，兼之拓展人們的視野。「牆上之開口，具備穿透、傳達視野或引進陽光、空氣的功能。(Meiss, 1990)」，開口讓人們得以窺見提供外部環境的景色，既可與外界相連，但又同時具有一種閉合感，倘若室內溫度過冷或過熱，開口還可以調節室內溫度(Alexander et al., 1977)。

開口最先是為維持人們生存的基本條件而存在。時至今日，先進的科學技術讓開口設計可以達到以往難以達到的功能，互動設計技術讓人們生活周遭的實體物件，都可以在其上加裝感測器(sensor)，偵測環境或是人類透露的訊息，結合人機互動、空間設計、人因與電腦感測技術，增進人與環境、物品、服務之間的互動(Moggridge, 2007)。功能遵循程式，無須重新建立或重新塑形，更無須替換材料元件，只需要更動程式中的編碼，即可達到所要求的功能(Mitchell, 2000)。互動設計亦可用於開口設計上，技術的進步，讓開口也具有傳遞訊息的功能，拓展了創造新想

法的空間。

2.1.2 開口的構成

開口的構成，依其所屬的時代不同，而有不同的技術支援與材料供給，以這些構成技術來組織材料，造就出眼前所見的開口形式表徵，因此結構技術與不同時期的開口表現息息相關。

磚，是構築建築的基本材料，普遍被使用來作為建構牆體的單元材料，早在西元前 2100 年，就已經運用磚材來建造 Ziggurat of King Urnammu 這樣的大型建築物(Isler, 2001)。建築師可以藉由改變磚的形體或是堆疊的方式，讓磚牆展現另一種風情，美國加州的「Dominus Winery」(Choi & Lee, 2000)，其結構生成方式是將當地每塊未經修飾的岩石單元隨意堆疊，藉由材料本身形體不一致的性質，使得單元與單元之間產生空隙，日本的「Chokkura Plaza」採用當地 Oya stone 這種透水性高，並且具有容易被切割和雕刻的特性的石頭，作為基本建造牆體的單元(Bognar, 2009)，堆疊生成牆體，空隙即為開口。磚牆依據砌法的不同或是排列堆疊的方式，可使牆面產生多種變化，形成不同的圖樣(Qinghua, 2002)。CAD/CAM 技術的加入，甚至可以計算出磚的形體，使磚與磚可以精確地互相卡接，堆疊生成曲面牆的形體(Griffith & Sass, 2006; Ambrose et al., 2009)。

現代建築顛覆了傳統形式的同時，也對建築技術和材料上投入了極大的熱情(Lawson, 2001)。框架結構體系取代了磚石結構，混凝土和鋼鐵改變了結構型態，新的構築技術讓牆獨立於結構之外，鋼和鋼筋混凝土把結構的重量和應力集中在各個獨立的支點上，從而取消了連續的承重牆，牆不再是互相連結的圍護牆體，每一道牆面都可以縮短、伸長、穿孔甚或是乾脆取消，於是，開口設計破除構築技術的限制，擺脫窗框的束縛，便使得開口的功能獲得提升，改善了內部空間採光的效果，也讓外部立面的表情更有層次(Bruno, 1978)。位於日本的「MIKIMOTO Ginza2 Building」(Mezzi, Comodini, & Marinacci, 2011)將力的流動作為設計的表現形式，利用混凝土可以任意塑形的特性，在二片鋼板之間澆灌混凝土，室內無柱、無牆，支撐起建築物的責任交由包覆其上的外牆所承擔。外牆既是建築物的主要結構體，也是建築物的立面表現。外牆上的開口形狀可以自由隨意地設計，與內部機能沒有直接的關係。

CAD/CAM 設計工具使得近代建築的形態生成趨向複雜(Lim, 2007)，設計者可以更有效率地創造出複雜的開口形式，結合互動設計，建立開口和使用者與環境之間新的連結關係，「阿拉伯文化中心(Institut de Monde Arabe)」南面牆上的控光裝置，開口類似相機光圈的葉片，由機械自動控制縮放，藉由光敏的單元接收外部受光量變化的訊息，再經由開啟與關閉的行為來回應外部環境的變化，讓外牆的開口模組來控制進光量，以進行室內光線的自我調節。另一方面，開口若是設定為與使用者互動的機制，感測裝置感應使用者的行為表現，開口做出相對的回應，呈現一種動態的、富有趣味性的開口形式表現。「Aperture」(Drum, 2007)是柏林藝術大學 Frédéric

Eyl 和 Gunnar Green 的學生作品，由可變光圈矩陣(iris diaphragm matrix)所組成，數百個光敏光圈嵌在牆體上，由接收器與驅動器組成單一光圈模組，是一個可互動也可記錄的顯示模組裝置，當使用者靠近牆面時，光圈半徑會改變，反映進光量的相對強度，光圈可以記錄使用者的行為，產生新的意象與內部與外部的新的通訊頻道，具備動態的通透效果，並能夠創造新的影像和室內與室外新的交流通道，產生豐富的立面表情。

建築師對現存的結構方法提出新的問題，所以需要創造出解決這些問題的新工具(Corbusier, 1986)，新工具的產生又促使新的建築形態生成，開口形式亦受這些構造技術所影響，若要呈現不同的開口形式，必須要有與之相對應的構造技術，新材料、新技術造就新的結構形態，而新的結構形態又誘發新的空間意識，精進技術和材料並非主要的目標，而是幫助人們建構更為豐富的空間意涵。

2.1.3 開口的形式

不同的開口尺寸、位置和表現方式，皆對牆面和空間產生不同的意義(Ching, 1996)。開口大小對應牆面積所佔的比例，以及開口在牆面上的位置，甚至是開口的角度、方向，或是開口在牆面的分布情形，皆會對人們對於空間的觀感造成相當程度的影響。

開口的大小會影響空間結構與空間定義，開口愈大，則牆體的存在感減弱。當開口大到一個程度，牆體就不再是有開口的牆，空間便可以延展到另一空間(Meiss, 1990)。開口可以是水平的、垂直的或整片牆面開窗，開口所提供的視野依其尺寸大小與分散程度，會對身在空間中的人們產生不同的視覺經驗。圖 1 顯示在開口尺寸與整體牆面之間的比例關係之下，具有不同的視覺意涵。

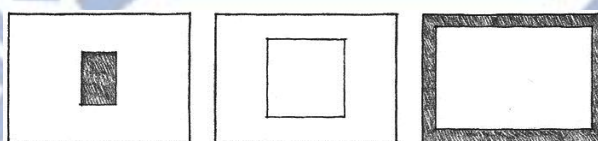


圖 1 開口大小在牆面上所佔據的比例不同，會對觀者造成不同的視覺經驗(Ching, 1996)。

「開口的閉合程度與空間的明確性有直接的關聯。(Meiss, 1990)」開口的大小會對空間感知產生不同的效果，大的開口可以連結到另一空間，建立通往另一空間的動線，小的開口限制人們觀看外界的視野，當窗戶被人們當作是觀看外界景物的眼睛時，景色被窗框限定了(Alexander et al., 1977)。圖 2 顯示開口尺寸大小與空間和人的尺度之間的關係。

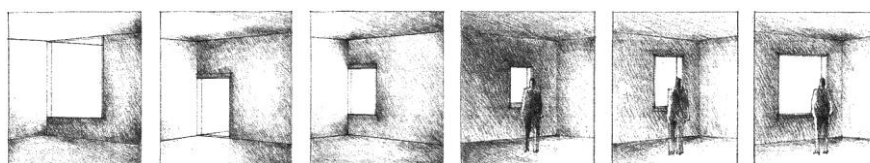


圖 2 開口尺寸和空間及人的尺度之間的關係(Ching, 1996)。

當開口的數量和尺寸增加，空間開始與鄰近空間相融合，牆漸漸失去了圍合感，擴大開口的表面積，使得牆體逐漸消融，視覺重點轉移到牆面上，而非由牆面所限定的空間容積(Ching, 1996)。

圖 3 顯示牆面上的開口位置以及分布情形。開口的位置可以是在整道牆面的中間、偏離中間或是多個開口群聚，位置不同，所呈現的視覺效果亦不同。當開口位於平面中間，視覺上就會呈現出穩定感。當開口偏離中央位置時，在開口和它所偏向的平面邊緣之間，會產生一種視覺張力。完全位於空間圍塑面上之開口，並不會削弱空間的邊緣，也不會減弱空間的圍塑感。空間的造型仍然可以保持完整且易於察覺的(Ching, 1996)。



圖 3 開口位置在牆面上之空間關係：(1) 開口位於牆面中心。(2) 開口偏離牆面中心。(3) 開口群組(Ching, 1996)。

圖 4 顯示位於轉角之開口，其位置以及分布情形所呈現出的視覺效果。當開口位置在轉角處，開口位置可以沿著一邊、沿著二邊或是多個開口群聚在轉角或是位於二平面之間。

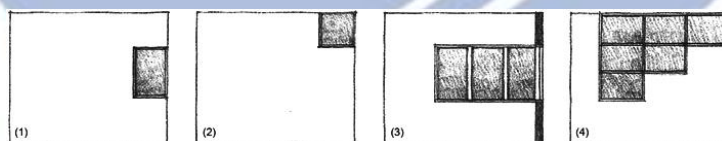


圖 4 位於轉角之開口在牆面上之空間關係：(1) 沿著一個邊界。(2) 沿著二個邊界。(3) 在相鄰二個面之間。(4) 在邊界之開口群組(Ching, 1996)。

位於轉角上的開口可以擷取特殊的景觀，或者是使空間中的角落變亮。對空間採光而言，從轉角開口射入的光線，可以照亮相鄰的牆面以及和此開口垂直的牆面。這些被照亮的牆面本身會反射光線，也成為一個可以照亮空間的光源。轉角開口在視覺上侵蝕平面的邊緣，削弱邊界，侵蝕空間的整體性。開口愈大，轉角的感覺就愈薄弱，使之得以延伸至鄰近的空間，塑造出視覺上的連續性，並與鄰近空間產生交流(Ching, 1996)。

開口形式可以是垂直從天花板延伸至地面，使鄰近牆面產生更為清晰的邊緣，並產生視覺上的分隔效果(圖 5)。

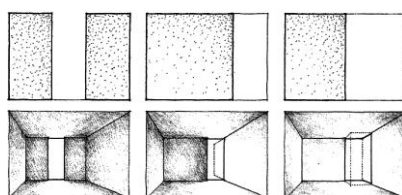


圖 5 垂直方向開口與空間的關係(Ching, 1996)。

水平開口橫跨整道牆面，將牆面分隔成不同的水平層（圖 6）。讓整個建築量體的上下部分產生左右移動錯位的動態，同時，將外部水平拓展的景象引進室內空間，突顯室內外空間水平方向的連結，將牆面分割並使視覺延伸到外部空間。轉角的水平開口，加強空間的水平層，使空間的視景變寬(Ching, 1996)。

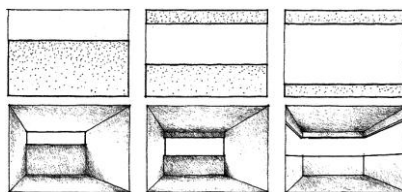


圖 6 水平方向開口與空間的關係(Ching, 1996)。

多個開口（圖 7）可以利用聚集的方式形成平面中的一體組合，或者利用分散的方式來塑造該平面上的視覺移動效果(Ching, 1996)。

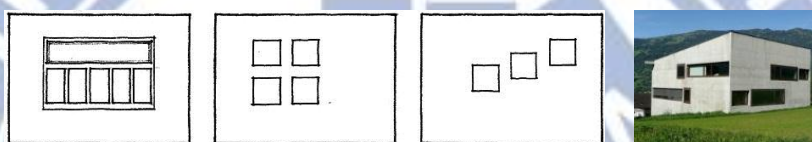


圖 7 開口分布形式造成不同的視覺效果(Ching, 1996)，具有動勢的開口(Valerio Olgiati /Paspels School, 瑞士, 1998)。

2.1.4 開口的功能、構成和形式與空間的關係

光與影，牆和空間是建築的元素(Corbusier, 1986)，開口引入光線的功能，使人們得以感知空間的存在，「空間感，是由人去圍塑或限定的一個空的領域，即一個被包圍起來的空間。(Zevi & Barry, 1993)」，空間由牆面所構成，同樣需要光線賦予它生命(Krier, 2010)。引入光線的開口鑿破全面性的黑暗，驅散了一室的陳痼，光線形塑出空間，沒有光線，空間也隨之消失，「塑造空間的同時，也是在塑造光線。(Kahn & Latour, 1991)」。光影的遊戲塑造出空間的明、暗，激發我們對空間的感知，除了光線之外，視野也很重要，窗，框起了環境的一部分，使它成為不斷改變的圖畫(Krier, 2010)。開口不僅具有引進陽光的功能，也使得空間得以延續(Meiss, 1990)。受到光線和外界景觀的吸引，人們總是習慣往窗口方向行動(Alexander et al., 1977)。開口與環境相互作用，為空間注入活力，表現了空間與環境之間的關係(Norberg-Schulz, 1971)。空間形象領域轉移到情緒領域的過程，由空間概念來表現，它表明了人與環境的關係，人們面前的世界因空間概念而改變(Giedion, 1967)。

開口的構成方式與空間關係有密切地關連，工業革命催化新技術、新工具與新材料的產生，結構找到新的方法，順勢而生的新結構系統，推動新的建築形態與空間形式生成，建築形態獲得解放(Corbusier, 1986)。

窗最重要的功能是引入光線，以及光線通過窗戶在室內空間造成的效果(Krier, 2010)，設計者改變開口的表現形式，也會改變空間中的光影效果，設計窗戶需要研究它所處空間的採光條件，因為任何空間的感性和功能價值取決於它的採光效果(Bruno, 1978)。開口，引導光線進入室內，藉由開口形式不同而產生不同的光投影效果，我們可以感知此空間所欲傳達的訊息，更進一步地，我們可以設想設計者意圖賦予此空間何種意義(Alexander et al., 1977)。作用於室內表面形體和空間的視覺效果，取決於空間中的開口大小、位置和方向(Ching, 1996)。光線，使空間有了生命，讓空間可以被人們所探知，光線透過牆面上的開口進入室內空間，創造了每一個時刻都在變化的動人效果，Le Corbusier 曾說：「建築是集合在陽光下的量體所安排的巧妙，恰當而卓越的表演。我們的眼睛生來就是為了觀察光線中的形體，光與影展現了這些形體。(Cobusier, 1986)」，光線，使空間的生命甦醒，揮散空間的凝滯性，當光線照亮室內的一切事物時，所有事物皆被注入了生氣，光線的引入，強調了開口的形式表徵，光線通過不同的開口形式，產生不同的空間表情。

2.2 開口的演進

開口是表現建築立面的方式之一，因此，開口的設計呈現，除了傳達設計者的設計思維，也是設計者的創意表現，開口豐富了建築立面的表情，使牆面表現變得更為生動，對室內居住者而言，開口帶來維持生命所需的陽光和新鮮空氣並提供外部環境的訊息。開口形式，皆對空間的意義產生一定的影響，不僅改變空間的屬性，也影響人為空間與周圍環境的溝通程度。

開口的形式隨著建築構造技術的發展，以及建築師設計理念的轉換，展現各異其趣的形態表現，而隨著建築師們轉變開口形式設計的訴求，建築構造技術亦須配合這種轉變，從而促使技術層面的提升並開發更多新的構築材料，建築的構造技術與設計師的設計需求，兩者之間的關係是相輔相成且密不可分的。

以開口與牆面的整體表現形式為主要劃分不同時期的依據，而非單一門或窗的造型表現，開口形式的轉變依據各個時代的構造技術的轉換或設計工具的進展，可分為下列四個階段：

1. 工業革命以前的開口形式表現 (19 世紀以前)

工業革命以前的開口形式在當時的構造技術限制下，窗形多以單純的豎長形為主，建築師所關注的重點在於立面牆的開口韻律與秩序。

2. 工業革命之後的開口形式表現 (19 世紀後期 ~)

建築結構技術與材料有了突破性的發展，外牆可獨立於結構體之外，開口尺度與形狀不再受限。

3. 數位時代的開口形式表現 (1960 年代 ~)

CAD/CAM(computer-aided design/ computer-aided manufacturing)技術興起，設計者在探究這

類輔助建築設計與製造的技術上投注相當多地熱情，隨後的參數式設計與演算法設計，讓建築型態愈發複雜多變，建築結構體本身與開口形式相互依存。

4. 數位時代後期，加入互動設計的開口形式表現（1990 年代～）

設計師開始將互動設計技術引入開口設計中，賦予開口更多的功能，開口開始可以回應當地的環境變化或是使用者的行為。

2.2.1 工業革命以前的開口

早期的居住者一開始只為了能夠在不使房屋倒塌的前提下，因應生存條件的需要而在牆面上或屋頂上開門或開窗，將空氣與光線導入室內空間，提供室內所需的照明並流通新鮮空氣，此時，尚未在開口上鑲嵌玻璃，西元 65 年，羅馬人發明了具備功能性和裝飾性的玻璃窗，但是直到 13 世紀的教堂建築與 16 世紀的住宅建築才開始廣泛地使用玻璃作為窗單元的基本材料，玻璃製造技術影響了開口的形式表現(Cole, 2002)。受限於建築的構造技術，直到二十世紀，大多數的建築物開窗的基本形式仍以豎長形的窗形為主，就功能上來說，這樣的窗形可以單純而有效的符合充足光線、空氣和視野的要求(Krier, 2010)。

古羅馬時期的開口以圓拱造型為主，牆體厚實，Aula Palatina 教堂顯示這時的窗戶仍是長型的圓拱窗，窗形一致且排列規整。哥德時期的建築以大面積的彩繪玻璃窗取代牆面，在滿足結構條件的前提下，牆面減少至最低限度所需要的份量，創造室內空間與室外空間的連續性，造成牆面近乎消失的效果(Zevi & Barry, 1993)。Sainte-Chapelle（聖禮拜堂）顯示此時的教堂建築趨向垂直往上、探入天際的風格，開口亦走向尖拱的、直入雲霄的形式，來滿足當時人們對垂直感的追求，似乎可以透過這樣的建築形態，更為接近天堂（圖 8）。文藝復興時期的開口則是選用一種模矩作為開口的基本形式，模矩的序列同時要考慮立面的虛實關係，使其依序在水平和垂直方向排列規整(Bruno, 1978)。

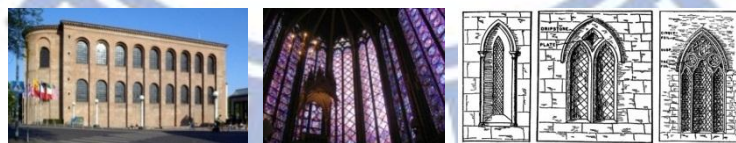


圖 8 Aula Palatina, Sainte-Chapelle, 尖拱窗。

相較於現代建築，傳統建築的外牆顯得更為厚實，在工業革命以前，建築物的牆體必須具備足夠的厚度，以承受上方樓層、屋頂和牆面的重量，藉由牆體本身將重量轉移至地面(Frederick, 2007)。牆體無法與建築結構本體分割，建築師在進行開口設計時，必須具有結構合理性的考量，如此，開口的尺寸與形式必然受到諸多限制，在此前提下，建築師只好將創意發揮在窗戶單元的造形上或就立面上之窗戶將之排列規劃創造出韻律的動感。

古典建築的開口特性，表現在建築的立面牆上，強調形狀、形式和元素以及關係的重覆

(Lawson, 2001)。建築師在進行立面設計時，必須妥善安置這些模矩化的開口，且每一層樓都有其對應的比例(Krier, 2010) (圖 9)，建築師所關注的焦點在於這些開口模矩的排列與秩序、重複與韻律所呈現的美感，這種美感奠基於當時的材料和結構方法，虛與實在水平與垂直方向之間的交錯序列，但是窗戶和各個元件被均勻穩定地重複，卻失去了它們特定的語意，這種開口形式關注到整體卻沒有顧及到開口本身(Bruno, 1978)。建築師依據古典秩序的規則，適切地安排開口秩序，同樣的開口元素反覆出現，決定建築立面開口的韻律為「A-B-A-B-A」或是「A-B-C-B-A」。

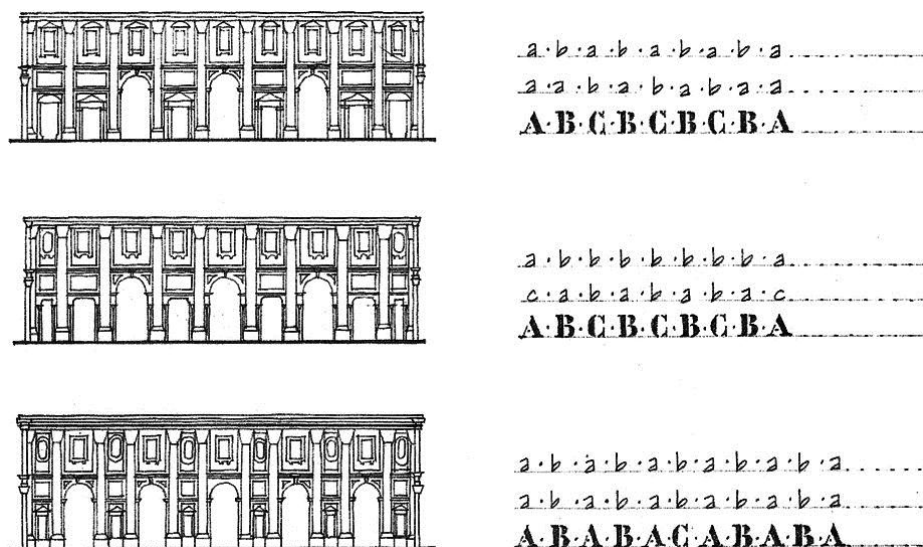


圖 9 古典建築中之開口韻律規則為建築師所關注的重點。

2.2.2 工業革命之後的開口

19 世紀後期，鋼鐵工業蓬勃發展，出現新的鋼筋結構建築，系統化的生產方式、預鑄的建築構件，以及新開發的構築材料與新興的建築結構系統，促使建築構造技術更進一步的發展，大量運用混凝土、柱子來支撐樓板和屋面板，為建築中限定和圍合空間提供了新的可能性(Ching, 1996)。鋼鐵和鋼筋混凝土的新結構技術，可以將支承部分縮減為纖細的框架系統，架構起整片玻璃的牆面，使得室內空間和室外空間達到完全連續的效果，內部的隔間牆，也不再具備承重的作用，若是在牆面上開口，就有可能將室內各空間聯繫起來(Zevi & Barry, 1993)。外牆對於建築體來說，可以只是作為貼附於結構框架上的皮層，比起傳統建築的厚實牆體還要輕薄許多，將承重的角色移轉到框架結構系統上，相較於古典建築時期的建築師，工業革命之後的建築師可以在較不受結構限制下進行開口設計，開口的呈現方式有了更高的自由度。現代建築的開口沒有整齊劃一的形式，可以是任意形狀的，甚至是在牆上開出的一條縫，每個開口都是獨立的個體，而非任何群組的其中之一，它們各自有其自身的意涵與功能(Bruno, 1978)。

建築構造方式的轉變，連帶造成開口形式的改變，現代科學更開發出許多可供使用的構築材料，建築師與結構團隊相互配合，解決過去建築物所無法克服的難題，使得建築物外牆的建

造方式更為多元，建築物的承重可以不需要依賴牆體本身，牆體與柱可以各自獨立，使設計者於安排開口時可以盡情發揮創意與想像力。建築開口不再被構造技術所限制，開口可以是各種可能，鋼筋混凝土的發明讓結構與開口間的關係更加自由(Meiss, 1990)。由此可見，此時開口的尺度和比例不再受傳統構造技術與較短跨距的限制，豎長形的窗戶形態也非建築師們不得不的選擇，只是眾多可選用的窗戶形式之一，如今窗戶可以採用大面積的玻璃，室內與室外的景物皆可盡收眼底。

建築師根據形狀和位置來區分每一個窗戶，廢除了傳統的立面概念和古典內涵，拋棄水平與垂直線的壟斷和門窗位置的簡單重複，進行體積和空間的自由安排(Bruno, 1978)。1923年，法國建築師 Le Corbusier(1985)提出新建築五點(five points of architecture)，其中的「水平帶窗(the horizontal window)」證明外牆已經不是承重的結構元素，「自由立面(the free facade)」亦讓開口形式與空間型態有更高的自由度，鋼筋混凝土建構的框架結構系統讓樑、柱、板和牆，不需互相依附存在，外牆獨立於建築結構體之外，建築師可以自由設計牆面，所以牆面可以大面開窗或是在適當的位置上建立一個適當的開口，不必因為柱的阻隔而有所間斷(Bruno, 1978)。Le Corbusier 在 1928 年的 Villa Savoye 完全實踐了此一理論。

開口不再是規格化的單元，高低不一、造型各異的開口使得立面不再是封閉或孤立，而是與周圍環境產生了聯繫(Bruno, 1978)。當開口形式解放，多樣化的開口造型於焉而生，開口可以是水平的、斜的，或是其他不規則的造型(圖 10)，這些形狀各異的開口形式，藉由建築師的設計巧思，刻劃於建築物之上，賦予建築物本身更多想像空間與文化意涵。



圖 10 開口可以是各種造型。(Le Corbusier/ Villa Savoye, 法國巴黎, 1928); Daniel Libeskind / Jewish Museum, 德國柏林, 2001)。

現代建築開口跳脫古典建築開口的約束，開口重點不再是單元模矩的排列規劃與窗單元的造型，而是更符合空間關係與使用者的需求，提供充足的陽光與通風，建築師對於立面的開口表現形式可以有更多的想像，現代建築立面有著較古典建築立面更加豐富的表情。而古典建築所無法達到的大面開窗，則賦予建築體本身的通透性，無形的分隔出室內與室外，提供大片的視野開闊性。

2.2.3 數位時代的開口

自 1960 年初期開始，建築師們已將電腦輔助建築設計(computer-aided architectural design)技術廣泛應用在建築設計領域中(Mitchell, 1977)。時至今日，設計者普遍的使用電腦輔助設計技

術進行設計行為，嘗試利用日益增進的技術創造出更多可能，數位設計工具在設計流程中佔有相當大的比例(Lim, 2007)，打破了設計師個人設計表達方式和背景制約，也打破了設計本身的傳統制約。技術和文化的發展促進建築的複雜幾何與自由形體的使用(Vollers, 2001)，3D CAD 工具的易於使用與有效性，帶來設計上的自由形體產生。使初步的概念階段更為豐富(Burry & Murray, 1997)。

義大利建築師 Luigi Moretti 在”Architettura Parametrica”一書中提出參數成形的概念(Oosterhuis & Feireiss, 2006)，指的是設計者在設計過程中整合參數方程式與建築設計的理念。參數式設計常著重於合理化形體，以及判定建造自由形體可能性的工具。截至目前為止，參數式電腦輔助設計系統(parametric modeling CAD systems)已成為建築領域中，作為研究與實行設計行為的主要工具(Barrios, 2005)。第一代 CAD 生成工具，具有再現與管理基本幾何元素(點、線、面和歐幾里德空間)以及不規則性與複雜性的能力。參數式設計限制有基礎的設計途徑和現在生成的機構合併於計算工具中。設計者可以定義幾何元件或是直接操作元件與元件之間的關係，參數的幾何控制增加形體的複雜性(Shadkhou & Bignon, 2009)。

建築師廣泛使用電腦輔助設計技術(CAD)協助進行設計工作，因應電腦輔助設計技術的發展，電腦輔助製造技術(CAM)協助建築師將在虛擬空間生成的設計形體加以實現，愈來愈多設計師應用參數式設計工具進行設計行為，CAD/CAM 技術協助建築師建立過去以手繪方式所難以達成的造型。在這樣的背景下，建築形式不再是像現代建築那般簡單的方盒子形體，而是造型多變的自由形體，開口也不再僅強調大面開窗，產生許多不規則的開口形式，也使得製作方式趨向繁瑣。

以數學邏輯出發的參數式設計思考模式，分析現有的設計或者創造新的運算法的系統，設計者可以在毫無前例的情況下，輸入一系列自建的運算規則，隨機地且多變化地創造新的設計，藉由此設計方法而生成新的建築形態結果，之後再測試這些運算規則是否能夠在真實世界被實踐，編寫及校正這些運算規則，成為設計工作的一部份，應用這些規則可能產生設計的解法或者創造新的設計目標。Patrik Schumacher(2008)提出，現階段參數化主義的發展與電腦輔助設計技術的引入和發展密切的聯繫在一起，因為愈來愈多的設計師意識到參數式設計造成獨特的形式和組織上的可能性。參數化主義唯有經由成熟的參數化技術才能存在。先進的參數式設計技術，像是程式碼(script)Maya script 或 Rhino script 和參數化建模工具(GC 和 DP)變成了普遍使用的工具。

藉由參數式設計工具，可以即時地控制參數因子，進行設計行為，設計師可以設計出手繪工具所無法建立的形體，為了實現這些複雜形體，建築結構系統必然得隨之革新，在反覆實驗與測試下，建築構造技術與建築材料亦不斷地推陳出新，近年來，支援參數式設計與製造工具的成熟，整合運用自然生物形態規則以及運用數學邏輯規則的參數式設計工具，來達成建築設

計的構築生產，新的建築結構體系於焉而生。

參數式設計工具配合演算法，設計者使用新興的設計工具，自動演算生成建築形體，開口的造形控制在節點編輯(node-edit)模式系統之下。當我們解決某一個特定的工作或問題時，演算法是可以幫助我們處理這個問題時需要的指令或步驟，藉由設計這個演算法的指令，我們不只有可以解決這個特定的問題，還可以解決所有此類型的問題(Tedeschi, 2011)。顯示電腦演算的程序，只要輸入數據即可得到相應的結果(圖 11)。設計者可以定義幾何元件和直接操作元件之間的關係，藉由參數的幾何控制增加形體的複雜性，以應用數學幾何邏輯的參數式設計作為設計工具，數學演算法可以自動生成建築結構型態表現。

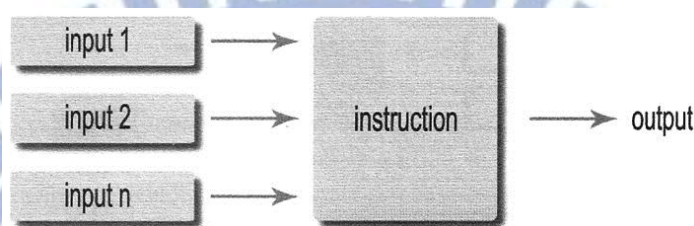


圖 11 電腦演算程序示意圖，輸入初始數據可得到演算出的結果(Tedeschi, 2011)。

Reiser 與 Umemoto(2006)在 " Atlas of Novel Tectonics " 一書中，陳述了現代建築與參數化時代的建築結構體系的轉變，分割現代建築結構，可以從結構中分離出梁、柱、板、牆各自獨立的單元，而參數化時代的建築結構，其整體即為相同單元的總合，梁、柱、板、牆沒有明確的分野(圖 12)，對照開口形式，過去的開口元素定義明確，開口與牆可以拆解成具有明確表徵的個體，而參數化形體的建築結構，開口的表現形式亦依附於此種建築結構本身。

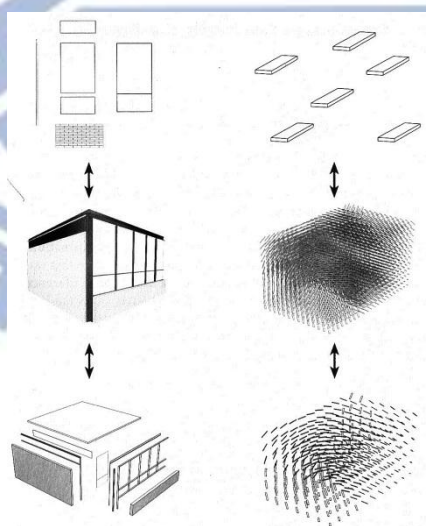


圖 12 現代建築結構與參數式的建築結構示意圖(Reiser & Umemoto, 2006)。

使用不同的演算法，產生多變的設計與形體，回歸非正規的結果，具有美學的複雜性(圖 13)。在概念模型的架構中，藉由衍生式設計過程，生成非正規的形狀，藉由演算規則來輔助設計的衍生系統，擴大概念設計的範圍(Shaghayegh & Jean-Claude, 2009)，設計者可以使用各種

基於設計的技術，像是蜂巢結構(honeycomb)、Voronoi Diagram、L-systems 或細胞自動機(cellular automata)。

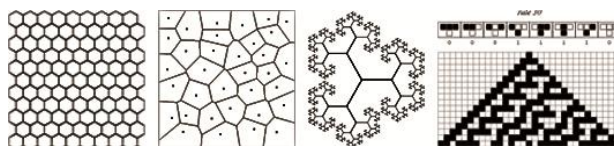


圖 13 經由演算法生成的圖形結構：Honeycomb, Voronoi Diagram, Fractal, Cellular Automata

Grasshopper 是一個可以嵌入 Rhinoceros 軟體中，可控制參數屬性的介面，具有明確歷史紀錄的外掛程式，可立即地轉變參考模型(Tedeschi, 2011)。Grasshopper 連結 Rhinoceros 中的模型，其數值可類比為函數，一旦在 Grasshopper 介面中，改變一個新的定義，便會立即地轉譯到 Rhinoceros 中的參考模型。任何的物件、參數因子或複合物件，它們的結果會轉譯到存在於 Rhinoceros 中的參考模型或建立出自身的型態(Hnizda, 2009)。

新的空間與結構可以藉由組織系統中成形，而不需在建造工程前事先規劃，藉由使用數學上精確的方法，遞迴演算法已被編譯到電腦應用程式中做為設計者的新工具(Bosia, 2011)。藉由演算法，設計者可以快速地產生建築形體並建立建築框架，協助大規模生產組合構件，建立牆面並產生開口。

2.2.4 數位時代，加入互動設計技術的開口

近代，建築師在安排空間關係時，預先設想即將進入空間中的使用者，以及在它們之間可能發生的交流，此時互動設計技術的加入，讓建築空間可以與居住者做直覺式的交流和溝通。存在於在空間中的數位訊號可以感測人們的觸碰、手勢、聲響或動作等行為，藉由互動介面進行人性化的對話，經由這樣互動的過程，重新塑造人與空間接觸的經驗，徹底轉變人類的生活型態模式，讓整個空間從靜態(static)走向動態(kinetic)。

「互動」，包含「輸入(In)」與「輸出(Out)」之行為，圖 14 的 Hyposurface 可接收使用者身體的動作作出回應，以開口行為為例，當使用者或環境的訊息傳遞到開口的互動元件，稱作「輸入」，將這些訊息轉化為互動元件可辨識的數據，驅動物件產生相對應的回應，即為「輸出」。過去的開口設計關注的是開口的功能可以如何被操作，主要的對象是開口本身，互動設計著重於如何與使用者互動，注重使用者的外顯行為，或是接收到環境釋放出的訊息，針對環境條件的變化作出適當的回應，互動開口產生的回饋是由使用者或環境與開口互動元件共同創造的。「建築不再是在日光下玩量體的遊戲，而是演變成為在空間中玩資訊的遊戲(Mitchell, 2000)。」美國 Michael Fox 教授將「互動建築」(Interactive Architecture)定義為在建築構造形態上，以無線致動器與感測器整合建築載具，在系統運作上藉由感知運算設備驅動建築動態元件，將建築導向彈性空間與自動化節能的目標(Fox & Kemp, 2009)。



圖 14 互動牆：Hyposurface

William Mitchell(2000)定義互動設計是功能遵循程式，無須重新建立或重新塑形，更無須替換材料元件，只需要更動程式中的編碼，即可達到所要求的功能。人造物設計的功能，將完全由造形物內嵌的程式碼來控制，完全顛覆了傳統的設計理念。互動設計是一種電腦內嵌的設計系統，重點在於機器與環境或使用者的行為經驗的共同創造，互動設計的使用行為取決於電腦的程式，電腦程式的執行決定建築或產品如何與環境或使用者互動。



第三章 開口因子

從第二章的文獻探討中可知，開口的組成可包含功能、構成和形式，且開口的存在會對空間感知的形成造成一定的影響，開口承接外來的光線、空氣和外部空間的景色，作為內外空間相通聯的介質，建立開口有其具體目的與使用要求，這些目的與要求即為開口的「功能因子(function)」，為了滿足開口的功能與使用方面的訴求，需要有足以支持開口成形的構成技術與方法，稱之為「構成因子(tectonic)」，開口表現形式亦隨著時代以及建築物的性質而異，此即開口的「形式因子(form)」，經由這三個因子建立出開口的基本形貌，開口塑造出「空間感知」，本章討論由「功能因子」、「構成因子」與「形式因子」所架構出的空間感知，一個好的開口設計可以達成空間對於精神與美感方面的訴求。

功能因子、構成因子和形式因子組成開口的原型。最早，人們以牆圍塑出空間，但是因為需要讓光線進入以照亮室內，完成此功能需求最直覺地方式便是在牆上開鑿出小洞，小洞引入的光源有限，造成室內陰晦、凝滯的空間感。隨著時代變遷，人們對於開口的使用需求產生變化，對開口提出愈來愈多功能上的需求。開口的功能因子必須回應的正是因應社會發展所提出的各種要求，而這種要求並非是固守的、一成不變的，它是一種無時無刻都在變化發展的因素。誠然，開口形式必須先滿足功能的要求，但除此之外，它還需滿足人們對精神與美感方面的需求，組成這一切的功能因子需要由構成因子來實現，而構成因子又影響了開口的表現形式，造成形式因子的轉變。由此可知，開口的功能、結構和形式之間的關係具有相互性，在開口因子的作用下，誘發新的空間感知的形成。

從第二章的文獻探討中整理出開口具有的功能因子、構成因子與形式因子，開口具有引入光線的功能，還可以使空氣流通、為室內提供外部的景色，加入互動技術的開口，甚至有傳遞訊息的功能，在開口的構成方面，科技的精進造成不同時代下構成技術的轉變，包含材料堆疊、混凝土構築、數位構築與互動組件，而在開口的形式方面，依據開口的方向性質、開口在牆面上的視覺比例、相同或相似的開口單元重複出現，以及在機械技術支持下呈現的動態開口，將上述影響開口組成的功能因子、構成因子和形式因子之項目整理如下，並討論這三個因子與空間感知的關係：

- I. 功能因子：引入光線、流通空氣、提供視景、傳遞訊息。**
- II. 構成因子：材料堆疊、混凝土構築、數位構築、互動組件。**
- III. 形式因子：方向性質、視覺比例、單元重複、動態呈現。**

以下將詳述這三個開口因子對開口表現形貌的影響，並更進一步地討論在受到這三個因子

交互影響下的開口會對空間感知造成什麼樣的結果。

3.1 功能因子

由第二章的文獻探討中已知開口具備穿透、傳達視野或引進陽光、空氣的功能(Meiss, 1990)。因應不同的空間型態對開口也有各自不同的功能需求，反映在開口的表現形式上是豐富多變的，但不僅是不同的功能需求才會產生不同的表現形式，同一種功能需求也可以運用不同的解決方案，衍生出多種開口形態表現，所以功能對於開口形式是可靈活運用並適切地安排。

美國建築師 Sullivan 提出『形隨機能(Form follows function)(Frampton, 1992)』，意即建築的形式，深受建築物的功能需求所牽引，Frank Lloyd Wright 更進一步說明『形式與功能應是精神上的合而為一(Form and function should be one, joined in a spiritual union)(Holman & Vertegaal, 2008)』，由此可見，建築形式與功能之間具備緊密的關聯性，建築物的功能需求為建築師進行設計行為的首要考量，而開口作為組成建築的基本元素之一，開口的形態表現也必然深受功能的影響。設計者會根據空間的使用需求來決定開口的大小與位置，開口形式表現的差異性與採光、通風等條件的優劣密切相關，不同的空間有其不同的功能需求，對應不同的開口形態表現(Meiss, 1998)。為了適應不同的使用需求，開口位置、形式都必須作審慎的安排(Alexander, et al., 1977)。

隨著不同時代人類生活型態的改變，對於開口也有不同的訴求，人們要求開口將生活中的資訊轉化為立即的反應(Moggridge, 2007)，無論是人們或是環境釋放的訊息，開口將這些資訊實體化為使用者可感知的行為表現。各個領域的設計師們廣泛的使用互動設計技術作為設計手段，將身邊的物件轉化為互動的平台，開口亦成為傳遞訊息的媒介。雖然功能制約了開口的表現方式亦限定其發展的可能性，然而設計者卻可以發揮自身的創意，突破功能對開口形式的限定性，擴展開口形態表現的多元性。建立開口有其具體目的與使用要求，依據開口功能要求的不同，選擇不同的開口表現形式。根據第二章的文獻探討所述，本研究將歸納出開口基本的功能因子之元素條列如下：

1. 引入光線

光線的引入，為內部空間提供照明，賦予空間生命靈魂，吸引人們的目光，導引人們的動線，適度的引入光源，可以改進室內照明，藉由光影的變化，提升空間層次，在增進生活情調與氣氛營造上，光線通過不同的開口形式可以對室內空間以及開口本身造成不同的效果。

2. 流通空氣

提供室內新鮮空氣以及外部空間與內部空間冷、熱空氣的交換，調整到適宜人類的溫度，帶走悶熱與潮溼，導引風的流動，同時，空氣可以作為傳遞聲音的介質，讓室內的人們可

以接收到外界的聲響，知曉外界正在發生的事情。

3. 提供視景

開口作為空間視覺穿透與溝通的媒介，為一個空間提供另一個空間的視景，擴展空間意識並延伸人們對周遭環境的視覺廣度，使人們可以與外部環境建立關係，感知外界的變動，開口使人們不至於與外界完全斷絕，亦有機會影響人的情感。

4. 傳遞訊息

當開口加入互動機械裝置之後，開口可作為溝通外部與內部資訊的媒介，感測器接收到外部訊息（包含環境的訊息與使用者行為的訊息）後，將訊息轉譯為可辨識的數據，再將數據實體化為可立即感知的行為表現，讓人們可以得到即時的資訊與回饋。

3.2 構成因子

由上一節可知功能因子是對事物所提出的需求，那麼構成因子便是為了滿足功能需求所採取的途徑。從第二章的文獻資料中得知，傳統建築的窗戶形式多為豎長的形狀，究其原因，是因為開口上的支撐橫樑(lintel)有其長度的限制，必須要是雙手可以找到、製作和定位的，但是在開口寬度備受限制的狀態下，只能以拉高開口的方式來產生大型的窗戶(Frederick, 2007)。因為開口受到當時構成技術的限制，使得開口普遍為單一的豎長形樣式。

隨著時代變遷，人們對建築有許多新的需求，為了達成這些需求，需要配合一定的構造技術，因此，人們需要研究或找出能夠負荷所有功能需求的構造技術，間接促使結構技術的進步。任何一種結構形式，都必須有功能條件賦予其價值，正是因為結構構築出滿足功能需求的空間型態，結構本身才有了意義。不同的功能都需要有相應的結構方法來提供與功能相適應的空間形式，隨著功能需求的改變，人們也盡可能地提高技術層次，使結構技術更臻完善，進而更加切合功能的要求，不同的結構形式不僅能適應不同的功能要求，結構本身也兼具構成美感的條件，無論是何種結構，各自有其獨特的表現形態與空間形式，建築師針對不同的功能要求，搭配適宜的結構方式，妥善安排功能於結構之間的關係，並善用結構本身特殊的形態來架構開口的表現方式，使得開口表現形式有更多的可能性。

綜合以上種種，新的開口形式隨著透過建築師巧妙地操作這些新的結構技術發展而產生更多豐富的表現形式，構成開口的技術與方法，必須滿足開口的功能與使用方面的訴求，建築師因應其設計理念與其所希望的開口呈現方式，選擇適合的構造方法。本研究依據過去的文獻資料，將隨不同時代開口構成技術的演進而產生之開口構成因子分類整理如下：

1. 材料堆疊

將材料製作成基本的磚單元，再堆疊建立成牆體，開口可以是堆疊時不經意留下的空白，也可以是藉由改變磚單元形體再將其堆疊後產生的間隙。單元與單元之間的排列組合，既

架構起結構量體，又建構出美感，光線與空氣可通過開口進入室內空間，滿足開口元素所需具備的功能，建築師發揮巧思，改變磚材堆疊的方式、旋轉角度，或是磚材本身的表現形態，在空間中產生令人驚嘆的效果。

2. 混凝土構築

外牆本身非主要支撐建築結構系統的元素，開口的分布、造型隨意而自由。以此方式建成的建築體，沒有特定的狀態，由人們刻意營造，與材料本身的形式毫無關聯，開口可以是任意的形式，圓的、方的、狹長的，無論是何種形狀的開口表現皆可以被實現，建築立面可以有更多豐富地變化，室內空間亦隨之有更多樣的形貌。建造技術的發展賦予建築物立面更多的可能性，完成許多傳統建築物所無法達到的立面樣式。

3. 數位構築

運用電腦輔助設計與製作技術，經由運算設計出組件的單元形體，或是將設計好的整體分解成小部分，組件與組件之間相互套疊、卡接構成整個形體，組件可以預先製作及大量製造基本單元，並可現場組裝，種種適用於數位建築的構成方式持續地被開發，以適應日趨複雜的建築形體。

4. 互動組件

在開口組件上嵌入互動機械裝置，將互動設計概念與開口表現形式結合，互動裝置可以偵測使用者行為，利用程式碼控制開口組件，使其產生相對的回饋。應用在環境調節上，則以節約能源為主要訴求，此類開口設計之目的多為調整進光量，隔絕熱能，以現代機械技術或材料結合感應裝置，當外部環境產生變化時，開口機械裝置或素材可調整自身機制，做出相對的回應。

3.3 形式因子

由上一節所述，可知開口的形式隨著構成方式的改變亦會使得開口的形貌產生變化，因為構成技術的進步，讓開口開口的方向、尺寸和表現方式都達到以傳統構築方式所無法達到的境界，而開口所呈現的形式影響空間感知的形成。以開口的方向性質來說，關係著人的動線以及人與環境之間的連結性，方向的不同，會對空間中的人們產生截然不同的感受，空間中的垂直性具有強烈的表現內容，人們受到垂直方向的引導，中斷人們的正常觀看方向而抬頭仰望，人類征服自然、挑戰重力，垂直象徵著崇高的事物，體現營建的過程，水平性則是指人的具體行動世界，水平方向的任何方向都是平等的，它構成無限擴張的面。當人們本能地追隨一條水平線時，體驗到一種內在感，一種合理性，一種理智，水平線與人們行走於其上的大地平行，它伴隨著人們走動，在人眼的高度上延伸(Norberg-Schulz, 1971; Zevi & Barry, 1993)。由此可見，方向性質的形式因子會影響人們對空間的觀感。

以開口在牆上的視覺比例而言，開口佔牆面的範圍大小，會產生不同的空間感知，大的開口能夠使內部空間與外部空間有好的連結，無論是光線或是外在的環境，都可以輕易地被人們所感知，小的開口則限制了空間的進光量和視景範圍，亦縮減了空間的通透程度，現代建築常出現大面開窗的開口形式，光線穿透空間，使室內開敞明亮，呈現高度的通透性質，開口使得空間的連續性得以成形，打開視覺上的另一層穿透性，延伸人們所能感知的場域。

另外，呈現在牆面上的開口可以是相同單元的整齊排列，或是單元的比例縮放，當這些開口單元被密集地擺放在一起，容易讓觀者產生豐富地視覺印象。

另一方面，若是讓開口產生動態，容易造成空間的不確定性。空間的效果受光線及落影部位的影響，光源會吸引視線而構成自己一套獨立的動向(Zevi & Barry, 1993)。開口或開或關的行為，產生光線忽明忽暗的現象，開口的動態使空間產生變態，在同一個空間框架中，改變內部空間的意識形態，光與影隨著動態的開口交錯糾纏，使空間透過光的轉向而變異，光與影的變態同時也改變了空間的形態。由上述可知，開口形式造就不同的空間性質，以下歸納開口的形式因子：

1. 方向性質

強化開口賦予空間的方向性，開口可以是水平、垂直或傾斜方向，開口的方向性質可以導引人們的動線，影響人們的視覺觀感，以及光線投射在室內的角度。

2. 視覺比例

大的開口能夠使內部空間與外部空間有好的連結，獲得全面性的視景範圍，小的開口削弱了內部空間與外部空間的連結性，卻可以使人們的目光聚焦於開口區域，也保持了空間的私密性。

3. 單元重複

每一個開口單元皆相同或相似，呈現在牆面上可以是相同單元的整齊排列，或是單元的比例縮放，抑或是透過演化過程生成的自相似單元。

4. 動態呈現

使用互動設計技術讓開口運動，組織開口的呈現方式，變換不同的視覺印象，每個時刻皆會對人們產生不同的空間感受。

由上述可知，各個因子之間具有相互性，形式因子因構成因子而得以實現，構成因子又因功能因子的要求而必須不斷自我提升，各個因子在成就對方的同時亦對彼此的表現方式產生影響，在此將前述組成開口因子的功能因子、構成因子與形式因子之主要元素整理成表 1：

編號	開口因子	編號	因子元素	開口因子敘述
I	功能因子 (function)	1	引入光線	適度的引入光源，可以改進室內照明，藉由光影的變化，賦予空間生命靈魂。
		2	流通空氣	提供新鮮空氣，維持溫度平衡，導引風的流動。
		3	提供視景	作為空間視覺穿透與溝通的媒介，為一個空間提供另一個空間的視景。
		4	傳遞訊息	當開口元素加入互動機械裝置之後，開口可作為溝通外部與內部資訊的媒介。
II	構成因子 (tectonic)	1	材料堆疊	開口可以是材料堆疊時不經意留下的空白，或是改變磚單元形體之後產生的空隙。
		2	混凝土構築	外牆本身非主要支撐建築結構系統的元素，利用混凝土可任意塑形的特點，開口可以是任意的形式。
		3	數位構築	運用電腦輔助設計與製作技術，分割出開口單元或是元件組合後產生開口。
		4	互動組件	將互動機械裝置加入開口組件，互動裝置可以偵測使用者行為或是環境條件的變化。
III	形式因子 (form)	1	方向性質	強化開口賦予空間的方向性，開口可以是水平、垂直或任意方向。
		2	視覺比例	大的開口能夠使內部空間與外部空間有好的連結，小的開口則可以匯聚人們的目光。
		3	單元重複	開口可以是相同單元的整齊排列，或是單元的比例縮放，抑或是衍生而成的自相似單元。
		4	動態呈現	運用互動設計技術使開口運動，會構成具有動態特性的開口形式，造成空間的質變。

表1 開口因子之組成元素與其基本的定義。

3.4 開口因子與空間感知的關係

由前面開口的功能因子、構成因子與形式因子的敘述中已知各個開口因子之間具有相互性，圖 15 顯示功能因子與構成因子之間的相互性，設計者運用各種構成方式，巧妙地將光線引入，以便達到特殊的效果，在完全與外部隔絕的封閉空間中，打開一個開口，導入一道光線，已經足以介入此空間，消蝕因此而產生的絕望，破除死寂的氛圍，開口讓空氣得以流通，將室外的氣息導入室內，亦將室內的氣味導引至室外，以嗅覺的方式建立起室內外人們的聯繫，開口的存在不僅是影響人們生理上的層面，更是人們精神上支持的根源，同時，設計者也需考慮應當怎樣來安排牆和開口，才能讓室外經過的行人，或是室內的居住者，都能夠感知周遭環境的變化，在視覺或觸覺等感官心理上，共同參與著奇妙的轉換，影響人們的情緒並使之產生共鳴，傳遞訊息的功能因子，更加強化了開口和人與環境之間的關聯性。因此，在設計建築立面與開口時，必須考慮外部觀感與內部氛圍，建立一個適合人生活的舒適環境，建立生理上的或是心理上的、情感上的氛圍。為使開口滿足功能的需求，必須搭配適切地構成方式，建築師找出或開發新的結構技術和材料，催生出許多新的結構形態，但是這些新的結構形態亦須藉由功能來實現它的價值，如此，新生成的結構形態才有其存在的意義，否則，若只是嘩眾取寵，這樣的結構必遭淘汰。



圖 15 功能因子與構成因子的相互性。

圖 16 顯示構成因子與形式因子之間的相互性，以工業革命之前的構成技術，並不足以支持水平方向的開口形式，為求盡可能的大量採光，於是產生了哥德形式高聳的尖拱窗，相較於之前的圓拱窗，尖拱的結構更可以支撐大面積的開口。工業革命之後，水平方向開口得以實現，CAD / CAM 與互動技術的加入，讓開口的構成方式更為多元，相較於過去的開口，現今的開口更能符合人們生活上的需求。

構成技術架構出空間形態，不同的結構亦會產生多元的形式表現，建築師若要設計多變化的開口形式，又須配合相對應的結構形式與構造技術，開口形式需要構成因子來組成，形式因子又促使人們發展出更適宜的構造。



圖 16 構成因子與形式因子的相互性。

圖 17 顯示空間因子與功能因子之間的相互性，開口是組成空間感知的必要成分，開口引入光線與傳遞視野的功能限制開口形式的表現方式，而不同的形式又很有可能賦予開口不同的功能，不同的開口尺寸、位置和表現方式，開口的形式限制光投射入空間的效果，開口方向牽引人的視覺方向與動線，開口質量決定空間的開敞或封閉，開口動態使得空間多了不可預知的變數，開口形式不僅決定開口的樣貌，更是創造空間感知的關鍵因素，建構開口形式必須滿足功能因子，功能因子亦成就形式因子。



圖 17 形式因子與功能因子的相互性。

不同的開口因子造成不同的開口形式表徵，即便是相同的開口因子，也有可能產生不同的開口表現，造就不同的空間性質，善用開口因子的特性，協助我們建構出恰當地空間感知。功能因子、構成因子與形式因子交織出開口因子的基本形貌，它們三者操縱著彼此又互相牽引，圖 18 顯示三因子與空間感知之間的相互關係，功能因子和構成因子具有相互性，且功能因子、構成因子和形式因子皆會對空間感知造成影響，正是這三個因子之間的相輔相成，使任何一個因子的進化，都會驅策其他因子往更高的層次提升，也會帶動空間感知的變化。

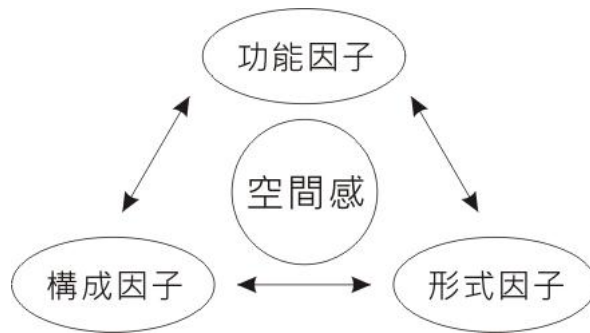


圖 18 功能因子、構成因子與形式因子三者之間的相互性。

功能因子、構成因子與形式因子形塑出空間感知，藉由光線通過開口投射在室內空間中，使空間得以成形，不同的開口造就不同空間觀感，人們塑造空間環境，適切地搭配構成方式以滿足功能的使用要求，但是除此之外，亦須滿足人們精神感受上的要求，因此，空間在具備實用性之外，亦須賦予其精神上的意涵，而塑造光線，就是在營造空間體驗，這必須藉由開口來完成，開口限定了「光」呈現在人眼前的狀態、形貌，進而影響空間氛圍，因此設計者必須審慎地處理開口形式表現，當光線透過受功能因子、構成因子與形式因子架構出的開口照射入室內空間，即形成了空間感知。

綜合前述對功能、構成與形式三因子的分析，以及三因子之間的交互性之分析中可知開口因子會影響空間感知的形成，因此，本研究將開口因子架構出的空間感知分為方向性、通透性、裝飾性及可變性，下面將針對這四種空間感知作詳細的敘述：

1. 方向性：

由 2.1.3 小節中可知開口的形式可以是水平或垂直方向，這樣的開口具有明確的指向性，導引人們的目光或是指引人們的動線，垂直向上的開口，使得人們不得不抬頭仰望，以人的卑微渺小對比空間的偉大崇高，顯現神聖凜然、莊嚴肅穆、不可侵犯的空間性質，而水平方向的開口則以人的尺度作考量，遵循人們在空間中水平移動方向，人們可以輕易的觀看外部景色，貼近自然環境，水平方向的開口不會對人產生壓力，表現親切舒適的空間性質，工業革命之後，建造方式的進步，使得開口可以是傾斜方向，甚或是不規則的錯置，設計者決定開口的呈現方式，架構出具有方向性的空間感知。

2. 通透性

「開口的閉合程度與空間的明確性有直接的關聯。(Meiss, 1990)」大面積的開口使空間可以大量採光，光線自由穿梭在室內空間中，室內空間得到充分的照明，造就空間的開放性質，在光線的穿透下，顯現明亮輕快的通透性。

5. 裝飾性

複雜的開口形式容易產生「裝飾性」強烈的空間意象，使用具有裝飾性的開口形式，不僅在視覺上造成衝擊，同時使空間產生繁複地裝飾性風格。設計者運用開口本身的造型或是

呈現手法造就輕盈或繁複的視覺比例，塑造清朗明快或是沉鬱神秘的空間特質。

3. 可變性

加入互動技術的開口組件，改變人們可感知的空間氛圍，開口可以隨環境或使用者行為改變自身狀態，設計師關注牆上之開口，去思考牆與開口能夠給予使用者何種回饋，將過去開口表現在牆上的固定、不可變動的形式，轉為可與使用者互動之開口，開口的大小變化亦可隨使用者的行動給予回應。藉由機械電子裝置控制開口的開闔，更可以感應外部環境條件的變化並做出相對的回應，室內的光影亦隨著開口的開闔而產生變化。開口的開闔決定進光量的多寡，轉變空間型態，造成時而開放，時而封閉的空間，使得光與影不時的交錯運動，光與影的變態同時也改變了空間的形態，當光線穿過牆上錯落的開口，光線受到擾動，空間隨之變動、搖曳，空間開始產生不安定的狀態，光線通過時大時小、或動或靜的開口群組，光線被分割成許多光斑，空間與空間中的物件並沒有位移，但是因為這些光斑容易受到開口擾動，使空間也隨之顫動，成就了空間的「可變性」，使空間產生一種動態感。

本研究將與空間感知相關的成分歸納如表 2：

空間感知 (spatiality)	1	方向性	強調垂直向上的空間方向性，使得人們不得不抬頭仰望，顯現神聖凜然不可侵犯的空間性質。貼近人的尺度，在空間中水平移動，人們可以輕易的觀看外部景色。
	2	通透性	造就空間的開放性質，在光線的穿透下，顯現明亮輕快的空間性質。
	3	裝飾性	使用具有裝飾性的開口形式，讓空間產生繁複地裝飾性風格。
	4	可變性	利用錯置的開口形式，光線被分割成許多小塊的光斑，光斑容易受到擾動，使空間也隨之顫動。開口隨環境或使用者行為改變自身狀態的開闔，轉變空間性質，光與影的交錯運動，使空間產生一種動態感。

表2 開口因子組構之空間感知的成分內容。

從圖 18 中可知開口在功能因子、構成因子與形式因子的交互作用下，會影響空間感知的形成，對應到人與空間之間的關係，以及開口對精神與美感方面的訴求，不同的開口因子皆會帶給人們不同的空間感知。因此本研究以功能因子、構成因子與形式因子作為下一章分析案例的基本項目，討論這些案例的開口因子的組成方式，並進一步探討對空間感知的影響。

第四章 案例分析

承第三章所述，開口對於空間感知的形成具有一定的影響力，建築師設計開口的表現形態，不僅是建築師對於空間設計意念的展現，開口形式同時還深受當時的時代風格、功能需求與建構技術的牽引，因此在進行開口設計時，亦需考量組成開口的功能因子、構成因子與形式因子，本研究挑選 10 個不同時代的開口設計案例作為分析對象，採用第三章所歸納之開口因子來分析形成這些開口案例的功能需求、構成方法和形式表現，以及在這三者交互作用下產生的空間感知，比較各案例的開口因子的呈現方式與代表意義，得到這些因子在塑造空間感知時常用的模式，供第五章開口設計實作時使用。

4.1 分析對象

參照第二章的參考文獻，依據開口的演進，在四個不同時期（工業革命之前、工業革命之後、數位時代-參數式設計、數位時代-互動設計）中挑選 10 個不同時期各具有代表性的開口設計案例，針對各個開口案例的功能、構成與形式來分析其各自具有的開口因子，歸納比較各個案例之開口因子的差異性，並討論這些受開口因子影響下產生之空間感知：

工業革命之前的開口案例(Case A: Hagia Sophia, Case B: Sainte-Chapelle)：此時的開口受限於當時構造技術的限制，開口表現多以圓拱或尖拱的豎長形開口為主。

工業革命之後的開口案例 (Case C: Millard House, Case D: Le Chapel at Ronchamp)：外牆獨立於建築結構體之外，建築師可以自由設計牆面，所以牆面可以大面開窗或是在適當的位置上建立一個適當的開口，不必因為柱的阻隔而有所間斷(Bruno, 1978)

數位時代-參數式設計的開口案例(Case E: Serpentine Gallery Pavilion 2002, Case F: Honeycomb Morphologies, Case G: de Young Museum)：CAD/CAM 技術協助建築師建立過去以往用手繪方式難以達成的造型，開口的表現也產生更多可能。

數位時代-互動設計的開口案例(Case H: Caltrans District 7 Headquarters, Case I: Homeostatic Facade System, Case J: 療望_望春風)：開口開始可以與使用者和環境互動產生動態。

將開口案例按照年代排序成表 3：

時期	編號	案例	設計者	地點	年代
工業革命之前	A	Hagia Sophia	Isidore of Miletus, Anthemius of Tralles	Istanbul, Turkey	532-537
	B	Sainte-Chapelle	Pierre de Montreuil	Paris, France	1243-1248

工業革命 之後	C	Millard House	Frank Lloyd Wright	Pasadena, California	1923
	D	Le Chapel at Ronchamp	Le Corbusier	Ronchamp, France	1950-1955
數位時代 參數式設計	E	Serpentine Gallery Pavilion 2002	伊東豊雄	London, England	2002
	F	Honeycomb Morphologies	Andrew Kudless	London, England	2003-2004
	G	de Young Museum	Herzog & de Meuron	San Francisco, California	2002-2005
數位時代 互動設計	H	Caltrans District 7 Headquarters	Thom Mayne	Los Angeles, California	2002-2004
	I	Homeostatic Facade System	Decker Yeadon	New York, USA	2010
	J	療望_望春風	元智大學 CK-LAB	Taipei, Taiwan	2011

表3 本研究參照之開口案例。

4.2 分析

針對挑選出的 10 個開口案例中以第三章所得之開口因子進行分析，並試圖就其具有之開口因子，討論開口因子與空間感知之間的關係。

Case A. 聖索菲亞教堂(Hagia Sophia)- 圓頂開口

位於土耳其伊斯坦堡的聖索菲亞教堂以其巨大的圓形穹頂(dome)而聞名於世，由君士坦丁大帝下令建造（圖 19），在經歷幾次地震和戰亂後被燒毀，現今所見的 Hagia Sophia 其主要形體是由東羅馬皇帝查士丁尼一世於西元 532 年所重建完成的，內部空間豐富多變，為拜占庭式(Byzantium)建築的典範(Fazio et al., 2008)。

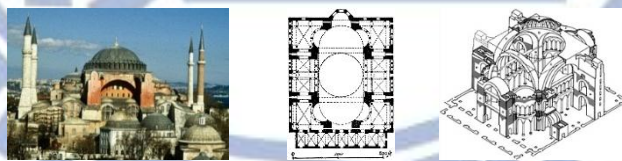


圖 19 聖索菲亞教堂（土耳其伊斯坦堡 / 532 - 537 年）

功能因子

引入光線：光線從圓頂下方四十個窗口傾瀉而下（圖 20），使圓頂恍若懸浮於正廳之上，凹室的彩繪玻璃窗與側廊的開口是室內光線的主要來源。

流通空氣：空氣可以透過窗口自由流通。

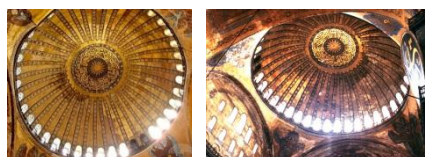


圖 20 聖索菲亞教堂圓頂的開口，凹室的開口，側廊的開口。

構成因子

材料堆疊：教堂建築由磚塊和琢石(ashlar)交替堆疊而成，圓拱豎長形的開口小且牆體厚實，在多層的磚塊中間夾上單層的琢石，可以增強砌層的牢固性。在正廳頂端的圓頂，直徑約 33 公尺，離地約 55 公尺，透過帆拱(pendentives)支撐在四個石柱上，底基是方形，圓頂由 40 個肋(rib)組成，從圓頂頂部延伸到基座，如同傘的邊緣，窗戶設置在兩個肋之間，共 40 個窗戶環繞在圓頂的底部，勒拱讓穹頂的重量通過窗與窗之間，傳導到下方的帆拱，最終抵達下方的基座(圖 21)。

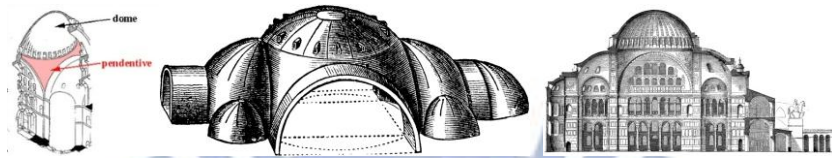


圖 21 聖索非亞教堂的圓頂結構與開口分布情形。

形式因子

視覺比例：圓頂的開口小，但卻環繞一個主體且密集排列，因而能夠使得光線聚集於此處，並同時吸引人們的目光。

討論：與空間感知的關係

方向性：教堂上方圓頂的開口就像是光罩一樣俯瞰著教堂的室內和室外空間，光線通過圓頂下方 40 個圓拱形窗戶，造就空間中的視覺焦點，人們的目光不由自主地被吸引，因而不得不抬頭仰望，以人的卑微渺小襯托出教堂空間的偉大崇高，光線垂直引導人們的視線，強化垂直的方向性。



圖 22 光線穿過聖索非亞教堂的圓頂開口。

Case B. 聖禮拜堂(Sainte-Chapelle)- 尖拱窗

聖禮拜堂(圖 23)是一座典型的哥德式禮拜堂，位於法國巴黎市西堤島上，由法國國王路易九世下令興建，用來典藏他從君士坦丁堡所購得的「聖物」(耶穌荊冠和十字架碎片等等)。教堂最著名的是大面積的彩繪落地玻璃窗(stain-glass window)，以及一扇精緻絢麗的彩色玫瑰花窗(rose window)，描繪新約與舊約聖經的所有故事。

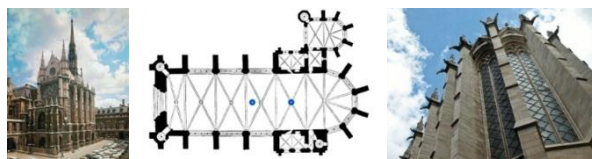


圖 23 聖禮拜堂(法國巴黎 / 1243 - 1248 年)

功能因子

引入光線：彩繪玻璃窗（圖 24）的總面積達 618 平方公尺，極大限度地將光線引入室內。

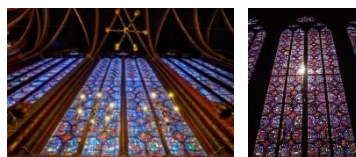


圖 24 尖拱窗、玫瑰花窗。

構成因子

材料堆疊：整座教堂都是拱柱的基座，所以外牆面幾乎是由幾何拱牆面及彩繪玻璃窗所構成（圖 25）。15 扇尖拱窗(lancet)是由分割成小塊的玻璃組成高達 15 公尺的彩繪玻璃窗，磚石牆面幾乎退縮為框架，以當時的構造技術尚不能夠支持水平方向的大面積開窗，於是產生高聳的豎形窗。

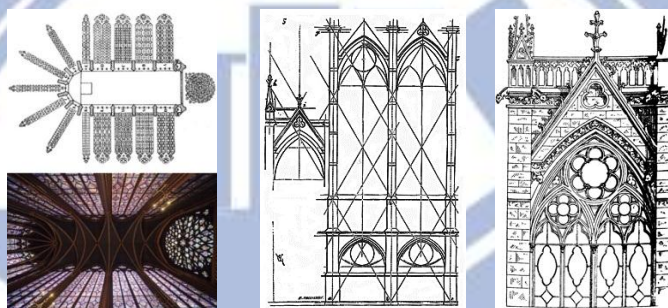


圖 25 聖禮拜堂的開口結構與分布。

形式因子

方向性質：大面積垂直方向的彩色玻璃窗，導引人們的視覺方向。

視覺比例：玻璃窗取代了牆阻隔風雨的機能，宛如一層薄膜，光線通過開口，柔化了框架線條，石材的牆體更不明顯，建築體看起來愈發輕盈。

討論：與空間感知的關係

方向性：垂直向上的彩繪玻璃窗幾乎佔據大部分的牆面，強烈地垂直標記，使教堂空間呈現莊嚴肅穆感。

通透性：大面積的玻璃窗，讓室內空間可以得到充足的光線。

裝飾性：繽紛的色彩讓人目不暇給，顯現五彩斑斕、晶瑩燦爛的奇幻意象，營造出一種神秘的氣氛（圖 26）。

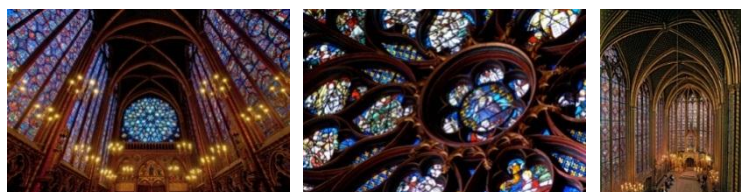


圖 26 光線穿透聖禮拜堂的彩繪玻璃窗，在內部空間產生色彩斑斕的視覺經驗。

Case C. Millard House – 磚單元開口

Millard House (圖 27) 的委託者是一位手工書商 Alice Millard，建築師 Wright 將具有裝飾性的 textile-block 組成粗糙的混凝土牆面，正方體的磚單元可以大量生產，基本單元體的堆疊產生多種風情的建築美感，以及內外一致的裝飾風格與機能。



圖 27 Millard House (美國加州 / 1923 年)

功能因子

引入光線：牆面的上半部是由水泥磚堆疊而成，光線從十字型的窗縫滲入，有孔隙的磚留存住光，避免太陽直射入室內，空心的水泥磚，還具有良好的隔熱保溫性質 (圖 28)。



圖 28 十字形窗縫。

構成因子

材料堆疊：基本單元是預製的空心水泥磚(textile-block)，在木製模具上刻劃十字形的圖樣，再將水泥倒入模具裡，等到水泥乾了之後，脫模取出，磚單元的表面上就有了十字形的窗縫(圖 29)，再以砌磚的工法，將水泥磚單元一個一個堆疊構成整道牆面 (圖 30)。



圖 29 textile-block 模板與基本原型。

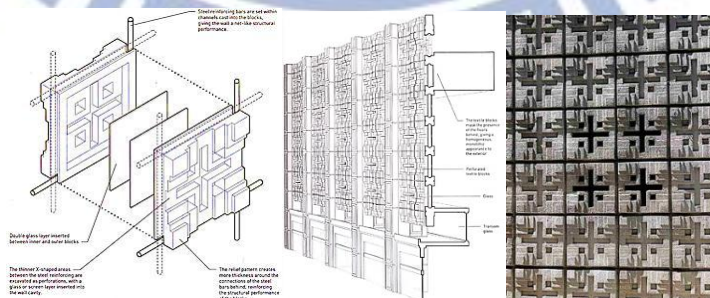


圖 30 具有十字形窗縫的基本磚單元堆疊成牆體。

形式因子

視覺比例：開口狹小，使光線可以被凝聚成一個個十字圖形，阻絕大部分的光線。

單元重複：單一的幾何圖案重複排列之下，組合成整個牆面的四方連續圖案。

討論：與空間感知的關係

裝飾性：有刻紋的水泥磚與平面的水泥磚組合使用，替建築的內外立面帶來了意想不到的裝飾效果，光線穿過十字形的窗縫，在室內的地面、家具上，映出奪目的幾何圖樣，顯現一個具有裝飾性圖樣的表面（圖 31），水泥是現代建築材料，而十字形重複排列卻又具有傳統建築裝飾的感覺，將裝飾元素引入現代建築中，巧妙地以新的手法包容舊的元素。

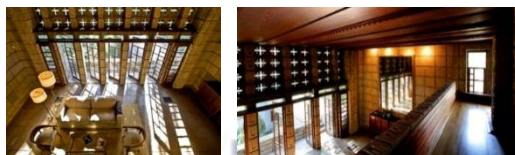


圖 31 Millard House 的內部空間。

Case D. Le Chapel at Ronchamp (廊香教堂) -洞窗-

廊香教堂(圖 32) 是一個有機型態的建築，與 Le Corbusier 過去明顯的現代建築風格截然不同，教堂面積雖然不大，但其結構卻富含力量和複雜性，最為人所稱道的是白色混凝土外牆上一個個大小不一、看似隨意安置的開口，卻在教堂內部造成驚人的效果。各種顏色的玻璃裝飾成類似蒙德里安(Mondrian)的圖畫，使室內瀰漫出一種濃郁而神秘的氣氛。



圖 32 廊香教堂 (法國廊香 / 1950 - 1955 年)

功能因子

引入光線：南面牆和屋頂之間開了一道約 40 公分寬的裂縫，白色的混凝土牆面上的窗洞有著大小比例、深度不一，並且嵌有各種顏色的彩色玻璃，牆體厚實，且外部開口小，而內部開口大，光反射作用後，在內部匯聚成一道道彩色光束，牆面宛如鑲滿了寶石，散發出璀璨的光輝（圖 33）。

流通空氣：透過裂縫與牆上的開口使空氣可以流通。

提供視景：人們的視野被侷限在方形框內，從牆上的窗洞觀看外面的景色，彩色玻璃也成為視景的一部分。



圖 33 空氣和光線可以通過洞窗和屋頂和天花板的裂縫進入室內空間。

構成因子

混凝土構築：教堂的結構體由混凝土和石頭建構而成，2 片間距 2.26 公尺的混凝土薄膜牆體圍

塑出建築外型，厚牆上留有一些大小不一的孔洞，帶有部分彩色玻璃的窗框緊緊嵌合在這些孔洞裡，屋頂並非與底下的牆體完全貼合，一根根嵌入牆體的短柱支撐著向上翹的屋頂，透過屋頂與牆之間的空隙為教堂內部注入來自外界的自然光線（圖 34）。



圖 34 混凝土構築方式讓牆面上具有大小不一的開口。

形式因子

視覺比例：外小內大的開口既可讓光線灑落於室內空間，又同時保有空間的私密性。

單元重複：相似的矩形開口單元散佈於牆面上。

討論：與空間感知的關係

通透性：建築師巧妙的操作開口形式，讓光線可以充分地進入空間，使空間通透明亮（圖 35）。



圖 35 光線進入室內空間。

Case E. Serpentine Gallery Pavilion 2002 (蛇形藝廊展示館)

日本建築師伊東豐雄(Toyo Ito)所設計的蛇形藝廊展示館（圖 36）是在 2002 年夏天，位於英國倫敦肯辛頓公園(Kensington Garden)的一座為期三個月的臨時展館，白天是可供休憩的咖啡館，傍晚以後則是作為舉辦演講、討論會、宴會等活動的場所，結構部分由 Cecil Balmond 所設計。



圖 36 蛇形藝廊展示館（英國倫敦 / 2002 年）

功能因子

引入光線：透過大面積的開口，光線可以進入建築結構體內部充盈於整個結構空間。

流通空氣：空氣可以自由流通。

提供視景：具有良好的視覺穿透性，館內的人們可以透過相互交織的分割線，觀賞分割過後，一塊塊不規整的藍天白雲（圖 37）。

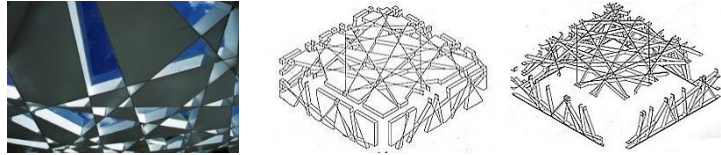


圖 37 交錯的線條分割出不規整的視景框。

構成因子

數位構築：建築結構體長寬各 18 公尺、高 4.5 公尺，整個建築體像是一個四方形的盒子，由結構框架建立表皮結構，將柱子往外推，線條交錯分割的規則是從矩形線段的中點連結到另一邊，依據遞迴與擴散的演算法規則一邊迴轉一邊擴大，生成一個完整的網狀系統(Proportional Networks) (圖 38)，結構體各部位彼此相互依存，支撐整個建物並保持整體的平衡，三種不同厚度的鐵條交錯造成梁與柱，再經由因梁柱交錯而形成的三角形和不規則四邊形的隨機性表面型態結構之中嵌入玻璃和鋁板，從屋頂到牆面，形成穩定的結構。建築結構系統本身即為整體建築表現，生成結構的方法決定此建築量體的表現型態。

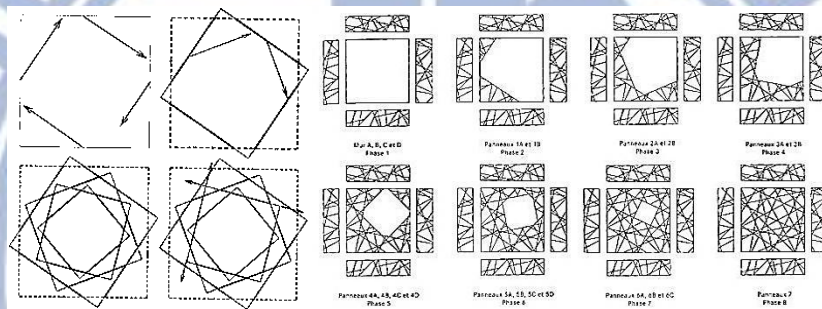


圖 38 利用演算法架構建築的整體結構。

形式因子

視覺比例：大面積的開口可以讓充足地引入光線，同時具有高度的視野穿透性。

討論：與空間感知的關係

通透性：當陽光灑落地面時，產生虛實交錯的光影效果，模糊了室內與室外之間的界線(圖 39)，空間通透明亮，符合建築體做為開放性空間的訴求。



圖 39 結構牆面的虛與實同樣在室內地面上產生光影的虛與實。

Case F. Honeycomb Morphologies

Honeycomb Morphologies (圖 40) 是一個整體的生成設計，使用演算法產生仿生結構，生成連續的蜂巢系統，在有限的構造技術之下，將多變的幾何型態移植到建築型態構成中，透過已發展成熟的工具，進行複雜的成形、生成與組織的行為。



圖 40 Honeycomb Morphologies (英國倫敦 / 2003 - 2004)

功能因子

引入光線：光線可以穿過蜂巢狀的牆面。

流通空氣：空氣可自由流通。

提供視景：視野被蜂巢狀網格所分割成一個個小格的視景框 (圖 41) 但又可以透過全部無填滿的開口看見牆體另一邊的全景。



圖 41 蜂巢狀網格牆體使光線與空氣可以自由通過並提供視景。

構成因子

數位構築：工業的大規模製造限定蜂巢系統的網格必須是標準化的六邊形，且只能在平面或規律的幾何曲面上生成，CAD/CAM 技術增進蜂巢結構的複雜性，設計者安排表面結構的節點，參數化讓節點分布的關係與幾何面的計算可以隨時被修改，演算法連結分散的點，建立起可交疊蜂巢狀網格單元，每一個單元都可以被獨立塑形，設定各自的尺寸、深度，這些不規則單元互相堆疊組成牆面結構 (圖 42) (Hensel, Menges et al. 2006)。

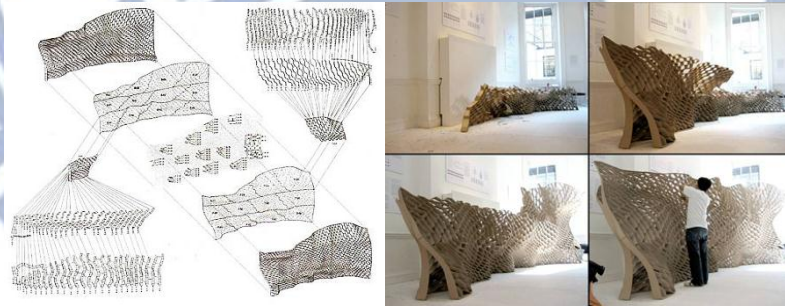


圖 42 CAD / CAM 技術輔助結構體生成。

形式因子

視覺比例：一個個小框的密集組合，讓開口部分仍佔據大部分的牆面範圍 (圖 43)。

單元重複：六邊形蜂巢狀網格相似單元組成整道牆面。

討論：與空間感知的關係

通透性：光線可以通過六邊形的網格框架，在地面上映出網格陰影，藉由網格框架的開口可以獲得良好的視野。光線通過緊密排列的六邊形的網格單元，牆面型態具有良好的視野穿透性。

裝飾性：光線通過六邊形的網格框架，將框架線條投影於地面上。



圖 43 蜂巢狀網格組態。

Case G. 笛洋美術館(de Young Museum)

位於舊金山金門公園(Golden Gate Park)的笛洋美術館 (圖 44) , 由瑞士建築師搭檔 Herzog & de Meuron 設計 , 原本建於 1919 年的笛洋美術館 , 在 1989 年的 Loma Prieta 大地震時毀損 , 新的笛洋美術館佔地約 27,220 平方公尺 , 約是舊笛洋美術館的 2/3 , 多出來的空間約 6,070 平方公尺則釋放到金門公園與公園融合 , 使金門公園擁有更大的開放空間。



圖 44 笛洋美術館 (美國加州 / 2002 - 2004)

功能因子

引入光線：光線通過銅板上大小不一的孔洞，猶如日光穿透樹葉一般，在地面上、空間中製造出點點光斑。被過濾成一個個圓形的光點。

流通空氣：空氣透過孔隙可以自由流通。

提供視景：從遠處無法看清銅板後的景物，逐漸拉近距離，人的視野被孔洞分散，視景宛如點描派的畫作，視景由一個個點匯聚成景，必須走到近處，才能透過小孔窺視銅板後的風景 (圖 45)。

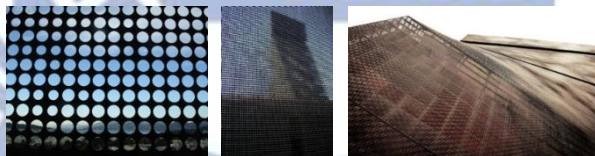


圖 45 密集的孔洞過濾光線，模糊化視景。

構成因子

數位構築：建築外牆是以約 7200 片銅板所組成，包覆整個建築體，運用電腦工程系統 (computerized engineering system)，使得銅板可以被切割與鑽孔 (圖 46)。



圖 46 運用電腦輔助製造技術切割鋁板。

形式因子

單元重複：在銅板上切割出許多大大小小的圓孔單元。

討論：與空間感知的關係

裝飾性：光線通過銅板上的孔洞，猶如日光穿透樹葉一般，在地面上、空間中製造出點點光斑。

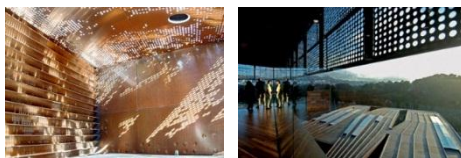


圖 47 笛洋美術館內部空間。

Case H. 交通運輸局第七區總部大樓(Caltrans District 7 Headquarters)

交通運輸局第七區總部大樓(圖 48)，是一棟具備高性能建築皮層(High Performance Building Skin)的可持續性(Sustainability)建築，由 Thom Mayne 所主持的 Morphosis Architects 建築師事務所設計完成的，作為交通運輸局的辦公大樓，外牆面的材料語言和結構元素暗指高速公路的基礎建設，具有動態感的建築立面正如同在道路上行駛的車子一般，外層表皮的建築機能就像車體一樣防護與保衛在內部空間的人們，是一個可回應環境的皮層，將提高辦公室的舒適度但又不會阻擋室內人們觀賞城市和海洋的視野，並增加環境效能，但是為了確保能夠顧及每個員工對空間的光照與通風的需求，所有外窗的窗簾都是可以手動操作的(圖 49)。



圖 48 交通運輸局第七區總部大樓(美國加州 / 2002 - 2004)

功能因子

引入光線：水平方向開口可以將光線充分地引入室內，開口隨光強度而改變狀態，讓光線入射於室內的位置也跟著改變。

流通空氣：開口的開啟除了引入光線之外，也使得空氣得以流通。

提供視景：隨著開口位置不停的變換，帶給辦公室員工不同角度的室外風景，

傳遞訊息：皮層會評估太陽光入射角度和光照強度，調整自身機制進行開啟或關閉的動作，讓每一層樓的員工都可以在開放的、有充足日照之下的工作空間辦公。

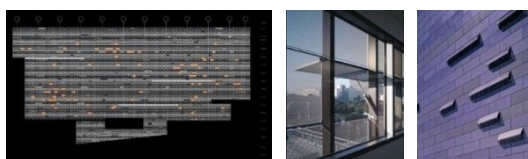


圖 49 立面開口可以評估外部環境變化，控制開口開關。

構成因子

互動組件：東邊與西邊外牆是由穿孔鋁板所組成的曲折網屏皮層，皮層接收到太陽光入射角度和光照強度的訊息，反應在調整自身的開口機制上，操作鋁板進行開啟或關閉的動作(圖 50)。開口開啟與關閉的機制是隨著時間轉移，太陽與天氣條件的變化而變動。



圖 50 曲折鋁板網屏結構與連結裝置。

形式因子

方向性質：每一層樓的開口皆是水平方向開展。

動態呈現：隨著太陽光入射角度和光照強度改變，開口不斷地反覆開啟和關閉，在不同的時間刻度下，建築外表亦呈現不同的風貌(圖 51)。

討論：與空間感知的關係

方向性：水平方向的開口，符合人的活動方式，貼近人的生活。

可變性：在日正當中的時刻，開口關閉，外牆看上去像是沒有窗戶也不透明似的，然而在黃昏時分，開口開啟，外牆呈現完全地透明，建築物隨著時間流轉，不停地轉變它的外表，同時也帶給室內空間不斷的光影變化，產生多變化的立面表情。



圖 51 不斷變動的開口立面。

Case I. 穩態立面系統(Homeostatic Facade System)

穩態立面系統(圖 52)由美國的 Decker Yeadon 事務所設計，裝設在建築物的南向立面，外牆是進階的自動調節系統，表面型態由銀色彎曲狀的開口機制所組成，以開啟和關閉的行為有效地調節室內溫度。此維持溫度平衡的結構，靈感來自於生物系統的體內平衡，此穩態立面系統可以裝置在使用玻璃帷幕牆面的辦公大樓。

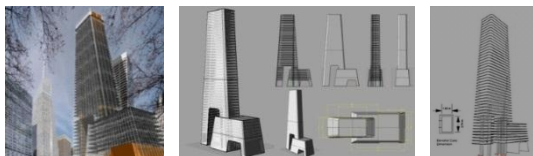


圖 52 穩態立面系統(美國紐約 / 2010)

功能因子

引入光線：銀色的表面材料還可以使反射及漫射光線。這樣的設計概念可以被商業化，增進更

適宜居住的室內空間，減少使用空調系統，降低能源消耗，若是結合自動化的室內光源系統，還可以降低照明強度並更有效地利用自然光，此系統可以完全地降低辦公室空間能源需求（圖 53）。

傳遞訊息：當太陽入射光線過量，材料伸展產生開口，創造建築物的室內陰影，阻隔過多的光線入射，當光線照射減弱，材料收縮關閉開口，允許更多光線進入建築物內部，透過開口的開闔，不斷地進行內部溫度調節，以達到減少或增加熱能的功效。

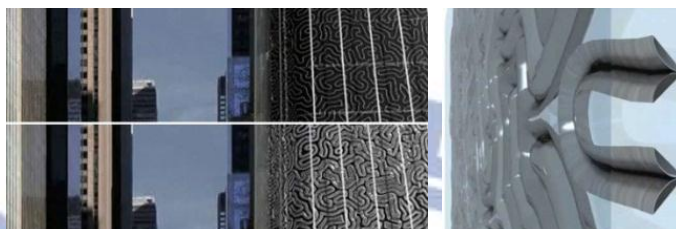


圖 53 上圖，立面開口開啟；下圖，立面開口關閉；右圖，立面開口細部。

構成因子

互動組件：絕大部分地高層建築，其自適應(adaptive)環境的立面皮層，多是經由電腦程式來控制，以達成節約能源的目的，然而在設定程式時有可能疏漏某些部分，或是在撰寫程式時讓設計者煞費心思，卻依然有可能造成系統的不穩定，此開口裝置本身的材料，不須依賴程式碼或是人為操作即可實現預期的結果，使用簡單的技術，經由熱能來操控運動裝置，雙層玻璃帷幕系統(double-skin glass facade system)可以自動化地回應環境條件，由精密的驅動機構運作，此驅動機構運動模式如同人造的肌肉，透過自動化的系統控制熱能的減少或增加，並同時強化建築物的表徵。裝置的表面材料同時也是驅動裝置運動的馬達，從根本上提供溫度調節同時減少能源消耗與發散，由介電彈性體(dielectric elastomer)包覆住彈性的矽膠(silicone)聚合物材質的核芯(flexible polymer core)，電荷分布於介電彈性體上，一邊為正極一邊為負極，通電後，因為異性相吸擠壓聚合物導致聚合物的曲度改變產生變形，當過熱或過亮時延展，過冷時收縮彈性體讓有彈性的核芯彎曲，達到操控開口打開與關閉的行為來回應熱能的改變（圖 54）。

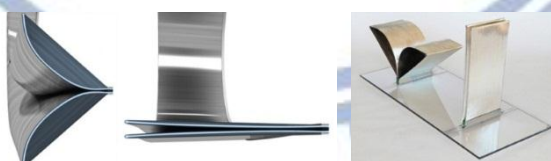


圖 54 互動開口組件單元。

形式因子

動態呈現：經由自動化回應環境條件來調節建築物的氣候，不需藉由人力或外力使其運作，有利於降低耗能並提供溫度的調節以減少能源消耗，開口隨光照強度調節自身機制，不斷地改變開啟的程度。

討論：與空間感知的關係

裝飾性：光線通過彎曲的開口線條，倒映在空間中產生裝飾性濃厚的空間性質（圖 55）。可變性：隨光照強度改變開口自身形態，也改變光線的入射量與方向角度，空間亦隨之變動。



圖 55 結構立面的彈性體對抗太陽熱能的增加，在室內空間產生不斷變換的光影表現。

Case J. 療望_望春風 (2011 國科會計畫)

「療望 (圖 56) 」，是一個可以回應使用者行為的互動設計，牆面上有許多開口，宛如植物葉子中的氣孔，氣孔會依照接收到的光照強度增強或減弱而進行張開關閉的行為，對環境做出反應，將此概念融合於牆上開口的設計中，作為開口的主要行為機制。開口的變換，給予使用者豐富的視覺經驗，開口大小由參數所控制，連結互動裝置，經由老人投物的行為而改變控制參數，與老人投物的行為互動，以此方式進行失智症的職能治療。

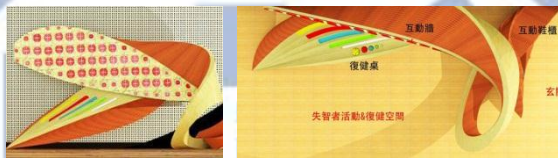


圖 56 療望_望春風 (臺灣台北 / 2011)

功能因子

傳遞訊息：藉由老人投物的行為啟動微動開關，訊號經過 Arduino 板，驅使開口機制產生相對應的反應，將訊息回饋給老人 (圖 57)。



圖 57 老人投物的行為觸動開口產生相對應的回應。

構成因子

數位構築：以雷射切割機切割開口單元的圖形。

互動組件：以中國傳統圖樣作為互動裝置的原型，將開口元件嵌在牆面上，且此元件可以隨著使用者行為而做出回應，為使開口裝置的機構可行，一步步修正機構桿件的設計與組合方式，調整馬達與葉片的相對關係。馬達的位置，決定開口與開口之間的間距，間距影響整體的視覺效果，為使間距達到最小值，強化牆面開口整體的視覺印象，讓馬達的位置在開口的後方，四個葉片由一個馬達控制，解決機構上的問題，透過這些互動裝置元件的開關，創造一個可呼吸的牆面 (圖 58)。

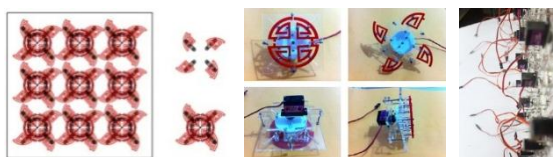


圖 58 開口單元組件機構。

形式因子

單元重複：將符號性的象徵納入互動牆的整體設計中，現代技術與傳統文化巧妙的結合，使之具有文化性的、社會性的感染力，中國傳統的文化式樣，賦予牆面更深刻的文化意義與美學意涵（圖 59）

動態呈現：隨著開口張開，顯示開口後的影像，有些開口張開，有些開口關閉，豐富了牆面的視覺形式，隨著老人投物的行為所呈現出來的牆面特徵，讓牆面的表現形式變得更為生動有趣。

討論：與空間感知的關係

方向性：互動機制讓開口可以經由程式碼控制產生垂直或水平方向性。

裝飾性：運用具有中國文化意涵的代表性圖樣作為開口元件，顯現濃厚的文化意涵。

可變性：開口隨使用者行為而改變自身的行為機制，造就空間的可變性，豐富空間層次。



圖 59 互動開口的立面形式表現。

4.3 綜合分析

本研究試圖探究開口造成的空間感知，而開口的功能因子、構成因子與形式因子的組成會影響開口的空間性質，由上述 10 個開口案例中，分析出各自具有的功能因子、構成因子與形式因子以及開口因子與空間感知的關係，統整與這 10 個案例中具有開口因子如表 4，由表中可知各個案例具有的開口因子，以及各開口因子相對應的關係，以下將比較各個案例所具備的功能因子、構成因子和形式因子與受開口因子所影響的空間感知，並詳述開口因子在開口案例中的意義，再挑出具有相同空間感知的開口案例，比較其架構出的空間感知之間的差異性，最後整理出對空間感知有主要影響之開口因子，以此作為進行第五章開口設計實作之依據。

CASE	開口因子	I				II				III			
		功能因子				構成因子				形式因子			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
		引入光線	流通空氣	提供視景	傳遞訊息	材料堆疊	混凝土構築	數位構築	互動組件	方向性質	視覺比例	單元重複	動態呈現
A	Hagia Sophia	○	○	×	×	○	×	×	×	×	○	×	×
B	Sainte- Chapelle	○	×	×	×	○	×	×	×	○	○	×	×
C	Millard House	○	×	×	×	○	×	×	×	×	○	○	×
D	Chapel at Ronchamp	○	○	○	×	×	○	×	×	×	○	○	×
E	Serpentine Gallery Pavilion 2002	○	○	○	×	×	×	○	×	×	○	×	×

F	Honeycomb Morphologies	○	○	○	×	×	×	○	×	×	○	○	×
G	de Young Museum	○	○	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×
H	Caltrans District 7 Headquarters	○	○	○	○	×	×	×	○	○	×	×	○
I	Homeostatic Facade System	○	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○
J	療望_望春風	×	×	×	○	×	×	○	○	×	×	○	○

表4 各個案例中具有開口因子

本研究針對受開口影響而生成的空間感知來討論各案例中功能因子、構成因子與形式因子之間的相互關係，由第三章案例分析中可知各個案例所具備之空間感知，包含開口的引導之視覺方向產生的「方向性」(Case A, Case B, Case H)的空間感知、開口佔據牆面的比例(Case B, Case E, Case F)或是空間是否能得到充足的光線(Case D, Case E)，皆會影響「通透性」的程度(Case D, Case E, Case F)，開口的繁複形式連帶產生「裝飾性」的空間感知(Case A, Case B, Case H)，以及開口的動態造就可變性(Case H, Case I, Case J)的空間感知，討論架構空間性質的組成因素，我們可以妥善運用不同的構成方式生成各種不同的開口形式，達成多樣化的空間感知，同時亦滿足所需求的功能，分析這些各個不同形式的開口案例，得到其主要影響空間感知的形成之功能因子變數、構成因子變數與形式因子變數之間的相互關係，設計者可以以此作為日後規劃開口形式表現的參考。

4.3.1 功能因子變數

由 3.1 小節所述，開口的功能因子包含引入光線、流通空氣、提供視景和傳遞訊息，且 Krier(2010)亦表明，窗最重要的功能是引入光線，以及光線通過窗戶在室內空間造成的效果。然而，現代技術使得開口可以具備更多功能，但是卻很有可能失去開口與生俱來最基本的功能，雖然光線可以藉由現代照明技術來補足，為了滿足設計需求，必須捨棄一些基本的功能需求。檢視各個開口案例所具有的功能因子，並找出主要影響空間感知的功能因子整理成表 5：

開口因子 CASE		I				功能因子影響的空間感知	
		功能因子					
		1	2	3	4		
		引入光線	流通空氣	提供視景	傳遞訊息		
A	Hagia Sophia	光線建立視覺焦點	開口開放空氣對流	×	×	I-1	方向性
B	Sainte-Chapelle	光線創造視覺效果並使空間明亮	×	×	×	I-1	裝飾性
C	Millard House	光線凸顯開口紋樣	×	×	×	I-1	裝飾性

D	Chapel at Ronchamp	運用光的反射特性	開口開放空氣對流	外部景物與彩色玻璃組合成視景	×	I -1	通透性
E	Serpentine Gallery Pavilion 2002	光線暢通於展館全區	開口開放空氣對流	開口分割外部景物	×	I -1	通透性
						I -3	
F	Honeycomb Morphologies	光影特性表現開口原型	開口開放空氣對流	開口框選視景單元	×	I -1	裝飾性
						I -3	通透性
G	de Young Museum	光影特性表現開口原型	開口開放空氣對流	開口過濾外部景物	×	I -1	裝飾性
H	Caltrans District 7 Headquarters	光線創造動態效果	開口開放空氣對流	開口機構控制視景範圍	接收環境訊息	I -1	可變性
						I -3	
						I -4	
I	Homeostatic Facade System	光線凸顯開口紋樣	×	×	接收環境訊息	I -1	裝飾性
						I -4	可變性
J	療望_望春風	×	×	×	接收使用者行為訊息	I -4	可變性

表5 各開口案例的功能因子影響的空間感知。

以下針對「引入光線」、「流通空氣」、「提供視景」和「傳遞訊息」的功能因子變數，討論影響各個案例的空間感知的形成：

I-1 引入光線

Case A：運用光線收攏人們的目光，使人們不自覺地抬頭仰望，瞻仰教堂的神聖性。

Case B：光線穿透過華美的彩色玻璃花窗，營造色彩繽紛、璀璨奪目的視覺印象，人們不得不讚嘆這些彩色玻璃花窗的精緻巧妙、巧奪天工。

Case C：十字形的窗縫留存住光，透出十字型的圖紋，光線強化開口的紋路，凸顯開口的特徵。

Case D：牆面上尺寸不一、外小內大的漏斗形開口，利用光反射作用原理，讓光線得以在室內擴散，且每個開口本身還嵌有色彩各異的彩色玻璃，在室內亦造就色彩斑斕的現象。

Case E：光線可以通過大面積的不規則開口，充盈於整個展場空間，使空間得到足夠的照明。

Case F：光線穿透小面積但密集的蜂巢狀網格開口群組，在地面上產生六邊形的網格陰影。

Case G：單一圓孔造型的開口卻有大大小小不同的尺寸，光線經過這些圓孔，在地面上生成點點光斑，宛若經樹葉篩落的光點，散佈在空間各處。

Case H：隨著光照強度更動開口位置，光線進入空間的時間、地點和量值不是經由太陽直射角度與強度直接反映在空間中，而是由開口的自我調整機制來控制，決定空間可接受的光量。

Case I：光線通過曲折形式的開口，在空間中形塑出曲折的光形，太陽光驅使開口尺寸異動，同時使得光形產生大小變換。

I-2 流通空氣

Case A：圓頂的圓拱形開口讓空氣可以互相流通

Case D：牆上大小不一的開口使得空氣可以對流。

Case E：經由演算法規則交織出的結構框架，僅有部分開口嵌入玻璃，而未嵌入玻璃的開口，讓空氣可以自由的流通於室內室外。

Case F：蜂巢狀的網格牆體，開口近乎完全開放，空氣也可以自行對流。

Case G：空氣經由銅板外牆上大大小小的圓孔滲透入室內。

Case H：空氣可以通過水平方向的動態開口。

I-3 提供視景

Case D：外小內大的開口，框限了室內人們的視野，開口的部分範圍，嵌有彩色玻璃，這些彩色玻璃亦成為視景的一部分。

Case E：結構框架分割視景，人們可以看見被分割過後，一塊塊不規整的景色。

Case F：蜂巢狀的網格框架框選了視景的局部，框架框選了視覺的區塊。

Case G：透過一個個密集分布的圓孔，銅板牆面另一邊的景物可以為人們所探知，隨著人們與牆的距離逐漸拉近，外部景色亦漸漸清晰。

Case H：互動開口隨時改變開啟和關閉的狀態，框選的視景區塊也跟著改變。

I-4 傳遞訊息

Case H：感應元件接收到太陽光照強度變化的訊息，經由互動機制來控制開口開啟的位置。

Case I：運用材料會隨著太陽光強度改變彎曲程度的特性，以此來限制光線進入室內空間的量值，人們也可以得知當前的天氣狀態反映在開口開啟的程度上。

Case J：感應元件接收到老人投物的行為，不同的顏色對應到不同的感應元件，開口亦產生不同的變化，再將開口欲表達的訊息呈現在使用者面前。

小結：

「引入光線」是影響空間感知最重要的功能因子，可以建立方向性，導引人們的視覺方向(Case A)，裝飾性則可藉由光線通過開口本身來達成(Case B; Case C; Case F; Case G; Case I)，在室內產生光影交織的趣味，將開口自身的形態投影在空間中，或是將大量的光線引入室內，建立空

間的通透性(Case D; Case E)·「提供視景」的功能因子讓一個空間延續到另一個空間·也可以產生空間的通透性(Case E; Case F)·也可經由「傳遞訊息」的功能·讓開口機制受到外部訊息的干擾而變動·進而影響空間的可變性(Case H; Case I; Case J)·但是「流通空氣」的功能因子主要影響的是氣味與聲響的傳播·由於本研究主要探討的是視覺所牽引之空間感知·因此在本研究中暫不討論「流通空氣」所影響的空間感知·但此功能因子仍可作為未來研究可討論之議題。

4.3.2 構成因子變數

由 3.2 小節中可知·開口的構成因子包含「材料堆疊」、「混凝土構築」、「數位構築」和「互動組件」·構成因子意即組成開口的方式·隨著構成方式的不同會產生不同的空間感知·甚或是相同的構成方式·以不同的手法運用·也有可能產生截然不同的空間感知·隨著構成方式的進步·我們在選擇開口的構成方式時·可以有更多種選擇·足以生成更為豐富的空间感知·表 6 顯示各個開口案例的構成因子·以及構成因子所影響的空間感知：

開口 因子 CASE		II				構成因子影響的 空間感知	
		構成因子					
		1	2	3	4		
		材料堆疊	混凝土構築	數位構築	互動組件		
A	Hagia Sophia	磚石堆疊成圓拱形開口	×	×	×		×
B	Sainte-Chapelle	磚石堆疊成尖拱形開口	×	×	×		×
C	Millard House	預鑄開口單元堆疊而成	×	×	×	II-1	裝飾性
D	Chapel at Ronchamp	×	混凝土塑造開口形體	×	×	II-2	通透性
E	Serpentine Gallery Pavilion 2002	×	×	演算生成開口結構	×		×
F	Honeycomb Morphologies	×	×	Honeycomb 演算法	×	II-3	裝飾性
G	de Young Museum	×	×	電腦工程系統切割出開口	×	II-3	裝飾性
H	Caltrans District 7 Headquarters	×	×	×	互動機械裝置	II-4	可變性
I	Homeostatic Facade System	×	×	×	利用材料特性與機械裝置	II-4	可變性
J	療望_望春風	×	×	雷射切割出開口單元	互動機械裝置	II-3	裝飾性
						II-4	方向性 可變性

表6 各開口案例的構成因子影響的空間感知。

由表 6 可知「材料堆疊」、「混凝土構築」、「數位構築」和「互動組件」的構成因子可以依其特性，塑造不同的空間感知，以下針對各項構成因子變數，討論受到構成因子影響之空間感知的形成：

II-1 材料堆疊

Case A：磚石堆疊成圓拱窗形，整齊劃一的排列。

Case B：磚石堆疊成尖拱窗形，玻璃切割成小塊，上色後再組裝成彩色玻璃窗。

Case C：預鑄的基本磚石單元中間有十字形的窗縫，再堆疊成牆體。

II-2：混凝土構築

Case D：混凝土外牆上開有大小不一，深度各異的洞窗。

II-3：數位構築

Case E：運用演算規則，在不斷迴轉的矩形隨機性表面型態結構之中嵌入玻璃和鋁板。

Case F：Honeycomb 的演算法結構，再以電腦計算製作單元體組合成牆面。

Case G：使用 CAM 技術在銅板上切割出大小不一的圓孔。

Case J：雷射切割開口組件，建立開口基本形態。

II-4：互動組件

Case H：穿孔鋁板所組成的曲折網屏皮層，會隨外部環境變化控制開口的開闔。

Case I：利用材料特性改變開口的開闔。

Case J：使用者投物觸動開關，開口對應不同開關，有不同的行為表現。

小結：

構成因子決定開口的組成方式，「材料堆疊」的構成因子，利用材料本身的形式特徵將之堆疊具有窗縫的牆體，並因此產生具有裝飾性的空間感知(Case C)。「混凝土構築」構成因子，利用混凝土可塑性高的材料特性，可以塑造各種開口表現，建立適合光線發散的開口路徑，造就具有「通透性」的空間感知(Case D)，「數位構築」建立之的開口具有複雜形體，生成具有裝飾性的空間感知(Case F, Case G, Case J)。「互動組件」建立之動態開口造就空間的可變性(Case H, Case I, Case J)。

4.3.3 形式因子變數

由 3.3 小節中可知，開口的形式因子包含「方向性質」、「視覺比例」、「單元重複」和「動態呈現」，形式因子決定開口所呈現的形貌，控制開口的方向、大小和表現方式，善用形式因子變數，可以產生截然不同的空間感知，整理各個案例具有的形式因子，並找出主要影響空間感知的形式因子整理成表 7：

開口 因子 CASE		III 形式因子				形式因子影響的 空間感知	
		1	2	3	4		
		方向性質	視覺比例	單元重複	動態呈現		
A	Hagia Sophia	×	小而密集地 圍繞主體	×	×		×
B	Sainte- Chapelle	豎長形的 開口單元	大面積的 開口	×	×	III-1	方向性
						III-2	通透性
C	Millard House	×	開口狹小 密集	十字形	×	III-3	裝飾性
D	Chapel at Ronchamp	×	外小內大	矩形	×		×
E	Serpentine Gallery Pavilion 2002	×	大面開窗	×	×	III-2	通透性
F	Honeycomb Morphologies	×	密集地 開口群組	六邊形	×	III-2	通透性
						III-3	裝飾性
G	de Young Museum	×	×	圓孔	×	III-3	裝飾性
H	Caltrans District 7 Headquarters	水平方向 開展的開口	×	×	與環境互動	III-1	方向性
						III-4	可變性
I	Homeostatic Facade System	×	×	×	與環境互動	III-4	可變性
J	療望_望春風	×	×	中國傳統 圖樣	與使用者 互動	III-3	裝飾性
						III-4	可變性

表7 各開口案例的形式因子影響的空間感知。

由表 7 可知「方向性質」、「視覺比例」、「單元重複」和「動態呈現」的形式因子可以依其特性，塑造不同的空間感知，以下針對各項形式因子變數，討論受到形式因子影響之空間感知的形成：

III-1：方向性質

Case B：大面積垂直方向的彩色玻璃窗，導引人們的視覺方向。

Case H：每一層樓的開口皆是水平方向開展。

III-2：視覺比例

Case A：開口單元密集地環繞在圓頂的底部。

Case B：玻璃窗宛如一層薄膜，光線柔化了框架線條，建築體看起來愈發輕盈。

Case C：狹小的十字形單元開口。

Case D：外部開口小，而內部開口大，使光線充盈。

Case E：光線藉由大面積的開口通過建築結構體，具有高度的視野穿透性。

Case F：光線通過緊密排列的六邊形的網格單元，牆面型態具有良好的視野穿透性。

III-3：單元重複

Case C：單一的幾何圖案重複排列之下，組成整個牆面的四方連續圖案。

Case D：散落在牆面上的矩形開口。

Case F：利用演算法生成六邊形網格開口，衍生出具有自相似性(Self-Similarity)的單元，相似單元排列組合構成牆體

Case G：銅板牆面上開有一個個大小不一的圓孔。

Case J：以中國傳統圖樣為開口單元。

III-4：動態呈現

Case H：隨著太陽光入射角度和光照強度改變，開口不斷地反覆開啟和關閉。

Case I：開口隨光照強度調節自身機制，不斷地改變開啟的程度。

Case J：隨著老人投物的行為所呈現出來的牆面特徵，讓牆面的表現形式變得更為生動有趣。

小結：

形式因子控制開口呈現的形態，「方向性質」的形式因子決定開口的方向為垂直、水平或傾斜，對空間產生方向性的空間感知(Case B, Case H)，「視覺比例」的形式因子讓開口佔去大部分的牆體，視覺比例大而產生開放感，形成具有通透性的空間感知(Case B, Case E, Case F)，則利用相似單元的密集重複，「單元重複」的形式因子利用相同或相似單元的重複排列，產生裝飾性的空間感知(Case C, Case F, Case G, Case J)，而「動態呈現」的形式因子則使的開口影響空間性質，產生可變性的空間感知(Case H, Case I, Case J)。

4.3.4 空間感知的方向性

前述 4.3.1-4.3.3 小節討論在開口案例中的各個功能因子、構成因子與形式因子影響的空間感知，以下將比較各個空間感知的呈現方式。開口的垂直與水平方向關係著人的動線以及人與環境之間的連結性，表 8 可明顯看出開口因子的差異，不同的開口因子造成不同的開口形式表徵，即便是相同的開口因子，也有可能產生不同的開口表現，造就不同的空間性質，善用開口因子的特性，協助我們建構出恰當地空間感知。

Case	I	II	III	空間感知
	功能因子	構成因子	形式因子	
A Hagia Sophia	引入光線、流通空氣	材料堆疊	視覺比例	方向性：垂直
B Sainte-Chapelle	引入光線	材料堆疊	方向性質、視覺比例	方向性：垂直
H Caltrans District 7 Headquarters	引入光線、流通空氣、提供視景、傳遞訊息	互動組件	方向性質、動態呈現	方向性：水平
J 療望_望春風	傳遞訊息	互動組件	動態呈現	方向性：水平、垂直、傾斜

表8 表現開口方向性之案例對應的功能因子、構成因子與形式因子與空間感知的關係。

檢視表 8 中具有「方向性」空間感知的開口案例，從開口案例中發現，工業革命之前的 Case A 與 Case B 的開口強化調垂直的空間特質，Case H 的開口則是往水平方向運動，Case J 則是由程式控制開口的開闔，可以讓視覺上感覺開口像是在往某個方向移動。

Case A 與 Case B 雖同為教堂建築，同樣採用「材料堆疊」的構成因子，但是它們標記垂直意識的方法卻不相同，Case A 是藉由開口營造圓頂凌空的視覺衝擊，Case B 則以高聳的彩繪玻璃窗創造瑰麗奇幻的神聖意象，凸顯人的卑微渺小，強化教堂建築不可侵犯的空間意識。

不同的時代強調不同的空間性質，互動數位時期的 Case H 作為辦公大樓，將開口水平開展，適應人的行動方向，創造貼近人的空間尺度，讓員工在空間中可以自在地活動。垂直強調的開口創造出偉大崇高的空間感，水平方向的開口則塑造出親和宜人的空間特質。由此可見，開口方向性的不同使人們感受到差異性極大的空間感受。

4.3.5 空間感知的通透性

「開口的閉合程度與空間的明確性有直接的關聯。(Meiss, 1990)」，大面積的開口使空間可以大量採光，連結室內與室外空間，創造出明亮的開放空間、具有「通透性」的空間性質，表 9 比較各種具有通透性質的開口案例，這些開口架構通透性的空間感知的方法不盡相同。

Case	I	II	III	空間感知
	功能因子	構成因子	形式因子	
B Sainte-Chapelle	引入光線	材料堆疊	方向性質、視覺比例	通透性
D Le Chapel at Ronchamp	引入光線、流通空氣、提供視景	混凝土構築	視覺比例、單元重複	通透性
E Serpentine Gallery 2002	引入光線、流通空氣、提供視景	數位構築	視覺比例	通透性
F Honeycomb Morphologies	引入光線、流通空氣、提供視景	數位構築	視覺比例、單元重複	通透性

表9 表現開口通透性之案例對應的功能因子、構成因子與形式因子與空間感知的關係。

檢視表 9 中具有「通透性」空間感知的開口案例，從開口案例中發現 Case B 的開口垂直聳立，玻璃窗取代了牆阻隔風雨的機能，宛如一層薄膜，建築體看起來愈發輕盈。工業革命之後的 Case D 採用「混凝土構築」的構成方式，使得開口可以是任意形式的開口，光線通過外小內大的開口，藉由光反射作用的原理，光線在室內發散，使內部空間明亮。參數數位時期的 Case E 與 Case F 皆是經由演算法自動生成整體結構形體，Case E 是在不斷迴轉地矩形分割結構中嵌入玻璃和鋁板，製造出開口，大面積的開口造成開放的空間，同時獲得充足的照明，具有良好的視野穿透性。而 Case F 則是組件相互套疊組成整道牆面後，開口也隨之產生，除卻框架部分，其餘皆為開口，同樣具有良好的視野穿透性。CAD / CAM 技術讓建築形體的複雜度達到以往手繪無法呈現的風貌，建立「通透性」的空間性質手法也跟著改變。

4.3.6 空間感知的裝飾性

複雜形態的開口在空間中產生強烈的「裝飾性」特質，不單只是開口本身形態造成的視覺繁複性，尤其是當光線通過複雜形態的開口，亦同時在空間中產生複雜形貌的圖紋。表 10 比較各種具有裝飾性質的開口案例，產生複雜多變具「裝飾性」的空間感知：

Case	I	II	III	空間感知
	功能因子	構成因子	形式因子	
B Sainte-Chapelle	引入光線	材料堆疊	方向性質、視覺比例	裝飾性
C Millard House	引入光線	材料堆疊	視覺比例、單元重複	裝飾性
F Honeycomb Morphologies	引入光線、流通空氣、提供視景	數位構築	視覺比例、單元重複	裝飾性
G de Young Museum	引入光線、流通空氣、提供視景	數位構築	單元重複	裝飾性
I Homeostatic Facade System	引入光線、傳遞訊息	互動組件	動態呈現	裝飾性
J 療望_望春風	傳遞訊息	數位構築、互動組件	單元重複、動態呈現	裝飾性

表10 表現開口通透性之案例對應的功能因子、構成因子與形式因子與空間感知的關係。

檢視表 10 中具有「通透性」空間感知的開口案例，從開口案例中發現複雜的開口形式容易

產生「裝飾性」強烈的空間意象，工業革命之前的 Case B 皆是讓光線穿透大面積的彩繪玻璃窗產生絢爛奇幻的意象，製造出「裝飾性」的空間感知。

工業革命之後的 Case C、Case G 和 Case I 皆是藉由光線穿透開口，讓開口本身的造型限定了光呈現在人們面前的形體，具有「裝飾性」的空間感知，Case C 十字形的窗縫整齊排列，產生具有裝飾性的牆面，Case G 則是光線通過小而密集的相似單元在空間中製造出點點光斑，而 Case I 更是運用「互動組件」的構成因子，讓開口隨日照強度改變開口的開闔，光線通過彎曲的開口線條倒映在空間中，進而在室內空間產生隨時間流轉的光影效果，展現「裝飾性」的空間性質，但是 Case C 的十字形窗縫窄小，限制了視景框的範圍，人們無法隨意的經由開口看見外部的景色，另外，Case J 將開口元件本身設計成中國傳統圖樣，具有濃烈的中國「裝飾性」風格，又同時具有文化意涵。

互動數位時期的 Case I 的開口組件可以與環境互動，Case J 的開口組件則可以與使用者互動，兩者同樣是以「互動組件」進行開口的張開與關閉動作，但是 Case I 是利用材料本身的特性，使材料伸縮以進行張開關閉的行為，而 Case J 是使用程式驅動機械裝置控制開口，讓開口可以與使用者互動，雖然「互動組件」讓開口具有「傳遞訊息」的功能因子，但是卻沒有考慮到「引入光線」與「流通空氣」的功能因子。

4.3.7 空間感知的可變性

加入互動技術的開口組件，改變人們可感知的空間氛圍，開口可以隨環境或使用者行為來改變自身的形態，光與影的變態同時也改變了空間的形態，成就了空間的「可變性」，表 11 顯示組成開口動態的開口因子。

Case	I	II	III	空間感知
	功能因子	構成因子	形式因子	
H Caltrans District 7 Headquarters	引入光線、流通空氣、提供視景、傳遞訊息	互動組件	方向性質、動態呈現	可變性
I Homeostatic Facade System	引入光線	互動組件	動態呈現	可變性
J 療望_望春風	傳遞訊息	數位構築、互動組件	單元重複、動態呈現	可變性

表11 表現開口動態之案例對應的功能因子、構成因子與形式因子與空間感知的關係。

感應元件捕捉到使用者的行為，使得開口的運作模式受到干擾，生成具有自我意識的開口，當光投射到空間中，藉由各個開口元件彼此位置之相對關係和使用者軀體在空間中的運動行為，造成光形的變換移動，產生光影交織的動態效果，使空間形象交錯變幻，充滿動態演變的視覺經驗，在情境的營造上，除了使牆面變得更為生動有趣之外，亦同時豐富空間層次，使空間形態變異仿若有機的生物體，光線參與了空間的生成過程，並賦予空間生命能量。

檢視表 10 中具有「通透性」空間感知的開口案例，從開口案例中發現互動數位時期的 Case H、Case I 和 Case J 加入互動組件，使得空間型態也能隨開口移動，開口的轉移使空間隨光影的變換而顫動。開口可以隨環境的變化改變自身形態，空間形態也隨之轉變成截然不同的空間意識形態。Case H 和 Case I 變換開口位置或形態，使其具有「可變性」的空間感知，Case J 沒有「引入光線」的功能因子，仍可運用互動開口變換表現形式來成就空間感知的「可變性」，開口隨著使用者行為改變自身形態，空間形態也隨之變動。

4.4 總結

正如第三章所述，利用不同的開口形式來建構這些不同的空間意識，必有相對應的構成方式，而構成方式亦須滿足開口的功能需求，本研究試圖藉由分析組成開口表現的開口因子，找出主要影響空間感知的功能因子、構成因子與形式因子，並將這些開口因子運用於接下來第五章的設計實作中，經由妥善利用不同形式的開口特質，有助於在建置空間與設計開口形式時，指引我們更為清楚的設計方向。將表 8~表 11 中主要影響開口案例的空間感知之開口因子整理成表 12：

CASE	空間感知	對空間感知有主要影響之開口因子			
		I	II	III	
		功能因子	構成因子	形式因子	
A	Hagia Sophia	方向性	引入光線	×	×
B	Sainte-Chapelle	方向性	×	×	方向性質
		通透性	引入光線	×	視覺比例
		裝飾性	引入光線	×	×
C	Millard House	裝飾性	引入光線	材料堆疊	單元重複
D	Chapel at Ronchamp	通透性	引入光線	混凝土構築	×
E	Serpentine Gallery	通透性	引入光線、提供視景	×	視覺比例
F	Honeycomb Morphologies	通透性	提供視景	×	視覺比例
		裝飾性	引入光線	數位構築	單元重複
G	de Young Museum	裝飾性	引入光線	數位構築	單元重複
H	Caltrans District 7 Headquarters	方向性	×	×	方向性質
		可變性	引入光線、提供視景、傳遞訊息	互動組件	動態呈現
I	Homeostatic Facade System	裝飾性	引入光線	×	×
		可變性	引入光線、傳遞訊息	互動組件	動態呈現
J	療望_望春風	方向性	×	互動組件	×
		裝飾性	×	數位構築	單元重複
		可變性	傳遞訊息	互動組件	動態呈現

表12 影響開口案例的空間感知之開口因子。

由表 12 中檢視具有影響這 10 個開口案例所具有的空間感知，以及形成這些空間感知的開口因子，功能因子方面，藉由「引入光線」的功能因子，牽引人們的目光，可提供指引方向的功能，產生具有方向性的空間感知，當光線通過開口時進入室內空間時，提供空間的照明，建立具有通透性的空間感知，開口形態若為繁複的裝飾性圖紋，當光線通過時，開口的圖紋亦會

藉由光影的效果在空間中產生具有裝飾性的圖紋，達到具有裝飾性的空間感知，當光線通過動態的開口時，光影的落點位置看似隨著動態開口的行為而流動，產生具有裝飾性的空間感知，「提供視景」讓空間可以和另一空間相通連，達到通透性的空間感知，若是改變視景框的位置與範圍，可以產生具有可變性的空間感知，「傳遞訊息」的功能因子讓開口可接收到環境或使用者的行為的訊息，改變開口自身形態並做出相對應的回饋，同時將欲表達的訊息反應在開口的表現行為上。

構成因子方面，「材料堆疊」的構成因子將材料單元相互堆疊產生開口，或是利用單元本身的開口形式重複堆疊之後造就具有複雜圖紋的開口牆面，產生具有裝飾性的空間感知，「混凝土構築」利用混凝土材料本身的可塑性，產生足以讓光線充分散佈於空間中的開口路徑，或是安排開口的位置，導引光線進入空間的路徑，讓光線可以在空間中遊走，建立具有通透性的空間感知，「互動組件」的構成因子可以改變開口的行為，藉由開口的動態行為，營造具有方向性的空間感知，且採用互動技術建立之開口，可操控開口產生動態行為，建立可變性的空間感知。

形式因子方面，「方向性質」的形式因子讓開口本身及具有明確的方向性，且經過光線的投射後，在空間產生具有指向性的光束，形成具有方向性的空間感知，「視覺比例」的形式因子控制開口佔牆面的比例，決定光線可嚙以進入空間中的量值，當開口大到一定的程度，可以建立具有通透性的空間感知，「單元重複」的形式因子將相同或相似的開口單元重複排列，讓開口在牆面上密集分布，當光線穿過這些開口單元，在空間中產生繁複的圖紋意象，形成具有裝飾性的空間感知，「動態呈現」的形式因子藉由開口自身的動態行為，改變開口呈現出的視覺形式，造成具有可變性的空間感知。

將上述的結果整理成表 13，歸納出影響各個空間感知的主要開口因子，並以此為基準，利用這些開口因子進行開口設計，架構出空間感知。

空間感知	功能因子	構成因子	形式因子
方向性	引入光線 (指引)	互動組件	方向性質
通透性	引入光線 (照明)、提供視景	混凝土構築	視覺比例
裝飾性	引入光線 (圖紋)	材料堆疊、數位構築	單元重複
可變性	引入光線 (流動)、提供視景、傳遞訊息	互動組件	動態呈現

表13 架構空間感知且具有非數位與數位空間特性之主要開口因子。

第五章 設計實作

本章節進行參數式開口的設計實作，將第四章所整理出的能夠影響空間感知形成之開口因子納入設計條件中，藉由參數控制開口生成規律或運用演算法自動化生成開口規則，運用現代技術可創造更多可能的開口表現，在實行開口設計前，先簡單介紹 L-system, Voronoi, Cellular automata 這三種當前流行的演算法規則，觀察演算法各自的生成規則與圖形結構的特性，使用 3D 繪圖軟體 Rhino 和參數式設計工具 Grasshopper 操作參數和數學演算法，演練自動化生成的動態節點編輯模式，將之實際運用於具有非數位與數位空間特性之主要開口因子的牆面開口設計，並檢視設計實作之開口是否能達到指定之空間感知的形成。

5.1 演算法(algorithm)

以下分別介紹 L-system, Voronoi diagram, Cellular automata 這三種現今廣泛用於設計領域的演算法與其生成規則，運用這三種演算法的生成規則與其圖形特徵，協助我們進行開口設計並建立空間感知。

5.1.1 L-system(Lindenmayer system)

L-system 是一個 string rewriting system(SRS) 可以生成碎形的圖形結構，名稱來自於其開發者 Aristid Lindenmayer。L-Systems 的每項規則各有其特性，其語言可以生成複雜地圖形又各有其微妙的變化，最初應用於模擬植物的生長情形，後來有將其應用於生成碎形或是複雜的幾何設計，使用 L-Systems 的語法來捕捉其發展過程，是可視化的圖形結構(Prusinkiewicz & Lindenmayer, 1991)。表 15 列舉出可應用於開口設計的 L-system 規則生成的圖形結構。

在 Gasshopper 中的 L-systems 字元的代表意義：

F：向前移動距離 L，畫一條線

f：向前移動距離 L，不畫線

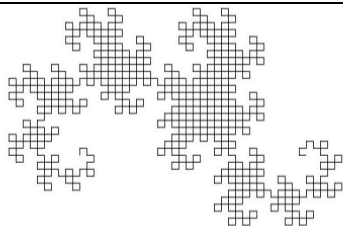

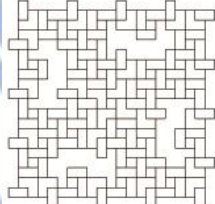
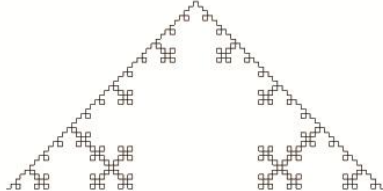
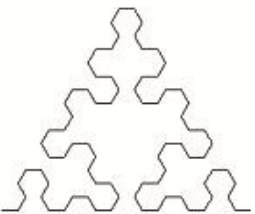
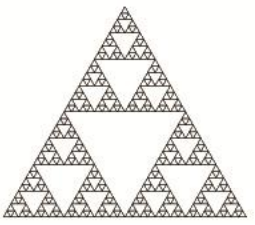
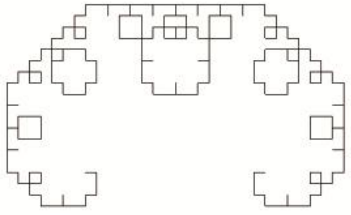
+：向右轉角度 A

-：向左轉角度 A

[：分支起點

]：分支終點

X/Y/Z..：代數

名稱	變數	常數	起始值	生成規則	角度	圖形結構
Dragon Curve	X Y	F + -	FX	X= X+YF Y= FX-Y	90°	
Branching	X	F + - []	X	X= F-[[X]+X]+F+[FX]-X F = FF	25°	
Tiling	X	F + -	X	X=F+F+F+F F=FF+F-F+F+FF	90°	
Koch Curve		F + -	F	F=F+F-F-F+F	90°	
Sierpinski Triangle	X Y Z	F + -	FX	F=Z X=+FY-FX-FY+ Y=-FX+FY+FX-	60°	
Sierpinski Gasket		F + -	F+F+F	F=F+F-F-F+F	120°	
Lévy C curve		F + -	F	F=+F--F+	45°	

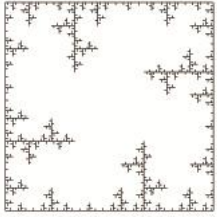
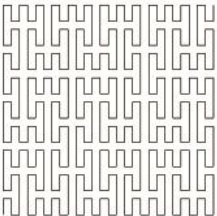
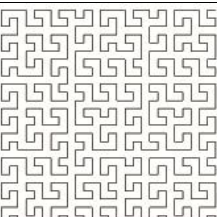
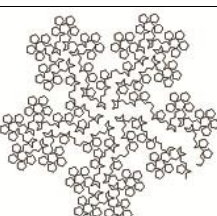
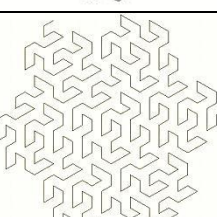
Fractal crystal	X	F +	X	X=F+F+F+F F=FF+F++F+F	90°	
Hilbert curve (1)	X	F + -	XY	X=XFYFX-F-YFX FY+F+XFYFX Y=YFXFY+F+XF YFX-F-YFXFY	90°	
Hilbert curve (2)	X	F + -	XY	X=XF+YFY+FX-F -XFXFX-FYFY+ Y=-XFXF+YFYFY +F+YF-XFX-FY	90°	
Pentagram		F + -	F-F-F-F-F	F=F-F++F+F-F-F	70°	
Peano Gosper curve	X	F + -	X	F=F X=X+YF++YF-FX --FXFX-YF+ Y=-FX+YFYF++Y F+FX--FX-Y	60°	

表14 L-system 的演算法生成規則與圖形結構。

5.1.2 Voronoi Diagram

Voronoi Diagram(Voronoi tessellation, Voronoi decomposition, Dirichlet tessellation)是一種多用途的幾何結構，可以應用於物理、天文、機器人技術或其他許多領域(De Berg, Cheong., & Van Kreveld, 2008; Reem, 2011)。

Voronoi diagram 可以用來演繹自然界的過程，其有趣且令人驚奇的數學性質，許多研究者相信 Voronoi diagram 是由離散點集定義的最根本的結構之一。圖 60 顯示 Voronoi diagram 的生成方式，在平面 S 上設置許多點 p，稱之為 site，設定一個點為查詢點(query point)q，找到與 q 最近的 p，並建立兩點之間的中垂線，中垂線相交產生 v(Voronoi vertices)，中垂線即為分界線，互相鄰近的點 p，以中垂線劃分範圍(region)，Voronoi Diagram 是分界線組成的集合(Aurenhammer, 1991; Zimmer, 2005)。

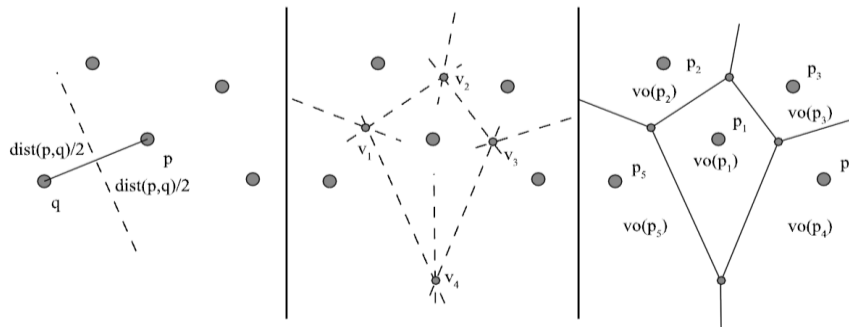


圖 60 二維的 Voronoi diagram 生成過程。左：虛線代表 p 和 q 的中垂線，中：產生中垂線的交點 v，右：將 v 相連接，產生 Voronoi diagram 的圖形結構(Zimmer, 2005)。

演算法幫助我們可以快速有效地建立 Voronoi diagram，在平面上輸入點集，即可輸出 Voronoi diagram 的圖形結構（圖 61）。

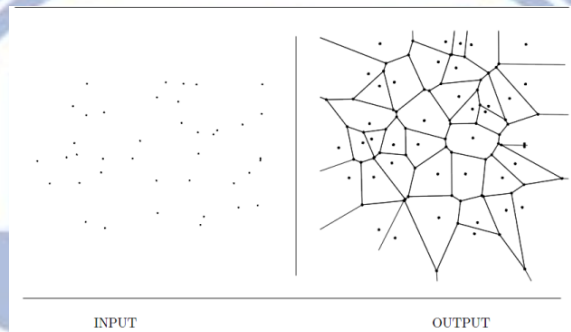


圖 61 輸入點集 P_1, \dots ，產生 Voronoi Diagram，平面 S 被分解成多個區域 q，包圍著最近點 P_i (Skiena, 1998)。

運用 Voronoi Diagram 特殊的圖形結構，可以輔助我們進行適應於空間感知需求的開口設計。

5.1.3 Cellular Automata

細胞自動機(Cellular Automata)最初由數學家 Stanislaw M. Ulam 與 John von Neumann 所提出(Krawczyk, 2002)，在型態表現上，細胞自動機是一個離散型的動力系統(Discrete Dynamical Systems)，細胞自動機系統的數學模型中，許多細胞同時動作，以產生複雜的行為模式(Packard & Wolfram, 1985)。一些特定規則的格子組成的同質陣列(homogenous array)，在每個格子上的離散變量(discrete variable)視為一個細胞(cell)，每一個細胞可以具有一些狀態，由細胞所在的變量來指定，但是在某一時刻只能處一種狀態之中。隨著迭代的過程，格子上的每一個細胞受到相鄰細胞的影響，依據相同的法則而改變狀態，意即，一個細胞的狀態是由上一個時刻(time step)相鄰細胞的狀態所決定，在設定好細胞自動機初始狀態之後，細胞便按照同一個規則做演化(Gács, 2001; Griswold 2002; Wolfram, 1983)，藉由設定細胞自動機的初始狀態和規則，確立細胞自動機的生成結構。

圖 62 顯示細胞自動機可以具有多種維度（一維、二維、三維.....），最簡單的細胞自動機

類型是初等細胞自動機(elementary cellular automaton)·屬於一維的細胞自動機·初等細胞自動機的細胞單元有兩個可能的狀態：死亡(0)或存活(1)·每個細胞單元的規則取決於相鄰左右兩個單元的值·一個指定的細胞(本體)與相鄰的兩個細胞皆可以被設定可能的二進制(0或1)狀態·依據定義的規則與相鄰的值來確定演化生成的模式·迭代後的本體細胞則為上一代相鄰的兩個細胞的總和·圖 63 顯示一個 8 位元的初等細胞自動機的生成規則(Wolfram, 1983)·在此圖中·上面那一行顯示本體細胞與兩個相鄰細胞的狀態·下面那一行是初等細胞自動機的生成規則·以此規則定義本體細胞在某狀態下·於下一代的狀態為死亡或存活·這樣的初等細胞自動機會有 $2^8 = 256$ 種可能(圖 64)

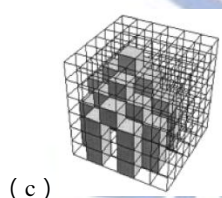
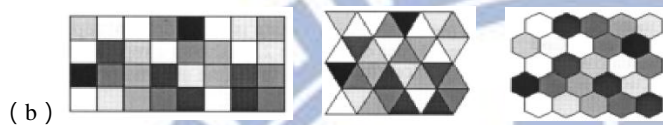


圖 62 細胞自動機的幾何結構(Griswold, 2002)：(a) 一維。(b) 二維。(c) 三維。

1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0
0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0

圖 63 設置初等細胞自動機的初始規則(Wolfram, 1983)。

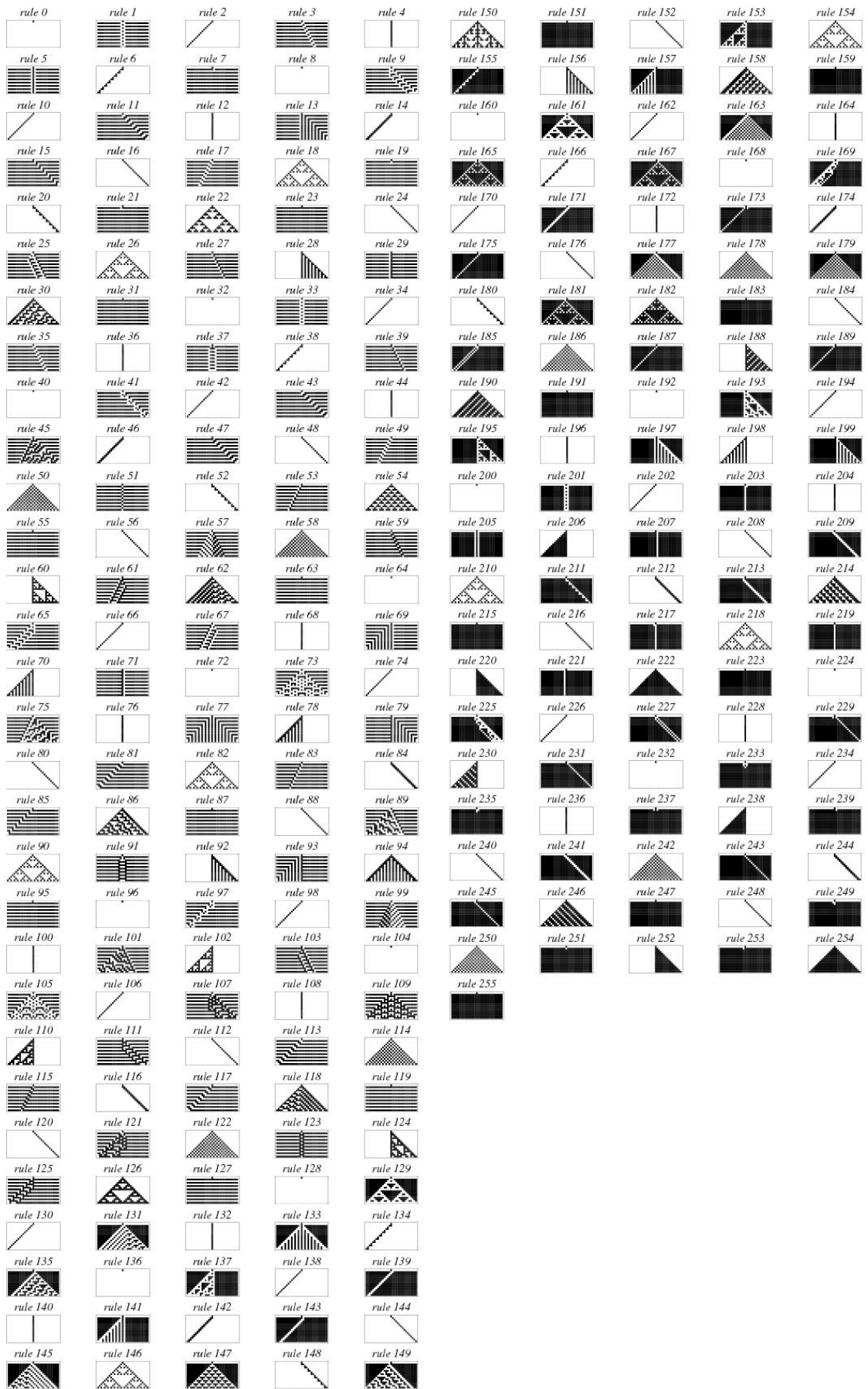


圖 64 初等細胞自動機的 256 種可能(<http://mathworld.wolfram.com/ElementaryCellularAutomaton.html>)。

檢視初等細胞自動機生成的圖形結構，選擇相對應的生成規則（圖 65），可以將其應用於開口設計中。

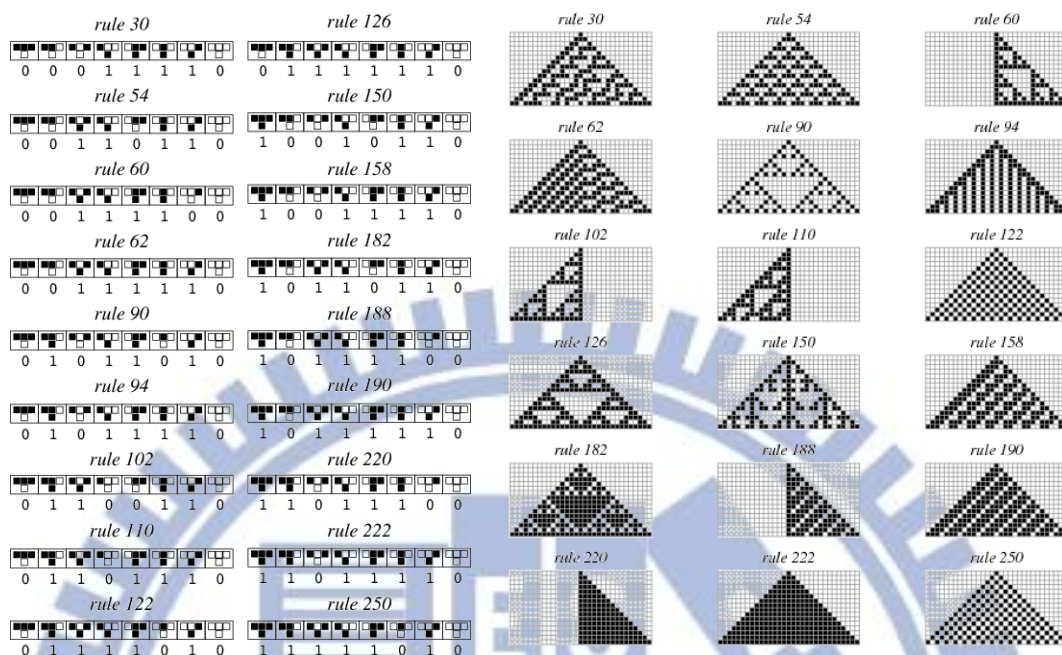


圖 65 初等細胞自動機的生成規則與圖形結構(rule 30, 54, 62, 90, 94, 102, 110, 122, 126, 150, 158, 182, 188, 190, 220, 222, 250)(<http://mathworld.wolfram.com/ElementaryCellularAutomaton.html>)

圖 66 顯示 five-neighbor square 與 nine-neighbor square 的二維細胞自動機的圖形結構，在中心位址（本體）的細胞，其演化後的值為所有相鄰細胞值的總和(Packard & Wolfram, 1985)，細胞可能具有兩種狀態，存活(Survival)或死亡(Death)，即 1(true)或 0(false)，而影響這些細胞生死的規則可分為兩種，誕生規則(Born rule)與存活規則(Survive rule)，以 nine-neighbor square 為例，誕生規則適用於死細胞，其設定為，當本體細胞為死細胞，而相鄰的八個細胞有 N 個存活時，則本體細胞經運算後於下一代時誕生，存活規則只適用於活細胞，其設定為，當本體細胞為活細胞，其相鄰的八個細胞有 N 個為活時，則本體在運算後於下一代時維持活狀態，將此規則應用於不同的網格結構中，會產生多種可能（圖 67）。



圖 66 (a) five-neighbor square (b) nine-neighbor square(Packard & Wolfram, 1985)

Rule type	5-neighbor square	9-neighbor square	Hexagonal
General	$2^{32} \approx 4 \times 10^9$	$2^{512} \approx 10^{154}$	$2^{128} \approx 3 \times 10^{38}$
Rotationally symmetric	$2^{12} = 4096$	$2^{140} \approx 10^{42}$	$2^{64} \approx 2 \times 10^{19}$
Reflection symmetric	$2^{24} \approx 2 \times 10^7$	$2^{288} \approx 5 \times 10^{86}$	$2^{80} \approx 10^{24}$
Completely symmetric	$2^{12} = 4096$	$2^{102} \approx 5 \times 10^{30}$	$2^{74} \approx 2 \times 10^{22}$
Outer totalistic	$2^{10} = 1024$	$2^{18} \approx 3 \times 10^5$	$2^{28} \approx 3 \times 10^8$
Totalistic	$2^5 = 32$	$2^9 = 512$	$2^7 = 128$

圖 67 二維細胞自動機在不同的網格結構中，經過演化過程，可能產生多種結果。

5.2 參數式開口設計

依據方向性、通透性、裝飾性和可變性這四項空間感知所需之開口因子，作為設計開口的條件，理解演算法(L-system, Voronoi diagram, Cellular automata)的操作規則，運用參數控制開口形式並以演算法設計開口模組或控制開口動態，觀察演算法生成之圖形結構，將之運用於開口設計當中，並找出開口具備的開口因子和空間感知。運用 L-system 的重寫規則生成複雜圖形，作為設計開口的雛形，Voronoi diagram 演算法可藉由操縱控制點的分布情形來改變開口的型態表徵，Cellular automata 演算法控制本體與周圍的關係，衍生不可預知的變動性，參照表 13 中架構空間感知的主要開口因子，針對各個開口因子，運用不同演算法的特性進行開口設計，找出具備空間感知之開口設計模式並討論演算法生成開口對於空間感知的影響。討論參數化開口所具備的開口因子，如表 13 所述：

空間感知	功能因子	構成因子	形式因子
方向性	引入光線 (指引)	互動組件	方向性質
通透性	引入光線 (照明)、提供視景	混凝土構築	視覺比例
裝飾性	引入光線 (圖紋)	材料堆疊、數位構築	單元重複
可變性	引入光線 (流動)、提供視景、傳遞訊息	互動組件	動態呈現

表 13 架構空間感知且具有非數位與數位空間特性之主要開口因子。

5.2.1 方向性

由表 13 可知，可建立「方向性」之開口因子：(1) 引入光線、(2) 互動組件、(3) 方向性質。當開口將光線引入室內空間，光線牽引著人們的目光，使人不自覺地趨向光線的方向，或是限制人們的視覺動線，「引入光線」的開口因子讓開口具有明確的指向性，導引人們的目光或是指引人們的行進方向，光線透過開口的形式的「方向性質」在空間中產生水平、垂直或是傾斜方向的光影變化，「互動組件」可控制開口產生具有方向性的指標，以下藉由運用可建立「方向性」之開口因子，針對空間感知的方向性進行開口設計。

(1) 引入光線 (功能因子) -指引

演算法：Voronoi Diagram

此設計利用「引入光線」的指引功能，來建立具有「方向性」的空間感知，當開口為水平方向及垂直方向時的開口時，光線在室內空間中產生的光影變化，也具有明確的指向性，可以導引人們的行動，牽引人們的目光，採用 Voronoi Diagram 演算法建立開口結構，安排點數與點的位置，讓控制點分布為水平點序和垂直點序，當光線進入室內空間時，投射於室內牆面上的條狀光斑具有非常明確的方向 (圖 68)，水平方向開口在牆面上及天花板上形成水平條狀的光斑，垂直方向開口則在地面上產生垂直方向的條狀光斑，指引人們往開口的方向移動。

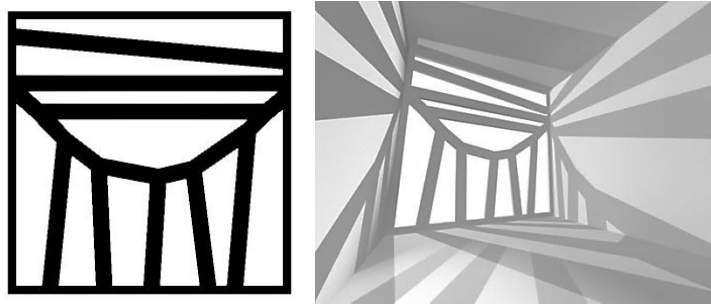


圖 68 安排控制點的點序，產生水平方向與垂直方向的開口，產生具有指向性的光影，產生具有「方向性」的空間感知。

圖 69 為運用 Grasshopper 參數式設計工具進行開口設計的操作程序，採用 Voronoi Diagram 演算法生成開口，讓 Voronoi 的圖形結構限制在牆面的範圍內（圖 70），控制開口的點序為水平和垂直（圖 71），以此建立 Voronoi Diagram 的圖形結構，生成開口（圖 72）。



圖 69 Grasshopper 開口設計過程：Voronoi Diagram。

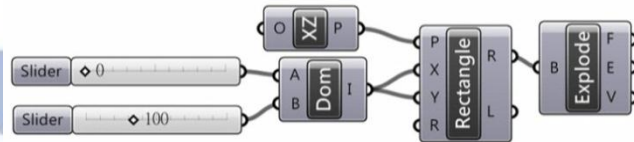


圖 70 A 部分 Grasshopper 內容：設定牆面範圍。

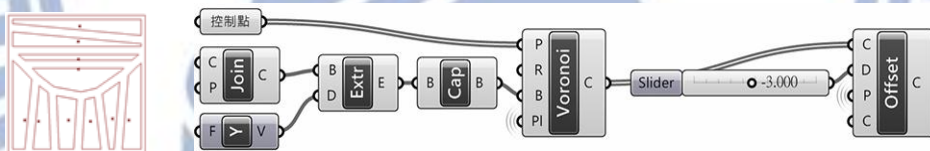


圖 71 B 部分 Grasshopper 內容：安排控制點的分布情形，建立 Voronoi 圖形結構。

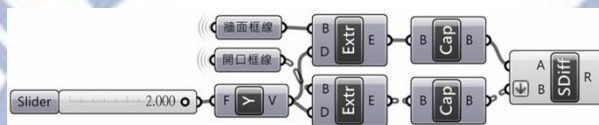


圖 72 C 部分 Grasshopper 內容：生成 Voronoi 開口結構。

(2) 互動組件（構成因子）

演算法：Cellular automata(rule 3：00000011)

此設計採用「互動組件」的構成因子來建立具有「方向性」的空間感知，參考 Marilena Skavara 的 adaptive fa[CA]de 的構成方式（圖 73），讓原本是水平法線方向的開口元件向上翻轉成垂直法線方向產生開口，以感測器偵測使用者的位置，當使用者開始移動，互動組件也會驅動開口向上翻轉，產生開口像是恰好跟著使用者一起進行水平方向的移動的意象，使用一維的 elementary cellular automaton 演算規則來輔助進行開口設計，觀察圖 64 初等細胞自動機的 256

種可能的圖形，找出適合應用於此設計的生成規則(rule3：00000011) (圖 74)，選擇不同的初始細胞，便會產生在水平位置上移動的動態感(圖 75)，藉由開口的動態變化，產生具有「方向性」的空間感知。

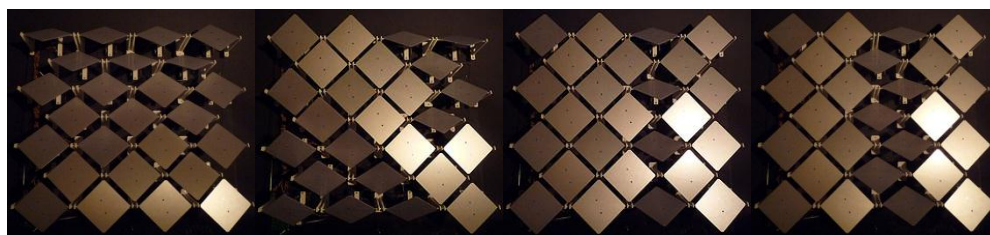


圖 73 以互動組件建立開口之構成方式(Marilena Skavara/ adaptive fa[CA]de, 英國倫敦, 2010)。



圖 74 經由 elementary cellular automaton(rule 3：00000011)的演化過程可得到的圖形。

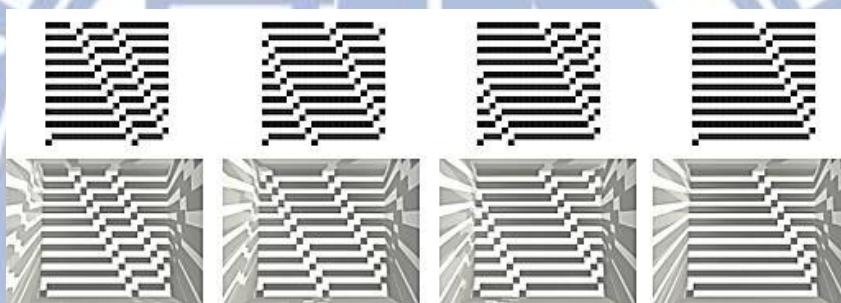


圖 75 利用初等細胞自動機生成的圖形結構，呼應使用者的行為模式，讓開口像是在水平方向上移動，產生具有方向性的空間感知。

圖 76 顯示以 Grasshopper 參數式設計工具設計開口的思考架構，選用 Cellular automata 作為此設計採用的演算法，設定初等細胞自動機的生成規則：rule 3 (圖 77)，選擇初始細胞並定義其初始狀態為活狀態 (圖 78)，指定演化的時間，開始進行細胞自動機的演化，生成開口結構 (圖 79)，選擇不同的細胞為初始細胞，便會產生如圖 74 的演化結果。

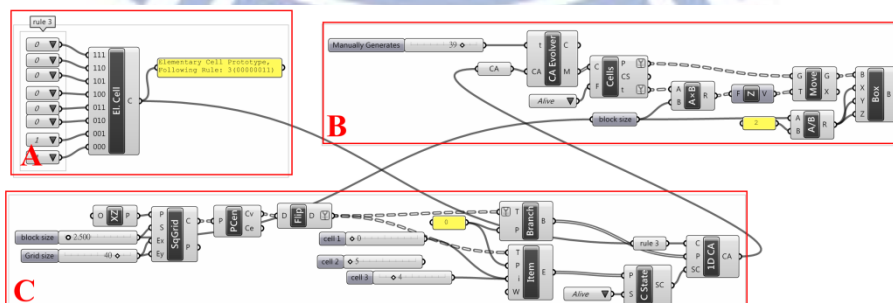


圖 76 Grasshopper 開口設計過程：Cellular automata。

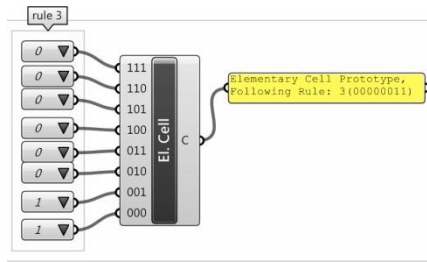


圖 77 A 部分 Grasshopper 內容：設定 Cellular automata 的生成規則-- rule 3。

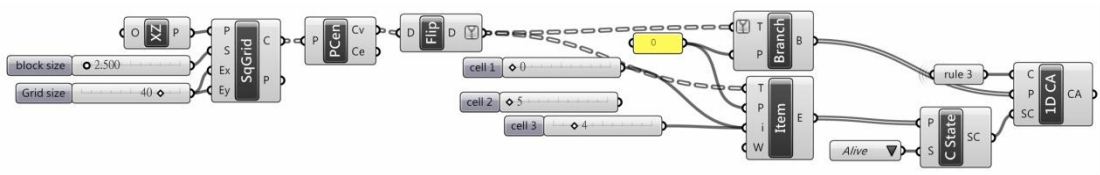


圖 78 B 部分 Grasshopper 內容：選取欲定義的細胞。

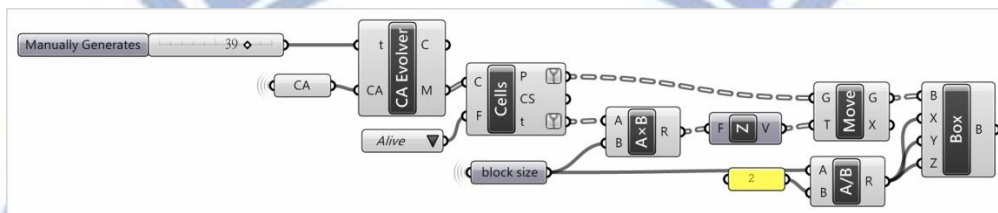


圖 79 C 部分 Grasshopper 內容：生成 Cellular automata 開口結構。

(3) 方向性質 (形式因子)

演算法：L-system - Hilbert curve(1)

此開口設計以開口本身的「方向性質」來建立具有「方向感」的空間感知，從表 14 以 L-system 演算法生成的範例圖形中挑選 Hilbert curve 的圖形結構來操作開口設計，修改其生成規則，產生符合「方向性質」的圖形結構，圖 80 顯示當開口為水平方向及垂直方向時的圖形結構與光線通過開口在室內空間中產生光影變化，水平方向開口在牆面上形成條狀的光斑，垂直方向開口則在地面上產生條狀光斑，不僅是開口本身具有方向性質，這些光線亦在空間中產生明確的指向性。

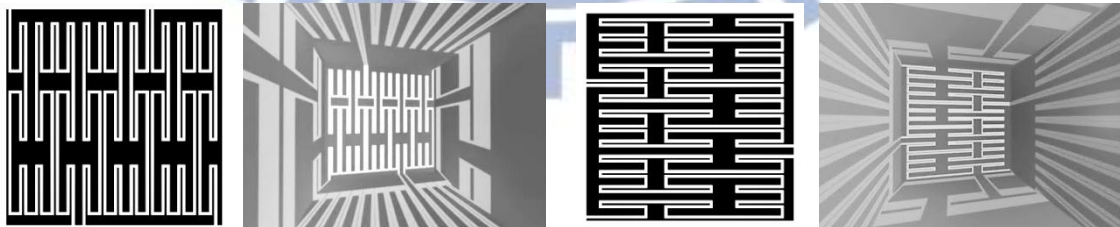


圖 80 利用本身圖形即為方向性的圖形結構產生有方向性的空間感知。

圖 81 顯示以 Grasshopper 參數式設計工具設計開口的思考架構，參照 Hilbert curve 的生成規則，將規則修改成可應用於此次設計的開口圖形規則 (圖 82)，通過 L-system 演算法生成圖形，限定開口所在牆面的範圍，並將修改過的 Hilbert curve(1)圖形投影到牆面上 (圖 83)，將牆面與 Hilbert curve(1)圖形作差集的布林運算後生成開口 (圖 84)。



圖 81 Grasshopper 開口設計過程：L-system - Hilbert curve(1)。

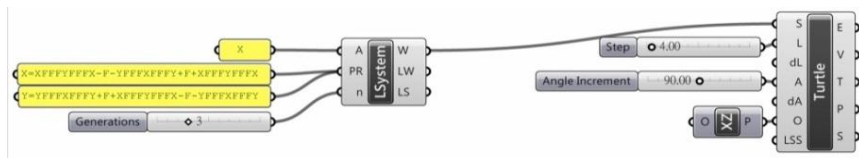


圖 82 A 部分 Grasshopper 內容：設定 L-systems 的生成規則。

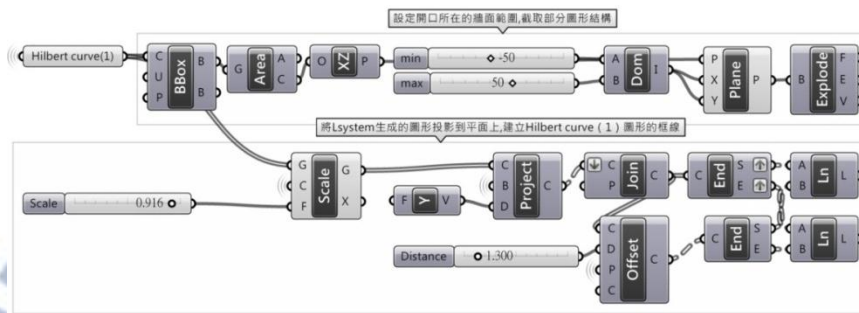


圖 83 B、C 部分 Grasshopper 內容：設定牆面範圍，將 L-systems 的圖形結構投影到牆面上。

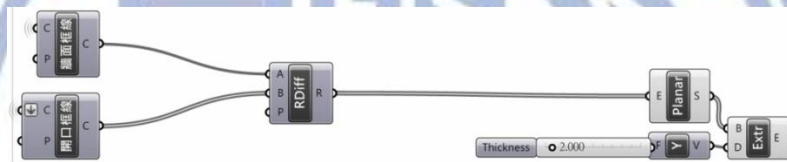


圖 84 D 部分 Grasshopper 內容：運用布林運算產生開口。

5.2.2 通透性

由表 13 可知，可建立「通透性」之開口因子：(1) 引入光線、(2) 提供視景、(3) 混凝土構築+視覺比例。充足的光線可以使空間明亮，光線充盈於空間之中，室內與室外空間有高度地連結性，利用混凝土構築可任意塑形的特點，讓光線自然的充盈於空間之中，或是空間具有佔據牆面比例較大的開口，造就空間的開放性質，在光線的穿透下，顯現明亮輕快的「通透性」。

(1) 引入光線 (功能因子) - 照明

演算法：Voronoi Diagram

此設計採用引入光線的照明功能來營造空間感知的通透性，引入光線最主要的目的便是提供室內照明，為了不讓太複雜的開口造型阻擋光線通過的路徑，採用 Voronoi Diagram 的演算法生成隨意的框架，將線條靠近牆面框架的邊緣，建立開口型態，開放的開口使內空間可以得到充分的照明，造成通透性的空間感知。



圖 85 開放的開口可以使光線大量進入室內，使室內空間獲得充足地照明，建立「通透性」的空間感知。

圖 86 顯示以 Voronoi Diagram 的演算法操作開口設計的程序，設定牆面範圍（圖 87），以限定開口框架線條的區域，提取牆體邊界上的點作為 Voronoi Diagram 的控制點，產生開口結構（圖 88）。

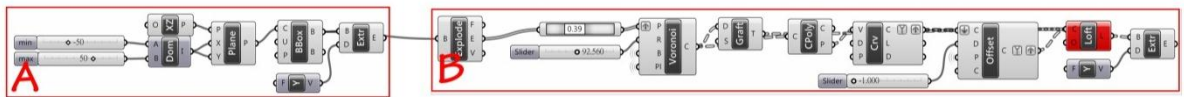


圖 86 Grasshopper 開口設計程序：Voronoi Diagram。

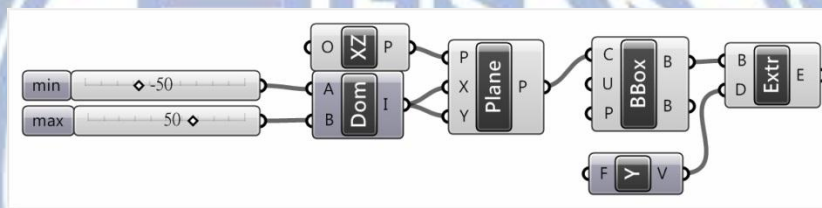


圖 87 A 部分 Grasshopper 內容：設定牆面範圍。

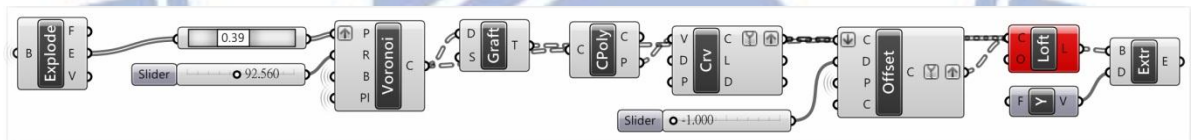


圖 88 B 部分 Grasshopper 內容：安排控制點的分布情形，建立 Voronoi 圖形結構。

(2) 提供視景（功能因子）

演算法：L-system – Branching

開口讓內部空間得以和外部空間產生連結，視景框的大小決定空間與外界連結程度，此設計以「提供視景」的功能因子來建立空間感知的「通透性」，以 Branching 的圖形結構線段作為劃分視景的框線，調整角度使之生成簡單的水平垂直線條，分別產生出不同的視景範圍（圖 90），將框線調到極細，好似不存在一般，人們可以與外界的事物相連結，模糊室內與室外的分界，藉由「提供視景」的開口因子，產生具有「通透性」的空間感知。

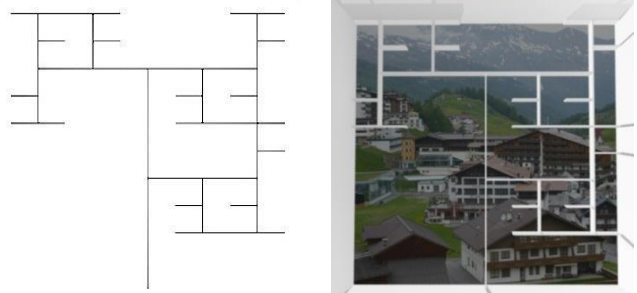


圖 89 視景框的大小決定空間與外界連結程度，模糊室內與室外的分界，運用「提供視景」的開口因子塑造具有「通透性」的空間感知。

圖 91 顯示以 Grasshopper 參數式設計工具產生開口的設計過程，選用 Branching 的生成規則，修改角度參數（圖 92）產生可適用於開口設計的 Branching 圖形，作為開口的基本形態，並將圖形投影到牆面上，建立 Branching 圖形的開口結構（圖 93）。

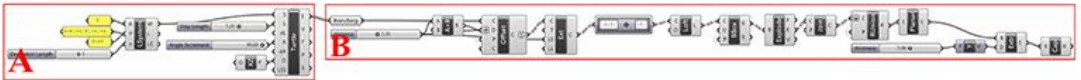


圖 90 Grasshopper 開口設計過程：L-systems-Branching。

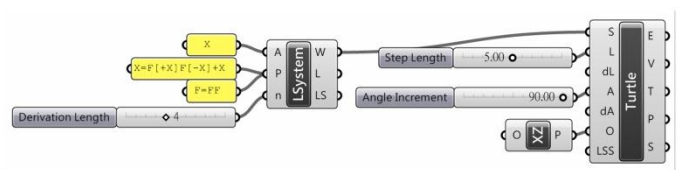


圖 91 A 部分 Grasshopper 內容：設定 L-systems 的生成規則。

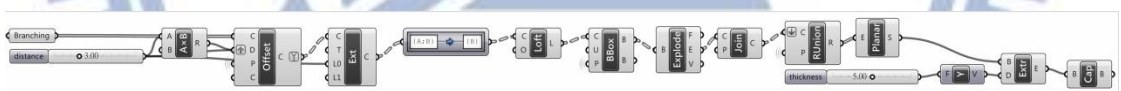


圖 92 B 部分 Grasshopper 內容：建立 Branching 圖形的開口結構。

(3) 混凝土構築（構成因子）+ 視覺比例（形式因子）

演算法：Cellular Automata

「混凝土構築」構成因子，利用混凝土可塑性高的材料特性，可以塑造各種開口表現，建立適合光線發散的開口路徑，或是安排開口的位置，導引光線進入空間的路徑，讓光線可以在空間中遊走，使內部空間明亮，造就具有「通透性」的空間感知。開口在牆面上所佔的「視覺比例」，決定空間的私密程度，要建立具有「通透性」的空間感知，開口必須要有一定的開放程度，參考由建築師妹島和世設計的 Zollverein School of management and design 的構成方式（圖 93），採用一維的 elementary cellular automaton 進行開口設計，觀察圖 64 初等細胞自動機的 256 種可能的圖形，找出適合的生成規則進行開口設計，選擇 rule 126，其規則為 01111110（圖 94），作為本次設計採用的演算法規則，藉由 rule 126 生成的圖形特徵，可建立或大或小的開口結構（圖 95），在視覺比例上，開放的開口可以建立具有「通透性」的空間感知。



圖 93 以混凝土構築建立開口之構成方式(Zollverein School of management and design, 德國埃森, 2006)

rule 126

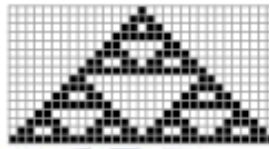


圖 94 經由 elementary cellular automaton(rule 126 : 01111110)的演化過程可得到的圖形。



圖 95 開口在牆面上所佔的「視覺比例」，決定空間的私密程度，開放的開口可以建立具有「通透性」的空間感知。

圖 96 顯示以 Grasshopper 參數式設計工具設計開口的思考架構，選用 Cellular automata 作為此設計採用的演算法，設定初等細胞自動機的生成規則：rule 126 (圖 97)，選擇初始細胞並定義其初始狀態為活狀態 (圖 98)，指定演化的時間，開始進行細胞自動機的演化，生成開口結構 (圖 99)，選擇不同的細胞為初始細胞，會產生不同的圖形結構，挑選適合產生「通透性」的圖形結構，並將小於指定面積的開口填滿，只留下大的開口，便可得到如圖 94 的開口。

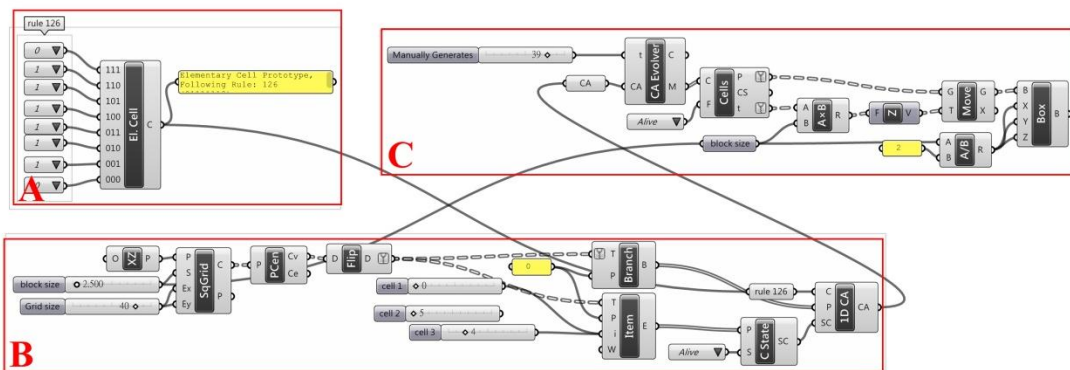


圖 96 Grasshopper 開口設計過程：Cellular automata。

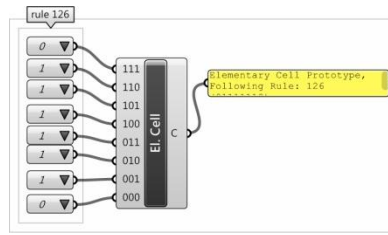


圖 97 A 部分 Grasshopper 內容：設定 Cellular automata 的生成規則(rule 126：01111110)。

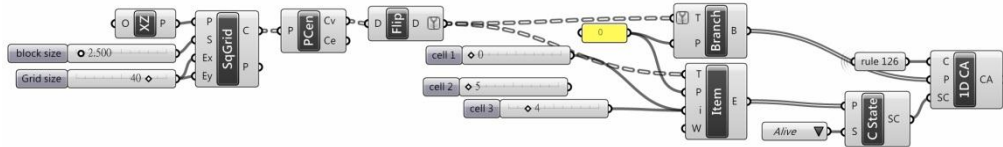


圖 98 B 部分 Grasshopper 內容：選取欲定義的細胞。

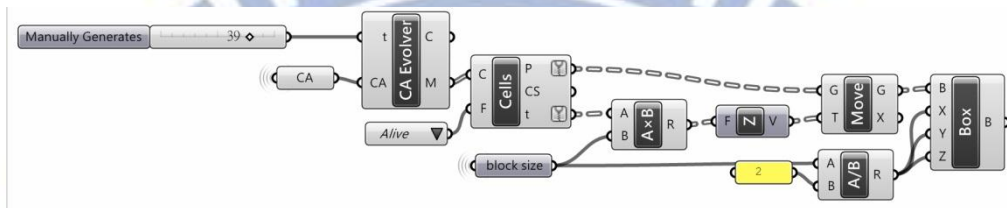


圖 99 C 部分 Grasshopper 內容：生成 Cellular automata 開口結構。

5.2.3 裝飾性

由表 13 可知，可建立裝飾性之開口因子：(1) 引入光線、(2) 材料堆疊、(3) 數位構築、(4) 單元重複。光線通過開口，同時也在牆面或地面上產生光影，改變材料的堆疊方式，可以產生不同形式的開口單元，數位構築技術複雜的開口形式更容易被製造，光線穿過不斷重複的開口單元，在視覺上造成衝擊，使用「裝飾性」的開口因子，協助我們在空間中塑造「裝飾性」的空間特質。

(1) 引入光線 (功能因子) - 圖紋

演算法：L-system - Dragon Curve

光線可以強調開口型態的圖紋的特性，當光線通過開口時亦會強化開口本身複雜的圖紋，同時在地面、牆面上產生的功能因子來建立空間感知的「裝飾性」，利用 L-system 演算法規則生成 Dragon Curve 的圖紋，當光線穿透開口，凸顯開口複雜的形體特徵，產生特殊的圖紋，提供觀者獨特的視覺印象 (圖 100)，同時，開口「引入光線」進入空間中，開口的形式表徵被轉印在地面和周圍牆體上，產生光影的趣味性，塑造空間的「裝飾性」。

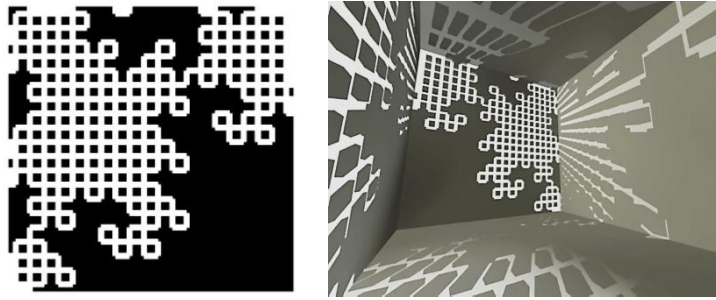


圖 100 運用「引入光線」的開口因子塑造具有「裝飾性」的空間感知。

圖 101 顯示以 Grasshopper 參數式設計工具產生開口的設計過程，設定 Dragon Curve 的生成規則 (圖 102，選取 Dragon Curve 的部分圖形，作為開口的基本形態，建立 Dragon Curve 圖形的框線 (圖 103)，將牆面框線與 Dragon Curve 框線作布林運算，產生開口形態 (圖 104)，使用「引入光線」的開口因子，顯現複雜開口形貌，形成具有「裝飾性」的空間感知。



圖 101 Grasshopper 開口設計過程：L-system - Dragon Curve。

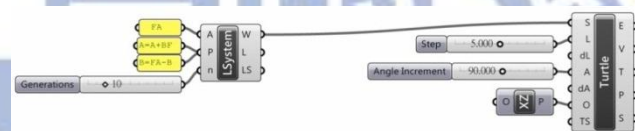


圖 102 A 部分 Grasshopper 內容：設定 L-systems 的生成規則。

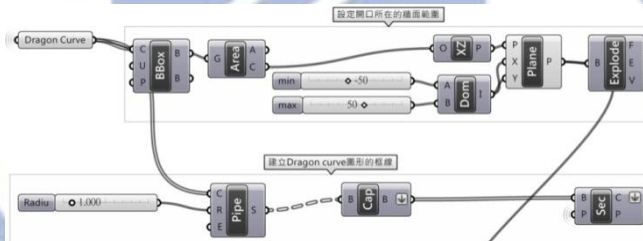


圖 103 B 部分 Grasshopper 內容：設定牆面範圍，建立 Dragon Curve 圖形的框線。

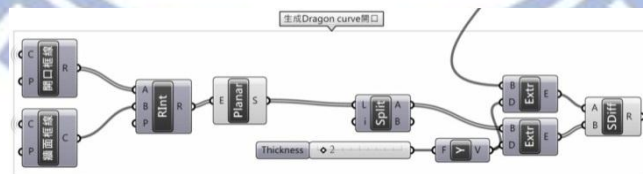


圖 104 C 部分 Grasshopper 內容：運用布林運算產生開口。

(2) 材料堆疊 (構成因子)

演算法：L-system—Tiling

此設計以「材料堆疊」功能因子來建立空間感知的「裝飾性」，採用 L-system 演算法規則生成 Tiling 的圖形結構 (圖 109)，是以固定的線段長度以水平或垂直的角度畫線，利用此特性建立單元體，採用材料堆疊的構成方式，圖 110 的堆疊方式是將材料單元切割成特殊的形狀，

在堆疊時，單元與單元之間的空白即為開口的型態，本設計是以長方體的單元材料以水平或垂直角度相互堆疊，自然產生單元與單元間的縫隙，以此縫隙作為光線通過的開口，在空間中產生趣味的光影現象，顯現複雜的開口形貌，形成具有「裝飾性」的空間感知。

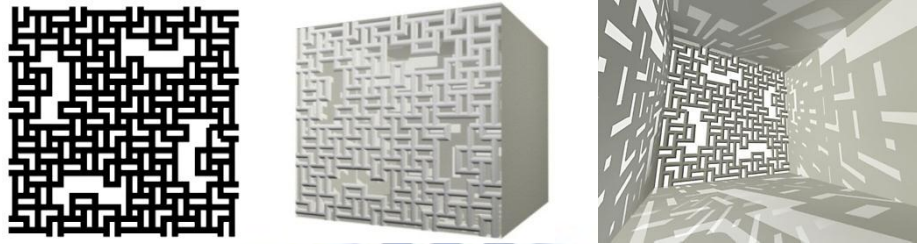


圖 105 運用「引入光線」的開口因子塑造具有「裝飾性」的空間感知。

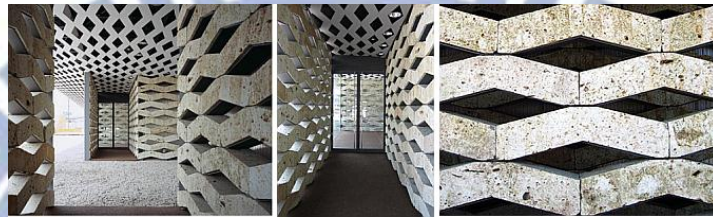


圖 106 以材料堆疊方式建立開口（隈研吾/Chokkura Plaza, 日本栃木, 2006）

圖 111 為建立 Tiling 開口的設計過程，設定 Tiling 的生成規則(圖 112)，限制牆面範圍，將 Tiling 投影到牆面上(圖 113)，生成 Pipe 單元體(圖 114)，單元與單元間的空隙即為光線可通過的開口。

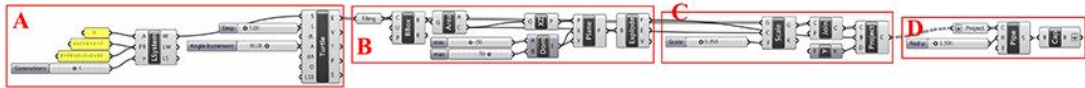


圖 107 Grasshopper 開口設計過程：L-system—Tiling。

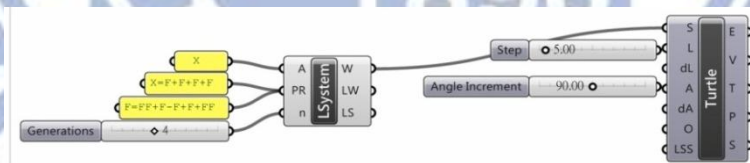


圖 108 A 部分 Grasshopper 內容：設定 L-systems 的生成規則。

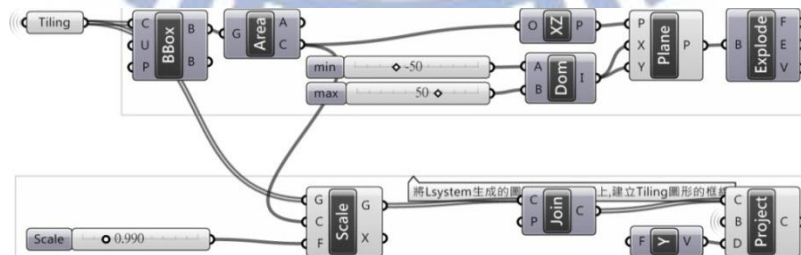


圖 109 B 部分 Grasshopper 內容：設定牆面範圍，將 Tiling 圖形投影到牆面上。



圖 110 C 部分 Grasshopper 內容：Pipe 產生開口。

(3) 數位構築 (構成因子)

演算法：Voronoi Diagram

此設計以「數位構築」方式來建立空間感知的「裝飾性」，數位構築方式輔助設計者建構複雜型態的開口設計，參考 Thom Faulders 設計的 AIRSPACE TOKYO (圖 111) 構築方式，使用電腦輔助設計與製作技術，分割出開口單元或是元件組合後產生開口。

採用 Voronoi Diagram 演算法規可以幫助我們建立複雜的開口型態則生成可運用於開口設計的圖形結構 (圖 85)，控制點的區域範圍代表開口開敞的部分。以傳統構築方式建造這類型的開口較難達成，運用數位構築的方式可以協助我們完成較複雜的開口結構 (圖 116)，並讓光線通過，在空間中產生繁複地光影變化，達成具有「裝飾性」的空間感知。

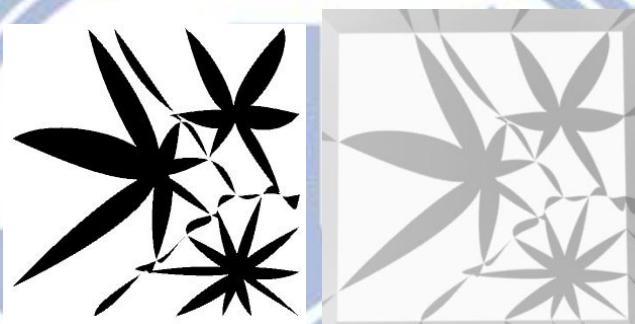


圖 111 運用「引入光線」的開口因子塑造具有「通透性」的空間感知。

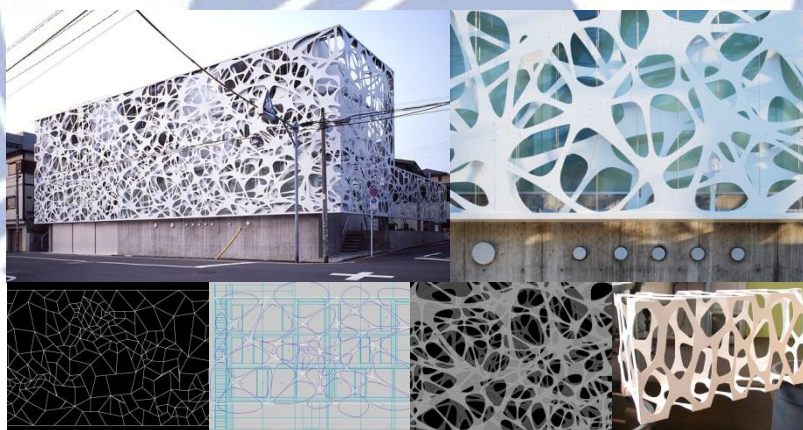


圖 112 數位構築方法(Thom Faulders/AIRSPACE TOKYO, 日本東京, 2007)

運用 Voronoi Diagram 演算法建立開口結構，操縱控制點的分布狀態，會產生各種不同的 Voronoi Diagram，圖 86 顯示使用 Voronoi Diagram 建立開口的操作程序，限定開口所在牆面的範圍 (圖 87)，在平面上建立三個不同半徑的圓，並將圓分段，分段點作為生成的控制點，藉由操縱分段點的數量與圓的移動向量 (圖 88)，改變 Voronoi Diagram 的圖形結構，找出適宜 Voronoi Diagram 生成開口 (圖 89)。

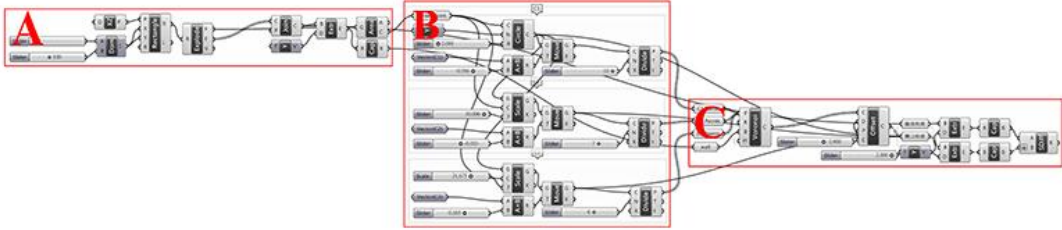


圖 113 Grasshopper 開口設計過程：Voronoi Diagram。

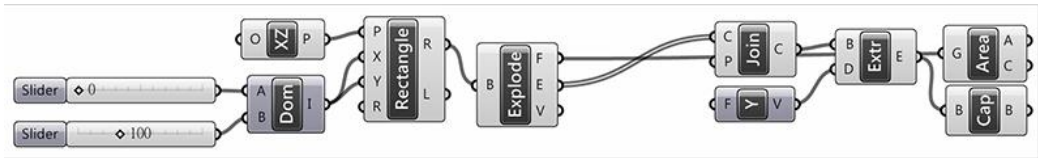


圖 114 A 部分 Grasshopper 內容：設定牆面範圍。

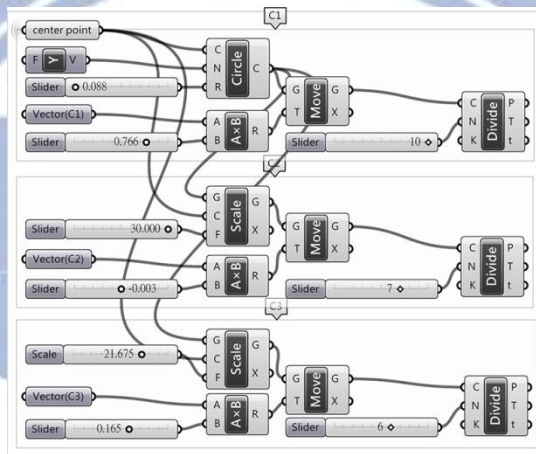


圖 115 B 部分 Grasshopper 內容：安排控制點的分布情形，建立 Voronoi 圖形結構。

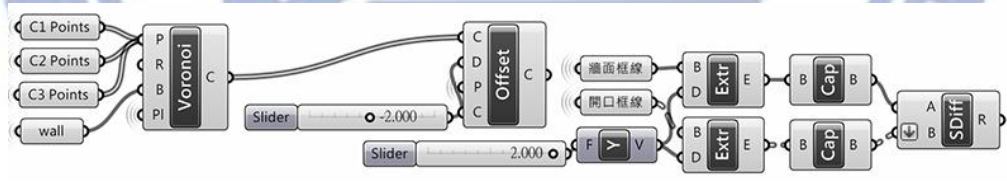


圖 116 C 部分 Grasshopper 內容：生成 Voronoi 開口結構。

(4) 單元重複 (形式因子)

演算法：L-system - Hilbert curve (2)

此設計以「單元重複」功能因子來建立空間感知的「裝飾性」，從表 14 中觀察到 L-system 是單元的重複生成，因此，採用 L-system 演算法 Hilbert curve (2) 圖形，產生重複且不斷迴轉的圖形結構，圖 121 顯示迴轉單元的初始狀態，紅點處為圖形的起點，當光線通過不斷迴轉地的開口進入室內空間中，開口複雜的形體特徵同時投影於空間中，開口的形式表徵被轉印在地面和周圍牆體上，產生光影的趣味性，使用「單元重複」的開口因子，構成不斷迴轉地開口形貌，塑造空間的「裝飾性」。

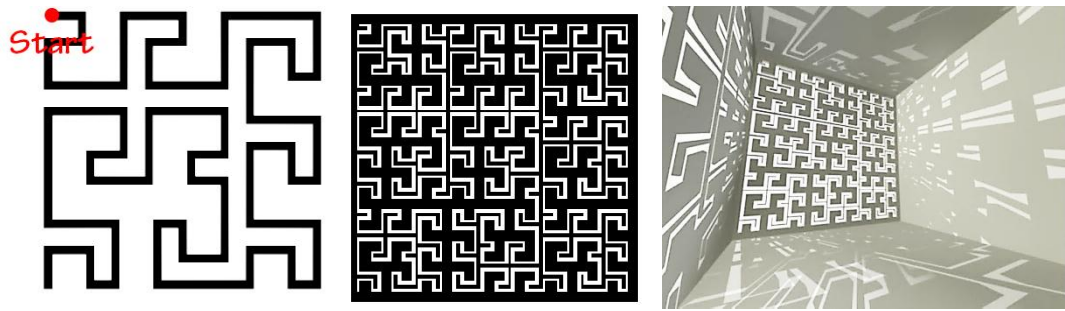


圖 117 繁複地圖形特徵因子塑造具有「裝飾性」的空間感知。

圖 122 顯示以 Grasshopper 參數式設計工具產生開口的設計過程，設定 Hilbert curve (2) 的生成規則 (圖 123)，設定牆面範圍，建立 Hilbert curve (2) 圖形的框線 (圖 124)，將牆面框線與 Hilbert curve (2) 框線作布林運算，產生開口形態 (圖 125)。



圖 118 Grasshopper 開口設計過程：L-system -Hilbert curve (2)。

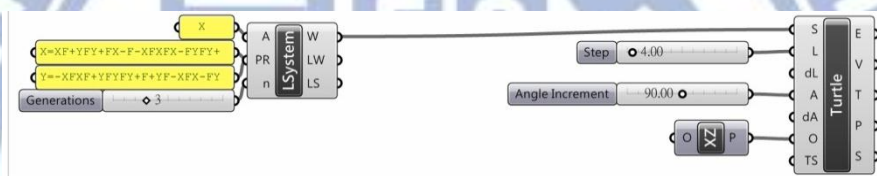


圖 119 A 部分 Grasshopper 內容：設定 L-systems 的生成規則。

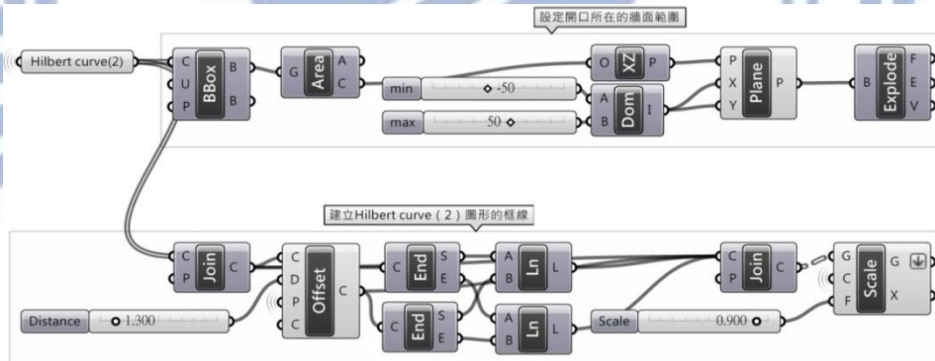


圖 120 B、C 部分 Grasshopper 內容：設定牆面範圍；建立 Hilbert curve (2) 圖形的框線。

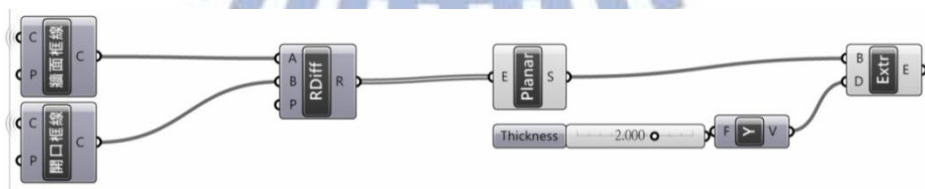


圖 121 D 部分 Grasshopper 內容：運用布林運算產生開口。

5.2.4 可變性

由表 13 可知，可建立「可變性」之開口因子：(1) 引入光線、(2) 提供視景、(3) 傳

遞訊息、(4) 互動組件、(5) 動態呈現。光線的流動，視景範圍的改變，接收到外界訊息，改變開口自身的狀態，互動技術讓開口可以回應環境條件和使用者行為，開口的動態也改變了空間的狀態，改變開口結構，同時也改變了內部空間的意識形態，成就了空間的「可變性」，開口的開闔決定進光量的多寡，轉變空間性質，造成時而開放，時而封閉的空間，再加上光與影的交錯運動，使空間產生一種動態感，產生具有可變性的空間感知。

(5) 引入光線 (功能因子) - 流動

演算法：Voronoi Diagram

此設計以「引入光線」功能因子來建立空間感知的「可變性」，光線的流轉使得原本靜定的空間產生不穩定的狀態，改變開口的位置，也使光投影的位置產生變化，使用 Voronoi Diagram 演算法進行開口設計 (圖 126)，藉由改變控制點的位址，進而使 Voronoi Diagram 的圖形結構發生變化，讓控制點在一定範圍內移動，使得由控制點所決定的區域範圍隨之改變，也改變光線照射室內空間的範圍，光影的變換成就空間的「可變性」。



圖 122 光線的流動造成「可變性」的空間感知。

圖 122 顯示以 Grasshopper 參數式設計工具產生開口的設計過程，隨機生成控制點的移動距離。設定牆面範圍，建立牆體 (圖 123)，提取平均分布於牆面上的控制點，並隨機生成控制點的移動距離，將移動過後的點的數據資料輸入於 Voronoi Diagram 運算器 (圖 124)，產生 Voronoi Diagram 的圖形結構 (圖 125)。

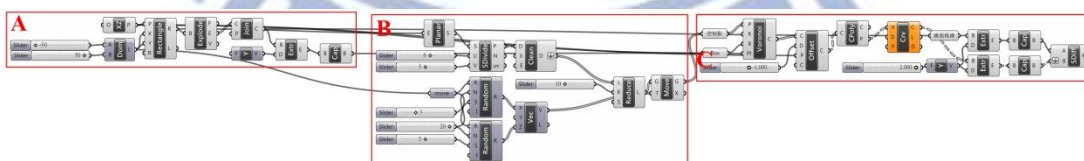


圖 123 Grasshopper 開口設計過程：Voronoi Diagram。

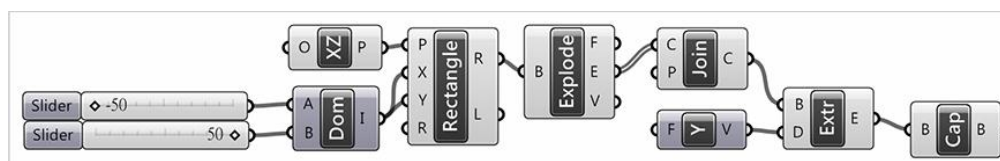


圖 124 A 部分 Grasshopper 內容：設定牆面範圍，建立牆體。

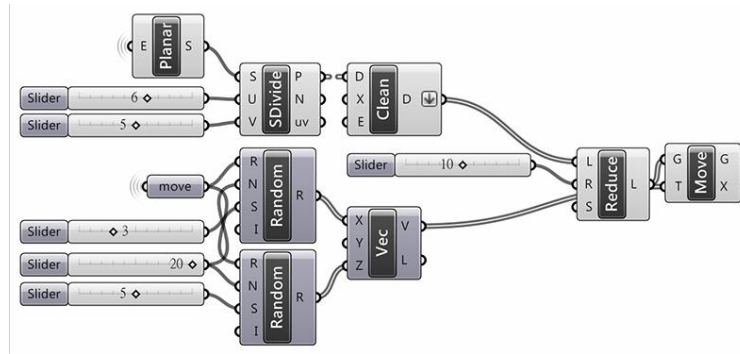


圖 125 B 部分 Grasshopper 內容：隨機生成控制點的移動距離。

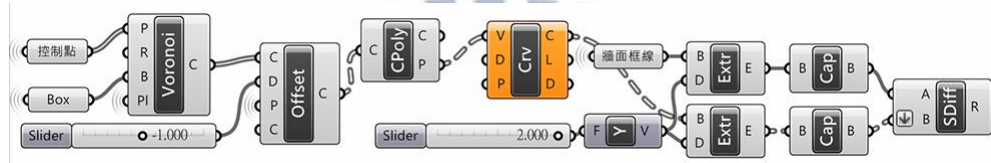


圖 126 C 部分 Grasshopper 內容：生成 Voronoi 開口結構。

(6) 提供視景 (功能因子)

演算法：Cellular Automata

此設計以「提供視景」功能因子來建立空間感知的「可變性」，改變視景範圍，採用二維的細胞自動機進行開口設計 (圖 126)，在細胞自動機的迭代過程，細胞在不同的時間會有不同的狀態，也改變視景框的框架結構，同時也改變了空間狀態，人們的視野範圍由細胞自動機的演化過程來決定，以提供視景的開口因子，產生空間感知的可變性。

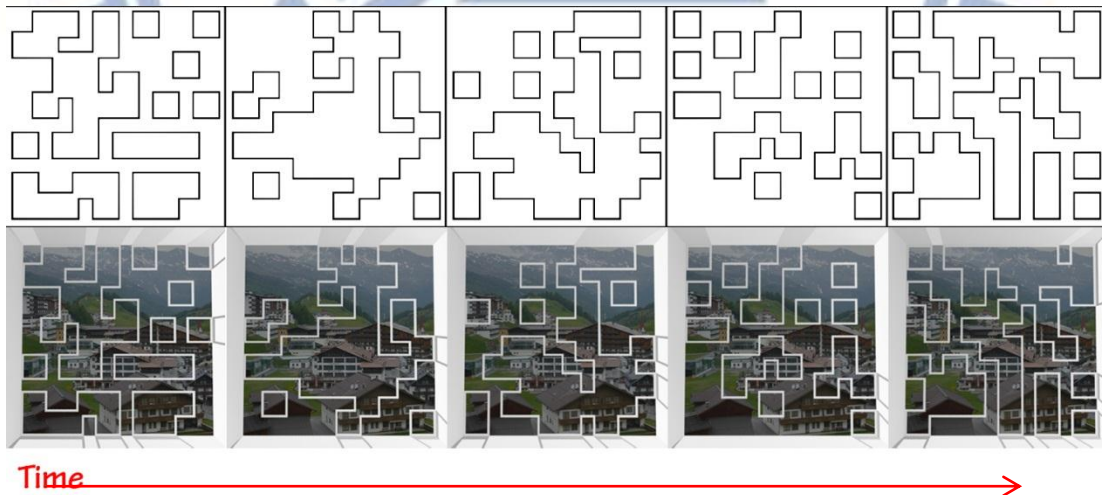


圖 127 改變視景框的範圍，也改變空間的狀態，產生空間感知的「可變性」。

圖 132 顯示以 Grasshopper 參數式設計工具產生開口的設計過程，設定 Cellular automata 的生成規則，(圖 133)，選取欲定義的細胞 (圖 134)，定義細胞的初始狀態，啟動細胞自動機，開始演化 (圖 135)。

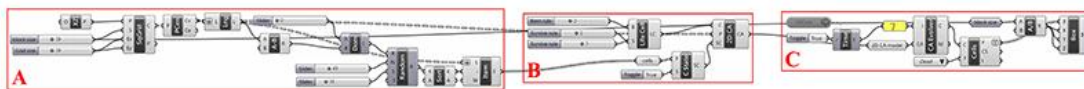


圖 128 Grasshopper 開口設計過程：Cellular automata。

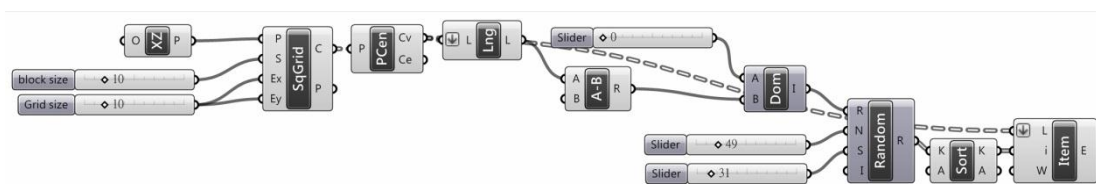


圖 129 A 部分 Grasshopper 內容：設定 Cellular automata 的生成規則。

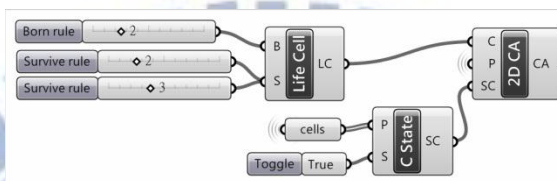


圖 130 B 部分 Grasshopper 內容：選取欲定義的細胞。

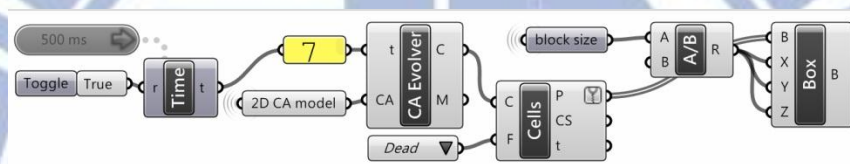


圖 131 C 部分 Grasshopper 內容：生成 Cellular automata 開口結構。

(7) 傳遞訊息 (功能因子)

演算法：Voronoi Diagram

此設計以「傳遞訊息」功能因子來建立空間感知的「可變性」，開口接收到使用者位於前方的訊息，調整控制點位置，讓開口群組隨著使用者移動而轉移，開口位置的改變，同時也改變光線在室內產生的光影現象，成就空間的「可變性」。使用 Voronoi Diagram 演算法進行開口設計 (圖 131)，藉由改變控制點的位址，進而使 Voronoi Diagram 的圖形產生變化，也使得開口結構發生改變。

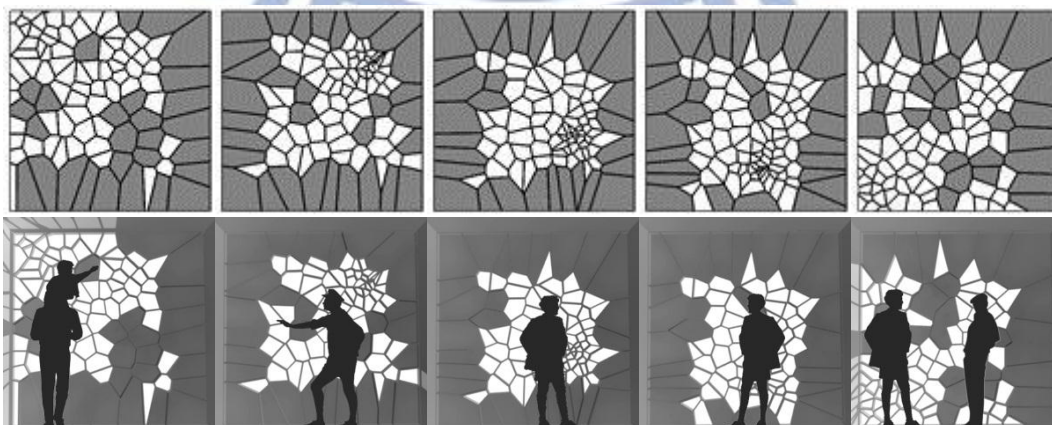


圖 132 開口的位置可以隨使用者的位置移動，塑造具有「可變性」的空間感知。

圖 132 顯示以 Grasshopper 參數式設計工具產生開口的設計過程，設定牆面範圍，建立牆體。在平面上產生一條曲線和隨機的點雲系統，以曲線上的點來假定使用者的位置，計算曲線上的點與點集產生的向量，提取數值調整 Voronoi Diagram 控制點的位置（圖 133），將移動過後的點的数据資料輸入於 Voronoi Diagram 運算器，產生 Voronoi Diagram 的圖形結構，並提取平均分布於牆面上的控制點，並隨機生成控制點的移動距離設定開口面積小於設定值的開口開啟，其餘封閉（圖 134）。

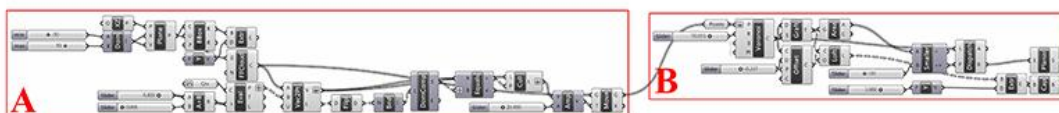


圖 133 Grasshopper 開口設計過程：Voronoi Diagram。

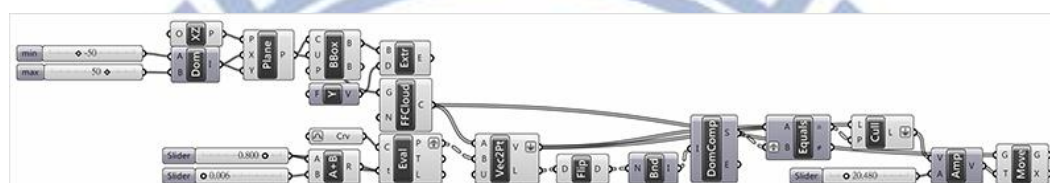


圖 134 A 部分 Grasshopper 內容：設定牆面範圍，建立牆體。

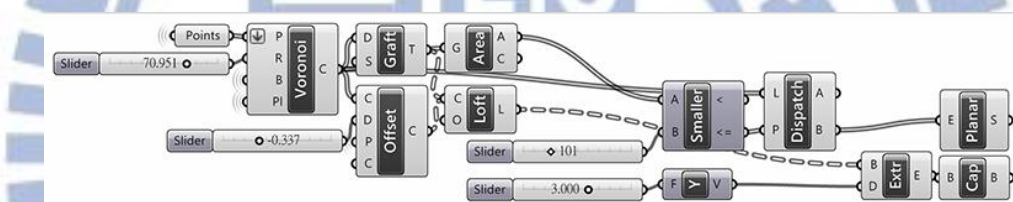
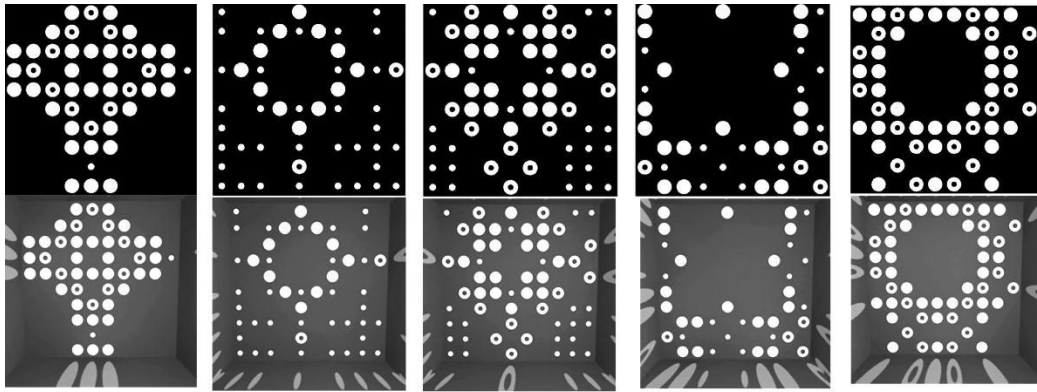


圖 135 B 部分 Grasshopper 內容：隨機生成控制點的移動距離。C 部分 Grasshopper 內容：生成 Voronoi 開口結構。

(4) 互動組件（構成因子）

演算法：Cellular Automata

此設計以「互動組件」功能因子來建立空間感知的「可變性」，細胞自動機的演化結果讓開口可以隨著時間改變自身的狀態(圖 135)，開口可以和使用者的互動，參考 Frédéric Eyl 和 Gunnar Green 設計的互動牆「Apecture」的「互動組件」的構成方式(圖 136)，感測器可以偵測使用者的動作，隨著使用者的行為改變，亦改變細胞自動機的演化規則，讓開口的動作產生不可預知的變化，產生具有「可變性」的空間感知。



Time →

圖 136 開口會隨使用者行為和細胞自動機的演化過程改變自身狀態，產生具有「可變性」的空間感知。

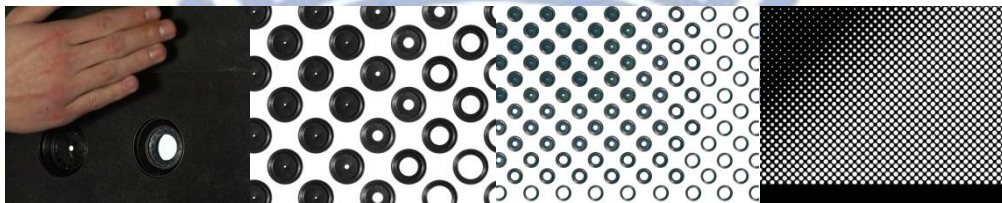


圖 137 (Frédéric Eyl and Gunnar Green/ Apecture, 英國倫敦, 2004-2005)

圖 137 顯示以 Grasshopper 參數式設計工具產生開口的設計過程，建立網格，選取隨機點，設定 Cellular automata 的生成規則 (圖 138)，選取欲定義的細胞 (圖 139)，啟動細胞自動機，開始演化 (圖 140)，提取演化後的細胞數據，建立開口。

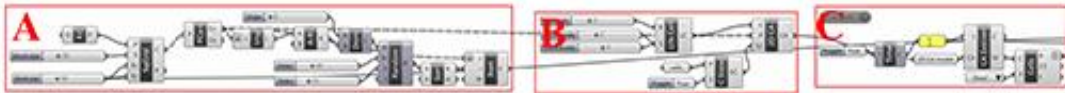


圖 138 Grasshopper 開口設計過程：Cellular automata。

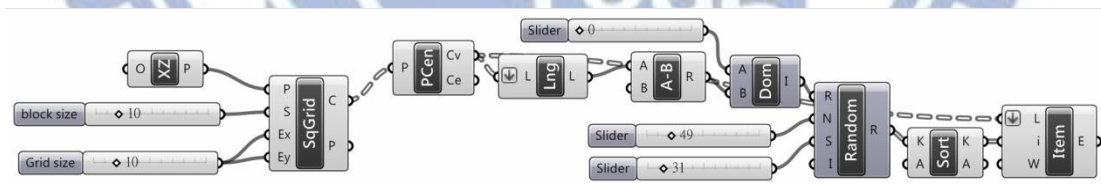


圖 139 A 部分 Grasshopper 內容：設定 Cellular automata 的生成規則。

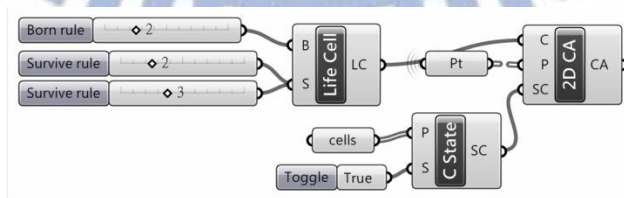


圖 140 B 部分 Grasshopper 內容：設定 Cellular automata 的生成規則，選取欲定義的細胞。

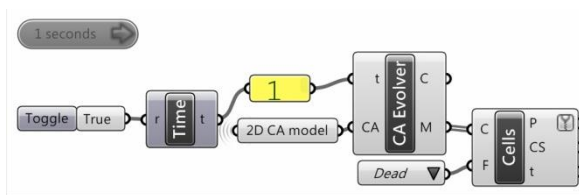


圖 141 C 部分 Grasshopper 內容：開始演化。

(5) 動態呈現 (形式因子)

演算法：Cellular Automata

藉由「動態呈現」的表現程式，產生可以隨時間產生變化的開口裝置，此設計採用二維的細胞自動機進行開口設計，提取細胞自動機的在迭代過程中的狀態，建立開口圖形，圖 141 顯示細胞會在迭代過程中改變自身的狀態，以此演算法的特性，可以產生動態的開口型態，藉由這種動態過程，可以協助我們建立產生空間感知的「可變性」。

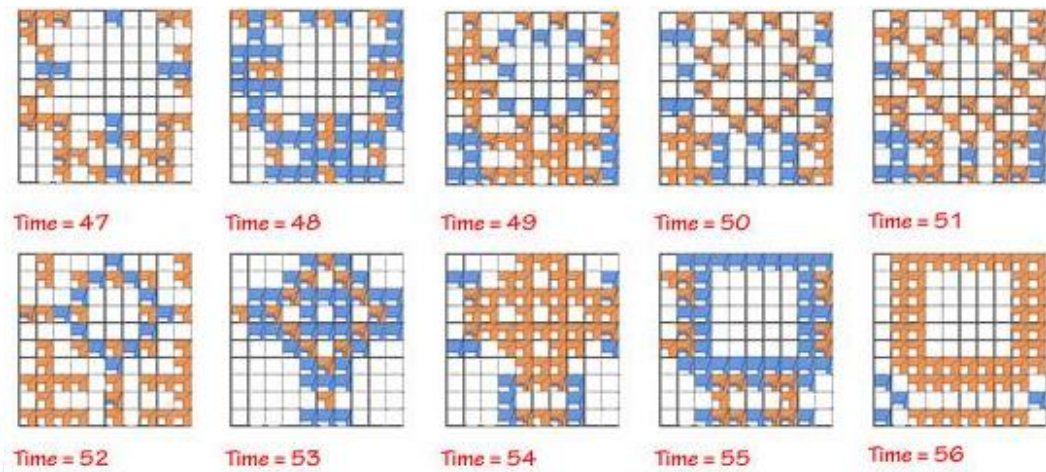


圖 142 運用「動態呈現」的開口因子塑造具有「可變性」的空間感知。

圖 142 顯示以 Grasshopper 參數式設計工具產生開口的設計過程，建立網格，選取隨機點，設定 Cellular automata 的生成規則 (圖 143)，選取欲定義的細胞 (圖 144)，啟動細胞自動機，開始演化 (圖 145)，提取新一代的存活的細胞與在上代存活的細胞的數據資料，分別設定不同的數值，交疊產生開口 (圖 146)。

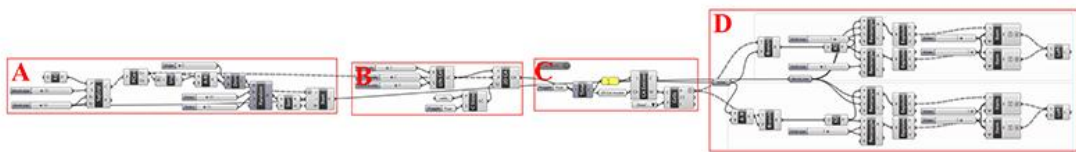


圖 143 Grasshopper 開口設計過程：Cellular automata。

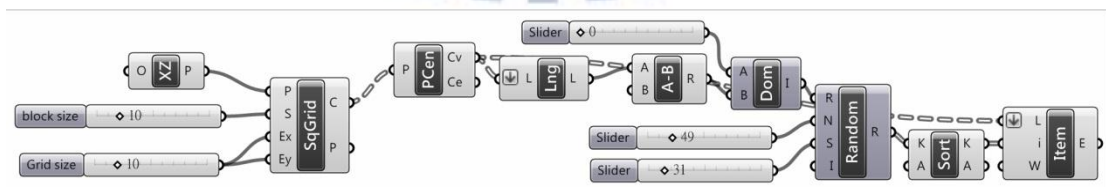


圖 144 A 部分 Grasshopper 內容：設定 Cellular automata 的生成規則。

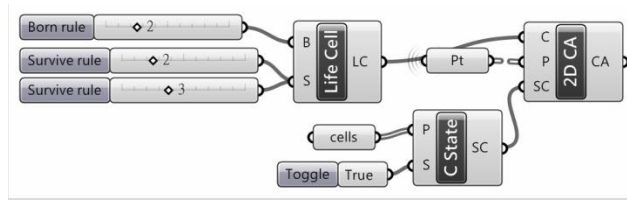


圖 145 B 部分 Grasshopper 內容：設定 Cellular automata 的生成規則，選取欲定義的細胞。

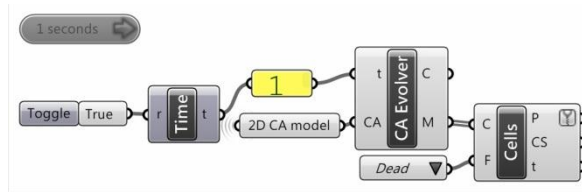


圖 146 C 部分 Grasshopper 內容：開始演化。

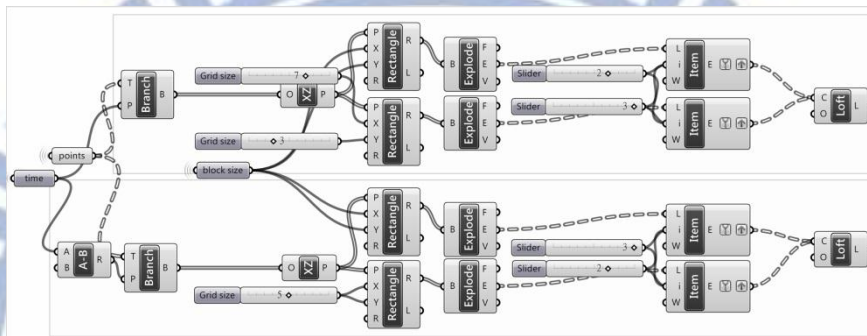


圖 147 D 部分 Grasshopper 內容：生成 Cellular automata 開口結構。

第六章 結論

本章總結前面針對研究目的進行的三個步驟的結果，歸納出組成開口的重要因子後，以開口因子來分析開口案例，得到主要影響空間感知形成的開口因子，再將這些開口因子作為設計開口的條件，進行參數式開口產生空間感知的設計實作，之後討論研究貢獻、研究限制與未來研究。

6.1 結果

開口是構成建築中即為重要的基本元素之一，開口在空間扮演著舉足輕重的角色，開口的存在讓空間有了意義，室內居住者亦須藉由開口來取得外界的訊息，在找出組成開口的開口因子中，我們知道功能因子、構成因子與形式因子之間具有相互性，為使開口滿足功能的需求，必須搭配適切地構成方式，而新的結構形態需要藉由功能來實現它的價值，構成技術架構出空間形態，不同的結構亦會產生多元的開口形式表現，開口形式需要構成因子來組成，形式因子又促使人們發展出更適宜的構造，但是不同的形式又很有可能賦予開口不同的功能，而開口引入光線與傳遞視野的功能又限制開口形式的表現方式，建築師透過設計開口的表現形式來傳達建築師的設計理念，開口的表現形式亦因應各個時期的設計趨勢與構造技術的進步而有各種不同的形態表現，開口形式不僅決定開口的樣貌，更是創造空間感知的關鍵因素。功能因子、構成因子與形式因子之間的相互性，使得任何一個因子的進化，都會驅策其他因子往更高的層次提升，也會帶動空間感知的變化，對應到人與空間之間的關係，以及開口對精神與美感方面的訴求，不同的開口因子皆會帶給人們不同的空間感知，妥善利用不同形式的開口特質，有助於在建置空間與設計開口形式時，指引我們更為清楚的設計方向。

將組成開口表現的開口因子作為分析開口案例的主要依據，找出主要影響空間感知的功能因子、構成因子與形式因子，包含「引入光線」、「提供視景」、「傳遞訊息」、「材料堆疊」、「混凝土構築」、「互動組件」、「方向性質」、「單元重複」、「視覺比例」與「動態呈現」，這些開口因子分別造成方向性、裝飾性、通透性與可變性空間感知的形成，不同的開口因子造成不同的開口形式表徵，即便是相同的開口因子，也有可能產生不同的開口表現，因而可以使人們感受到截然不同的空間感知，善用開口因子的特性，協助我們建構出恰當地空間感知。

將主要影響空間感知的開口因子運用於設計實作中，進行 16 項以開口因子為基礎的開口設計操作，且需符合設定的空間感知。參數式設計協助設計者建立出以往以手繪方式難以描繪的建築形體，設計工具的進步讓設計者可以創造出更多可能，在設計實作中採用當前設計者普遍

使用在設計過程中的演算法--L-system, Voronoi Diagram, Cellular Automata 這三種演算法規則輔助進行參數化開口設計，從這三種演算法生成的圖形結構中找出適用於開口設計的生成規則，在考量開口因子的前提下，應用演算法的演化規則，提取我們用於開口設計時的演算生成的結果，可以協助我們產生許多複雜型態的開口設計，且不失其開口的本質，這樣的開口才有其意義，而非僅是個特殊的形體而已。

6.2 研究貢獻

本研究從文獻資料中整理出主要組成開口的功能因子、構成因子與形式因子，三個因子並非各自獨立存在，而是必須與其他因子相依相存，其中一個因子的進步連帶使得其他因子也必須往更高地層次提升。構成因子必須滿足功能因子提出的種種要求，因而必須發展更為精進的構成技術，構成技術的提升，使得建築結構型態轉變，連帶使得開口形式產生有趣的變化，讓開口的形式表現有更多的可能，人們感受到開口形式帶來視覺衝擊，或是光線通過開口進入空間中產生的光影變化，以及開口將外部環境景色納入室內空間後開展了空間的廣度，這些因素讓室內居住者經由視覺上觀察到開口在空間中建立的種種跡象，因而能夠感受到空間感的形成。

本研究以現在普遍使用於設計領域的演算法來輔助進行開口設計，運用參數式設計工具設計開口的形態表徵，藉由操作開口設計將參數的概念含括其中，同時必須以開口因子塑造空間感之的概念為設計開口的前提下，試圖讓參數式設計工具設計出的參數開口既能夠滿足開口因子，也能顯現其空間特性，探尋參數開口與開口造成空間變異的可能性，試圖從過去的案例中探討開口的功能需求、構成方式和形式表現這三項組成開口的重要因子，以及這三者與空間感知的關係，為了讓參數式開口設計不淪為僅止於形式的操作，設計者在架構開口形式與空間形態時，必須考慮開口的功能因子、構成因子或形式因子這些開口因子。

設計工具發展至今，設計者可以運用各種數學方程式、演算法、程式語言等等各種形體生成方式，創造出許多前所未見且造型多變的幾何形體，其形體的複雜性亦挑戰了現今的構成技術，必須不斷地精進構成技術，努力發展出更多可以製造複雜形體的構成方式，方能跟上形式生成的腳步，然而，在極力探究數位建築的各種發展可能的同時，我們仍需回頭檢視最初的根本，就參數化開口設計而言，唯有在不捨棄開口最基本需求的前提下生成的參數開口，才具有其存在的意義，本研究討論從開口原本的功能需求、構成方式與形式表現來檢視以參數形成的開口是否亦能成就空間感知，因此，在設計實作中針對各個能夠產生空間感的開口因子提出可能的開口設計方式，並限定以三種演算法作為開口的生成方式，讓參數式開口設計既能適應當代的技術，又能滿足開口最基本的條件，並符合設計者期望營造的空間感知，這些可能的開口設計方式提供設計者在以參數式設計工具進行開口設計時一個可供參考的設計範例。

6.3 研究限制與未來研究

從過去的案例中探討開口的功能需求、構成方式和形式表現這三項組成開口的重要因子，以及這三者與空間感知的關係，本研究企圖從開口原本的功能需求、構成方式與形式表現來討論以參數形成的開口是否亦能成就空間感知，提供以演算法設計開口時可參照的方向，藉由設計實作找出設計參數式開口並建立因開口而產生之空間感知的方法，然而在對於空間感知的感受上，難免較傾向於個人主觀的思維，不同人對於空間的感受不盡相同，且在一個空間中並非只能存在一種開口形式，而空間感知的成立，並不侷限於單一開口因子，許多時候，空間感知的塑造是由不同開口形式與機能的共同存在來完成的。

未來研究將試驗用不同的演算法操作開口設計，並且在進行開口設計時，挑選 2~3 個開口因子，以檢視在不同的開口因子交互作用與影響下會產生何種空間感知，以期能夠建立較多面相的數據，並邀請具有建築與空間設計背景的受測者，針對開口建立的空間感知進行體驗，檢視開口設計是否符合開口因子所希望建立的空間感知，以驗證本研究提出的由參數式設計工具輔助設計的開口範例，在以開口塑造空間感知的前提下，亦能建立具有參數化時代特性，同時還能滿足開口最基本的需求的參數開口，更進一步地，嘗試實驗當不同開口形式存在於空間中，會產生何種空間感知，另外，在開口案例的分析中，開口因「流通空氣」的功能因子所帶來的聲音與風的流動亦會影響人們對空間的感受，但是「流通空氣」主要影響的是氣味與聲響的傳播，且本研究主要探討的是視覺所牽引之空間感知，因此在本研究中暫不討論「流通空氣」所影響的空間感知，但此功能因子仍可作為未來研究可討論之議題。

References.

- Alberti, L. B., & Rykwert, J. (1991). *On the art of building in ten books*. Cambridge: The MIT Press.
- Alexander, C., Ishikawa, S., & Silverstein, M. (1977). *A pattern language: towns, buildings, construction (Vol. 2)*. New York: Oxford University Press.
- Ambrose, M., Callam, B., Kunkel, J., & Wilson, L. (2009, April). How to make a digi-brick. In T. W. Chang (Chair), *Between Man and Machine? Integration, Intuition, Intelligence, Computer Aided Architectural Design Research in Asia*, Yunlin, Taiwan.
- Aurenhammer, F. (1991). Voronoi diagrams—a survey of a fundamental geometric data structure. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 23(3), 345-405.
- Barrios, C. (2005). Transformations on Parametric Design Models. In B. Martens & A. Brown (Chair), *Learning from The Past - A Foundation for The Future Computer Aided Architectural Design Futures*, Vienna, Austria.
- Berg, M. d., Cheong, O., Kreveld, M. v., & Overmars, M. (2008). *Computational geometry: algorithms and applications*. New York: Springer-Verlag.
- Bognar, B. (2009). *Material immaterial: the new work of Kengo Kuma*. Princeton: Princeton Architectural Pr.
- Bosia, D. (2011). Long Form and Algorithm. *Architectural Design*, 81(4), 58-65.
- Burry, M. C., & Murray, Z. (1997). Architectural design based on parametric variation and associative geometry. In Martens B., Linzer H., & A. Voigt (Eds.), *15th eCAADe-Conference Proceedings (pp. 1-11)*. Vienna, Austria: Österreichischer Kunst- und Kulturverlag.
- Ching, F. D. K. (1996). *Architecture: Form, Space & Order*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Choi, D., Le, M., & Lee, W. (2000). THE DOMINUS WINERY: A Case Study of an Alternate Masonry System. Retrieved from http://isites.harvard.edu/fs/docs/icb.topic502069.files/dominus_winery.pdf
- Cole, E. (2002). *The grammar of architecture*. Boston: Bulfinch.
- Corbusier, L. (1986). *Towards a new architecture*. London, United Kingdom: Dover Publications.

- Drum, H. (2007). Interactive Systems in Architecture: Eliminating the Communication Barrier between Humans and the Built Environment. Retrieved from <http://www.houstondrum.com/documents/InteractiveSystems.pdf>
- Fazio, M., Moffett, M., & Wodehouse, L. (2008). Buildings across Time: An Introduction to World Architecture. New York: McGraw-Hill.
- Fox, M., & Kemp, M. (2009). Interactive Architecture. Princeton: Princeton Architectural Press.
- Frampton, K. (2007). Modern Architecture: A Critical History. London, United Kingdom: Thames & Hudson.
- Frederick, M. (2007). 101 things I learned in architecture school. Cambridge: MIT Press.
- Gács, P. (2001). Reliable cellular automata with self-organization. *Journal of Statistical Physics*, 103(1), 45-267.
- Gardner, H., Kleiner, F. S., & Mamiya, C. J. (2005). Gardner's Art Through the Ages. California: Thomson/Wadsworth.
- Gardner, M. (1970). Mathematical games: The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life". *Scientific American*, 223(4), 120-123.
- Giedion, S. (1967). Space, Time and Architecture: The Growth of a New Tradition. New York: Harvard University Press.
- Griffith, K., Sass, L. (2006). Computing and materializing non-uniform shapes: An evolutionary approach to generate and digitally fabricate non-uniform masonry walls. *Proceedings of the 11th International Conference on Computer Aided Architectural Design Research in Asia*, pp. 227-235.
- Griswold, R. E. (2002). Drawdown Automata, Part 1: Basic Concepts. Retrieved from http://www.cs.arizona.edu/patterns/weaving/webdocs/gre_dda1.pdf
- Guo, Q. (2002). A visual dictionary of Chinese architecture. Mulgrave, Australia: Images.
- Held, M. (2001). VRONI: An engineering approach to the reliable and efficient computation of Voronoi diagrams of points and line segments. *Computational Geometry*, 18(2), 95-123.
- Hensel, M., Menges, A., & Weinstock, M. (2006). Techniques and Technologies in Morphogenetic Design. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Hernandez, C. R. B. (2006). Thinking parametric design: introducing parametric Gaudi. *Design Studies*, 27(3), 309-324.

- Hnizda, M. (2009). System-Thinking: Formalization of Parametric Process. Proceedings of the Arab Society for Computer Aided Architectural Design, pp. 215-223.
- Holman, D., & Vertegaal, R. (2008). Organic user interfaces: designing computers in any way, shape, or form. Communications of the ACM, 51(6), 48-55..
- Islar, M. (2001). Sticks, Stones, and Shadows: Building the Egyptian Pyramids. Oklahoma: University of Oklahoma Press.
- Iwamoto, L. (2009). Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques. Princeton: Princeton Architectural Press.
- Kahn, L. I. (1998). Louis Kahn: Conversations with Students. Princeton: Princeton Architectural Press.
- Kahn, L. I., & LaTour, A. (1991). Louis I. Kahn: Writings, Lectures, Interviews. New York: : Rizzoli International Publications.
- Kahn, L. I., & Wurman, R. S. (1973). The notebooks and drawings of Louis I. Kahn. Cambridge: MIT Press.
- Krawczyk, R. J. (2002). Architectural interpretation of cellular automata. Proceedings of the Generative Art International Conference, pp. 7.1-7.8
- Krier, R. (2010). Architectural Composition. GmbH, Germany: Edition Axel Menges.
- Lawson, B. (2001). The language of space. Oxford: Architectural Press.
- Lim, C. K. (2007). A better digital design and construction process using CAD/CAM media (Doctoral dissertation, National Chiao Tung University, Taiwan, Hsinchu City, Taiwan). Retrieved from <http://ndltd.ncl.edu.tw/cgi-bin/g32/g3web.cgi?o=dnclcdr&s=id=%22095NCTU5015031%22.&searchmode=basic>
- Meiss, P. V. (1990). Elements of Architecture. London, United Kingdom: Taylor & Francis.
- Mezzi, M., Comodini, F., & Marinacci, F. (2011). Seismic Sustainability of a Contemporary Architectural Expression. Proceedings of the 36th Our World in Concrete & Structures.
- Mitchell, W. J. (1977). Computer-aided architectural design. New York: Petrocelli/Charter.
- Mitchell, W. J. (2000). e-topia: "Urban Life, Jim--But Not As We Know It". Cambridge: MIT Press.
- Moggridge, B. (2007). Designing interactions. Cambridge, United Kingdom: MIT Press.

- Norberg-Schulz, C. (1971). *Existence, space & architecture*. New York: Praeger.
- Oosterhuis, K., & Feireiss, L. (2006). *The Architecture Co-laboratory: Game Set and Match II : on Computer Games, Advanced Geometries, and Digital Technologies*. Rotterdam, Netherlands: Episode Publishers.
- Packard, N. H., & Wolfram, S. (1985). Two-dimensional cellular automata. *Journal of Statistical Physics*, 38(5), 901-946.
- Prusinkiewicz, P., & Lindenmayer, A. (1991). *The algorithmic beauty of plants (The Virtual Laboratory)*. New York: Springer-Verlag.
- Reem, D. (2011). The geometric stability of Voronoi diagrams with respect to small changes of the sites. *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on Computational Geometry*, pp. 254-263
- Reiser, J., & Umemoto, N. (2006). *Atlas of novel tectonics*. New York: Princeton Architectural Pr.
- Salim, F., Mulder, H., & Pallett, J. (2010). A System for Form Fostering: Parametric modeling of responsive forms in mixed reality. *Proceedings of the 15th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia*, pp. 531-540
- Sass, L. (2008). A physical design grammar: a production system for layered manufacturing machines. *Automation in Construction*, 17(6), 691-704.
- Schittich, C., Lang, W., & Krippner, R. (2006). In *Detail: Building Skins*. Berlin, Germany: Birkhäuser Basel.
- Schumacher, P. (2008). Parametricism as Style: Parametricist Manifesto, in A Betsky (ed) *La Biennale di Venezia. 11^a Mostra internazionale di Architettura. Out There. Architecture beyond building. Catalogo della mostra*, Marsilio, 17-20.
- Shadkhou, S., & Bignon, J. C. (2009). Architectural morphogenesis - Towards a new description of architectural form. *Proceedings of the 13th Congress of the Iberoamerican Society of Digital Graphics*, pp. 74-76.
- Skiena, S. S. (1997). *The Algorithm Design Manual*. New York: Springer.
- Tedeschi, A. (2011). *Parametric Architecture with Grasshopper*. Roma, Italy: Le Penseur.
- Terzidis, K. (2006). *Algorithmic architecture*. Oxford: Architectural Press.
- Vollers, K. (2001). *Twist & build: creating non-orthogonal architecture*. Rotterdam, Netherlands:

010 Publishers.

Wolfram, S. (1983). Statistical mechanics of cellular automata. *Reviews of modern physics*, 55(3), 601.

Zevi, B. (1994). *The modern language of architecture*. New York: Da Capo Press.

Zevi, B., Gendel, M., & Barry, J. A. (1957). *Architecture as space: how to look at architecture*. New York: Horizon Press.

Zimmer, H. (2005). *Voronoi and Delaunay Techniques, Lecture Notes, Computer Sciences VIII*, RWTH Aachen.

