

交通大學建築研究所

碩士論文

數位思維影響下的工具創造：

以編織工藝為例

Tool Making in Digital Era
for Knitting Fabrication

研 究 生：劉家豪

指導教授：侯君昊

中華民國一〇二年七月

數位思維影響下的工具創造：以編織工藝為例
Tool Making in Digital Era for Knitting Fabrication

研究生：劉家豪 Student：Chia-Hao Liu
指導教授：侯君昊 Advisor：June-Hao Hou

國立交通大學
建築研究所
碩士論文



Submitted to Graduate Institute of Architecture
College of Humanity and Social Sciences
National Chiao Tung University
in Partial Fulfillment of Requirements
For the Degree of
Master of Science in Architecture

August 2013

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇二年七月

摘要

科技的普遍化讓電腦輔助設計製造比起過往更加廣泛地遍及整個設計領域。身處當代製造環境背景下，在執行設計的過程中運用電腦輔助軟體及硬體協助於虛擬及實體世界建模已經是相當常見的。利用電腦輔助設計製造設備運用不同的設計媒材與各種的加工方式，可以進行創作生產與傳統工藝技術不相上下且具有特殊數位造型與紋理的作品。這樣地設計過程，讓數位製造提升至數位工藝的境界。

然而現今的電腦輔助設計製造機具，仍然具有控制技術的困難度與操作媒材的侷限性，故在設計的過程中經常會被所選擇的輔助製造機具所影響，使得設計者在思考設計時在整體造型、構成結構乃至於生產方式，被既有的媒材與加工方式所限制。且這樣的數位設計媒材受限於加工機具的發展，經常在情感和文化上是脫節的。若是設計師能夠運用熟悉的傳統工藝技術或是挑選與生活貼近的媒材進行輔助加工，則設計成品會與設計師的初衷更加接近，也會與人們的認知連結更加緊密。

因此本研究主要以結合數位與傳統的工藝，探討設計者具備自行開發之個人獨特的設計創作工具的可能性，提供設計者更加簡易並有效率的應用工藝技術進行生產與製造。首先進行傳統工藝的操作實驗後，挑選具有特殊紋理與空間特性的加工技術，針對設計者在過程中所遇到可數位化控制的部分提出改善的可能，以生產不同於過往電腦輔助設計中所加工工法與所使用操作媒材之加工物件。

其次以新電腦輔助設計製造機具與其生產模式進行模擬設計，實驗尋找新的設計思考順序和邏輯，以及新的媒材與結構用以建構不同樣態模型的可能，並以此探討設計者擁有自行創造創作工具與控制新媒材對於設計操作本質的改變與影響。

關鍵字：數位工藝、電腦輔助設計製造、數位製造, 編織工藝

Abstract

The prevalence of technology has influenced computer-aided design and manufacturing extensively. In recent years, it is very usual for designers to develop conceptual design with computer-aided design tools both in virtual and physical environments. By using different processes and media, designers produce forms and textures mathematically or algorithmically with decent quality comparable to traditional craftsmanship. CAD/CAM is now the new tools for craft making, which leads to the digital crafting era.

However, it is still very difficult for designers to operate and control digital fabrication tools. The support of design media and processes on such tools are limited, and the end products usually lack cultural concerns and affections.

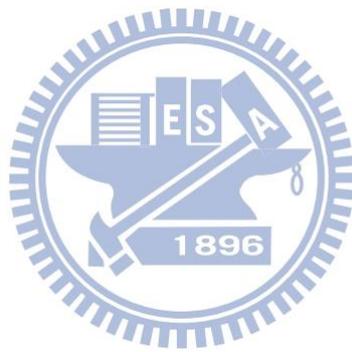
In order to deal with this situation, this thesis tries to discuss the possibility of tool making for designers and the changing of design process. Based on open source software and hardware platform, research studies focus on the combination of traditional crafting and digital technology. This research takes knitting craft as an example to explore the possibility of knitting craft, to extract the elements of knitting process, and to construct an experimental prototype.

Through the tool making and prototyping, the research develops a new design process linking design thinking, model analysis, to construction guidelines. Therefore, designers can choose, control, or even create their own design and manufacture machine.

Keywords: digital crafting, computer-aided design and manufacturing, digital design and fabrication, knitting craft

謝誌

謝謝妳



目錄

摘要	I
Abstract.....	II
謝誌	III
目錄	IV
圖表目錄	VI
1. 導論.....	1
1.1. 研究動機與脈絡.....	2
1.2. 研究問題.....	3
1.3. 研究目標.....	5
1.4. 研究範疇.....	6
1.5. 研究步驟.....	6
2. 文獻與案例探討.....	9
2.1. 編織記號之背景	9
2.1.1. 結繩記事與數的文明	9
2.1.2. 編織記號	10
2.2. 傳統編織技術織法研究	14
2.3. 參考案例.....	17
2.3.1. 案例一：Dreamweaver	17
2.3.2. 案例二：Fibrous	18
2.3.3. 案例三：The Craft of Thread.....	18
2.3.4. 案例四：Digital Matter.....	19
2.3.5. 案例五：Dry Run	20
2.3.6. 案例六：Beady	21
3. 工藝數位化的雛型建構.....	22
3.1. 編織機具的操作研究	22

3.1.1.	勾針織針具的操作研究	22
3.1.2.	不織布戳針針具的操作研究	23
3.1.3.	傳統式編織器	23
3.1.4.	捆繩機接合法實驗	25
3.1.5.	手搖式編織機	26
3.1.6.	工藝加工模式轉化的選擇	29
3.2.	輔助設計製造設備雛形的製作	30
3.2.1.	分解雛型元件	30
3.2.2.	加入電腦輔助控制元件	31
3.2.3.	電腦輔助軟硬體工具選擇	34
3.2.4.	雛形輔助製造的實驗操作	37
3.3.	幾何關係與運算介面	40
3.3.1.	編織體的空間幾何	40
3.3.2.	編織幾何的運算介面	44
3.3.3.	輔助運算操作成果	44
4.	新工具雛形的模擬設計操作	47
4.1	新結構媒材的模擬設計	47
4.2	立體造型的模擬設計	51
4.3	自我編織結構的模擬設計	54
5	結論	60
5.1	研究成果	60
5.2	研究限制	62
5.3	後續研究	62
	參考文獻	64

圖表目錄

Fig 1-1 減法製造輔助設計流程.....	3
Fig 1-2 加法製造輔助設計流程.....	4
Fig 1-3 傳統電腦輔助設計製造的節奏.....	4
Fig 1-4 由工具開始的設計節奏.....	5
Fig 1-5 設計的影響構成.....	5
Fig 1-6 傳統編織工藝所創造的紋理.....	6
Fig 1-7 研究流程圖.....	7
Fig 2-1 繩結記事之結法.....	9
Fig 2-2 奇普結繩.....	10
Fig 2-3 奇普結繩法.....	10
Fig 2-4 花樣.....	11
Fig 2-5 (A)鎖針及其編織法 (B)短針及其編織法... ..	11
Fig 2-6 (A)減針及其編織法 (B)加針及其編織法 (C) 長針加針及其編織法.....	11
Fig 2-7 輪型花樣.....	12
Fig 2-8 (A)小組拆解法 (B)編織之起始鎖針群與層 數記號.....	12
Fig 2-9 (A)編織記號之螺旋解讀法 (B)解讀後之加 工序列.....	13
Fig 2-10 梭織、三軸梭織、與針織的織理差異....	14
Fig 2-11 (A)平紋梭織布經緯結構 (B)工業化梭織織 布機.....	15
Fig 2-12 (A)針織布線圈結構 (B) 工業化針織布圓 筒機.....	15
Fig 2-13 不織布結構 Non-woven Fabric Structure .	16
Fig 2-14 不織布戳針及其加工法.....	16
Fig 2-15 (A)Dreamweaver 本體 (B)叢簇的生成.....	17
Fig 2-16 Dreamweaver 轉折角的生成原理	17
Fig 2-17 節點的生成.....	17
Fig 2-18 (A)Fabrous 本體 (B)數位運算控制.....	18
Fig 2-19 (A)Fabrous 的卡榫結構 (B)骨架與最終成品 造型.....	18
Fig 2-20 捆繩機接合法與其接合細部.....	19
Fig 2-21 複數結構接合的成品.....	19
Fig 2-22 控制磁力粒子的手臂.....	19

Fig 2-23 磁力粒子所構成的快速成型家具.....	20
Fig 2-24 DryRun 作品製作環境.....	20
Fig 2-25 (A)機械手臂施作中狀態 (B)纏線器細部設計.....	21
Fig 2-26 運算加工路徑的介面.....	21
Fig 2-27 串珠粒子與多面體的關係.....	21
Fig 3-1 勾針及勾針手法操作.....	22
Fig 3-2 (A)勾針法放樣圖例 (B)勾針操作成品.....	23
Fig 3-3 不織布的戳針法實驗.....	23
Fig 3-4 (A)城堡編織器 (B)城堡編織器織法實驗.....	24
Fig 3-5 (A)城堡編織器之成品 (B)異色混紡實驗.....	24
Fig 3-6 釘板編織法.....	25
Fig 3-7 捆繩機的構造.....	25
Fig 3-8 捆繩機制作圖.....	26
Fig 3-9 (A)捆繩機實驗機具 (B)實體施作成品.....	26
Fig 3-10(A)手搖式編織機 (B)編織機實驗操作.....	27
Fig 3-11 手搖式編織機的紋件運作模擬.....	27
Fig 3-12 手搖繩索編織機之運作與產出之編織物.....	27
Fig 3-13 (A)手搖編織機的筒狀加工平台 (B)編織機所生產之編織物.....	28
Fig 3-14 手搖把與內平台之齒輪比.....	28
Fig 3-15 管狀空間的填充過程.....	28
Fig 3-16 填充後編織體成品.....	29
Fig 3-17 個別獨立的物件與具有序列關係的物件.....	29
Fig 3-18 編織體構成四邊形的面造型.....	30
Fig 3-19 編織機數分解組件.....	31
Fig 3-20 編織機數位化連結示意圖.....	31
Fig 3-21 數位化編織機初步模擬.....	32
Fig 3-22 (A)伺服馬達 (B)強扭力直流減速馬達.....	32
Fig 3-23 馬達控制板與 12V 電源供應器.....	32
Fig 3-24 數位化編織機製作設計圖.....	33
Fig 3-25 數位化編織機製作設計 3D 圖.....	33
Fig 3-26 實際改裝之狀態.....	33
Fig 3-27 (A)編織機之動力結構 (B)數位化編織機成品.....	34
Fig 3-28 以 Rhinoceros 介面繪製之曲面.....	35
Fig 3-29 Arduino 的介面.....	35

Fig 3-30 (A)Firefly (B)Grasshopper 介面	36
Fig 3-31 (A) EXCEL 991 毛線 (B)填充紙管材料	37
Fig 3-32 (A)輸入視窗介面 (B)Grasshopper 運算介面	38
Fig 3-33 使用 Fader 控制元件	38
Fig 3-34 長度運算	39
Fig 3-35 操作狀態操作中	39
Fig 3-36 編織體製造	39
Fig 3-37 編織的三角幾何	40
Fig 3-38 三角網格	40
Fig 3-39 Mesh 結構系統	41
Fig 3-40 (A)無向圖 (B)有向圖	41
Fig 3-41 柯尼斯堡的七橋問題	42
Fig 3-42 由拉圖形之由拉路徑分析	42
Fig 3-43 路徑的分析	43
Fig 3-44 由拉路徑的分析記錄法	43
Fig 3-45 由拉路徑運算程式 Grasshopper 圖形	44
Fig 3-46 由拉路徑尋找之運算介面	44
Fig 3-47(A) Surface (B) Mesh (C) Triangulate (D) Euler Path	45
Fig 3-48 實體編織平面造型成品	45
Fig 3-49 (A)3D 模型 (B)模型分析	45
Fig 3-50 由拉路徑分析	46
Fig 3-51 編織物立體造型成品	46
Fig 4-1 彈性的編織體	47
Fig 4-2 (A)塊狀海綿 (B)長條海綿	48
Fig 4-3 (A)編織包裹所產生的段 (B)包裹海綿示意圖	48
Fig 4-4 (A)索狀編織體 (B)海綿 (C)軟質編織體 (D)紙管 (E)硬質編織體	48
Fig 4-5 (A) Surface (B) Mesh (C) Triangulate (D) Euler Path	49
Fig 4-6 柔軟網格結構	49
Fig 4-7 節點與串聯邊的關係	49
Fig 4-8 網格接點的分解	50
Fig 4-9 (A)發泡海綿 (B)十字快速鉸接的原理	50
Fig 4-10 十字快速鉸接實作	50
Fig 4-11 (A)海綿節點網狀平面 (B) 海綿節點立體	

造型.....	51
Fig 4-12 模型建構與分析.....	51
Fig 4-13 由拉路徑.....	52
Fig 4-14 組裝序展試圖.....	52
Fig 4-15 放樣圖面.....	52
Fig 4-16 柔軟結構的立體造型實作.....	52
Fig 4-17 柔軟結構的立體造型成果.....	53
Fig 4-18 柔軟結構所建構的空間.....	53
Fig 4-19 立體編織結構.....	54
Fig 4-20 運算自我編織結構.....	54
Fig 4-21 配置自我編織繩圈.....	54
Fig 4-22 配置起始繩圈.....	54
Fig 4-23 立體編織法記號分析.....	55
Fig 4-24 結構單元放樣.....	55
Fig 4-25 自我立體編織結構分析放樣.....	55
Fig 4-26 筒狀編織成品(內向).....	56
Fig 4-27 筒狀編織成品(外向).....	56
Fig 4-28 椎體造型 3D 模型.....	57
Fig 4-29 椎體造型模型分析.....	57
Fig 4-30 放樣符號.....	57
Fig 4-31 椎體造型放樣圖面.....	58
Fig 4-32 放樣記號.....	58
Fig 4-33 實作放樣.....	58
Fig 4-34 椎狀體造型(外向).....	58
Fig 4-35 椎狀體造型(內向).....	59

1. 導論

《考工記》：「知者創物，巧者述之守之，世調之工。百工之事，皆聖人之作也。」

從古至今的設計創作環境中，為了具體化傳達設計者的創作思考，通常設計者會先將意念圖像化為二維的視覺化平面繪圖(Sketching)，而後藉由工具與媒材將平面之繪圖在真實世界中立體化(3D)呈現，這種從空間的想像落實到真實可被感知與理解的模型，稱之為建模(Modeling)，而其中使用工具(Tooling)與媒材(Media)的加工形塑過程則稱之為製造(Fabrication)。

人類在製造的過程中累積經驗，並根據那些經驗來適應這些工具和開發工具的使用法，以更加多元而有效的操作媒材進行設計。故設計時所使用的工具與媒材不僅被認為對設計工作的發展、空間認知以及設計溝通方式有直接影響，同時也暗示著設計可能被進行的方式。(Herbert, 1994)

二十世紀初期的設計工作空間中，圖桌、模型台是設計者做設計必備的工具或裝備。至 90 年代個人電腦及網際網路的興起，運算裝置已與人們的日常生活密不可分(Norman, 1998)，設計工作室逐漸地轉變、擴增，走向數位化的設計工作環境，而隨著電腦圖學與晶片技術的進步，電腦輔助設計從協助設計圖面的表現階段，已發展至可真實的在現實世界中操作設計的過程。

設計師應用 3D 數位模型建構機具進行電腦輔助設計以及呈現與發表設計作品，而各種不同選擇的加工方法、加工媒材與人機介面的差異與特質，使得在製作完成的工件中，可以看出製造過程中所採用的材料和技術(McQuaid, 2005)，因此可見電腦輔助設計在媒材與加工方法選擇對設計成果的影響力。

1.1. 研究動機與脈絡

以工具建造模型是設計過程中重要的一個過程，而快速成型技術(Rapid Prototyping 簡稱 RP)是工業設計和建築設計在現代中設計視覺化與實體化的方法。快速原型技術是綜合了現代計算機數控技術、精密伺服驅動技術、機械工程、雷射技術及材料科學技術等基礎上，集成發展起來的一項先進製造技術，可以自動、直接、快速、精確地將設計思想轉變為具有一定功能的原型或直接製造零件，從而可以對產品設計進行快速評估、修改及功能試驗，大大縮短設計產出的研究與製造周期，對促進產品創新、降低開發成本、提升產品競爭力，有非常積極推展的作用。

快速成型技術包含了 CAD 與 CAM 兩個部分：其中 CAD(Computer-Aided-Design)指從事設計或製圖工作者，透過電腦輔助繪圖軟體的協助，將設計師腦中的設計圖以二維(2D)或三維(3D)之數位圖形來記錄、發展與呈現；而 CAM(Computer-Aided-Manufacturing)則是指應用電腦模擬製作程序，將設計轉換為製造過程的資訊，即為存在電腦中的設計圖轉送到電腦輔助加工機具，使電腦自動化機械配合而生成設計產品，可以在無需準備模具的情況下直接接受產品設計數據，快速製造出新產品的樣件。這就是快速原型技術對製造產業產生的革命性意義。設計變革藉由快速學習上手及減少使用上的錯誤，實質增進了人類對於科技產品的使用性(Norman, 2005)。因此現今的電腦輔助加工技術，已經普遍見用於各種各樣的產業中。

然而傳統的電腦輔助設計製造設備的價格高昂、技術的困難度大、操作的環境需求有侷限，這樣的生產結構導致設計師在設計端與輸出端並沒有連結，使得設計者必須經由大量的指令與操作步驟，才得以讓片段的圖像訊息足以完整地呈現設計概念，進入到設備端進行實作；而且設備的實作要對於機台有相當知識與技術和具有豐富的經驗，必須非常熟悉現場所有機械設備的功能與加工方式和流程，才能順利的操作複雜的模擬程式進入生產。不若如同傳統的工藝技術一般，以貼近生活的加工與操作方式，在相當低度需求的環境即可生產製造，所製造的過程與最終的成品與常民文化和記憶接合，富有情感與文化依附。

以往受限於各種電腦輔助設計製造設備工具的加工方式，模型的設計與生產也會帶有加工設備所選擇媒材的特定加工流程，或是產生的媒材方式所導致的質地(Grain)與紋理(Texture)。如果因應與改進這些特性，或甚至讓設計者能夠自行地創造自己所需求的工具，讓設計者能夠在設計發想、細部設計階段時更自由而直覺的操作電腦輔助設計軟體，如此一來就可能利用新型態的操作，激發設計者產生不同的靈感(Anderson, 2000)。

因此本研究基於近年來由於科技的普及化，操作程式語言的困難度降低，有許多可簡易學習與應用的軟體與硬體出現，思考讓設計者能直接碰觸實體設備對物件進行設計，使操作介面更簡單更直覺(Sharlin et al., 2004)，提供設計者能更加全面掌握設計作品最終狀態的一種新的輔助製造方式。

如果人人皆可以容易地將傳統工藝技術與工具，轉化為現代數位化設計與製造的呈現媒介，自我客製化的工具與媒材的使用與創造會變得更加普及，這將破壞低成本、低工資大量製造業的優勢，並且重新定義的設計製造的方式、導致資本和工作重新分配，知識產權規則也將被改變，科技文明是否將使設計者的設計製造工具獲得自由，為此人們應該從現在開始考慮由設計到製造皆可被設計這種技術普及的長遠影響。

1.2. 研究問題

設計媒材(Design Media)是輔助設計者把腦中抽象的想法呈現出來的工具，因此不同的設計媒材的特性與運用，導致不同媒材有不同的使用方法與呈現方法，會改變設計過程中的設計方法與步驟，進而影響設計者的思考模式，因此在設計者的思考會受他所使用的不同設計媒材所影響 (Liu, 1996)。

傳統電腦輔助設計製造所使用的工具是具有侷限性的，以現今常見的快速成型技術而一般可以分成兩種主要製造流程，分別是：減法製造技術 (CNC Milling)與加法製造技術 (Additive Manufacturing)。減法製造是一種削切的成型技術，常見的是對於金屬、石材或木料板材的加工，由於施作快速而價廉所以非常普及於一般工業化生產製程；然而減法製造型的最大缺點是對於加工材料上的浪費，削切之加工材料通常無法回收再利用，而加工材料的剩餘面積也經常難以使用而多予以廢棄處理。加法製造優點則是以需要多少則使用多少的方式以單元堆砌出來，較不浪費材料，用不完的材料可立即回收。

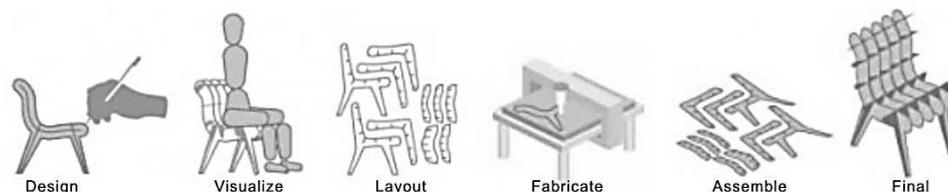


Fig 1-1 減法製造輔助設計流程

由圖(Fig 1-1)為減法製造輔助設計流程，是以平面切割作為媒材的加工方式，所以製造的產品具有片狀的紋理，故在組裝時就須考慮片狀材料的彼此建構方式，所以在設計過程常會考慮以卡接或堆疊的方式進行設計，也由於單元之間在製造後呈現獨立狀態，因此經常會遇到物件混亂難以管理的問題，為了因應解決此問題，故減法製造在設計時就會考慮各元件彼此間的鉚釘接合、膠合接合或卡榫接合的順序與編號，而產品也就帶有因應而生的節理造型。

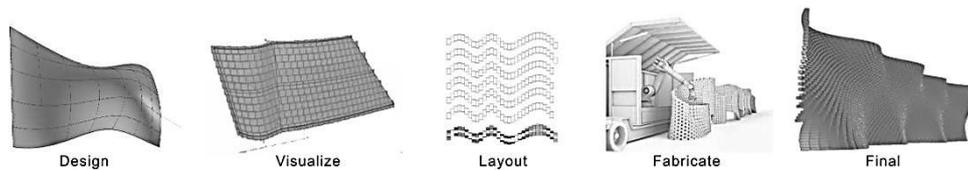


Fig 1-2 加法製造輔助設計流程

而加法生產技術的程序是首先繪製出所要生產物品的數位模型，再由一台帶有噴嘴或是或夾具的機器手臂，將設計者需要的展品慢慢將原料以堆積的方式生產出來(Fig 1-2)，故加法製造方式所生產的產品多帶有粒子或線條的積層節理。

兩種電腦輔助設計製造的方式會導致相當不同的建模思考與製造紋理，生產的流程也相當不同，但設計的過程皆須於製造前考慮加工方式，予以配合修正圖面，以適應機器的特定生產模式(Fig 1-3)，因此設計者的可操作過程僅至進入機具前的圖面模擬階段，無法操作機具的加工方式與加工紋理。

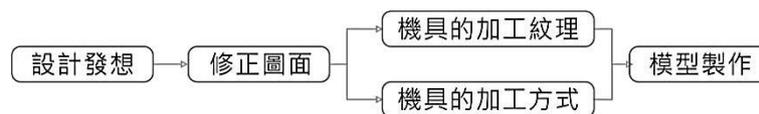


Fig 1-3 傳統電腦輔助設計製造的節奏

故本研究所探究的問題為：設計者是否可以藉由現代科技，改變傳統電腦輔助設計製造的節奏，與對設計生產的流程擁有更多的控制力，並藉由不同的設計工具與媒材來創造不同的設計思考與設計方法。企圖於傳統工藝中，尋找一種貼近於情感與文化的工藝製造技術，並改良或增進這種傳統工藝的製造方式，轉化(Transform)與建造(Building)一種新的設計脈絡，如此一來是否可以使得工藝技術在保有紋理與脈絡的狀態下，藉由數位運算及數位輔助製造的方式，讓加工過程更加精確與快速，應用於建構建築空間之模形或原型；最終可及一種低施作環境限制條件的製造過程、可快速生產具有紋理的結構體製造機，達到既有之傳統生產法的數位構築利用，於當代展現更多價值與應用可能性。

1.4. 研究範疇

加法製造技術的優勢在於可以控制特定的材料的加工順序以及精密度，能夠更快更有系統地快速生產單一特定產品，且無需生產線可以削減成本，減少了大量浪費現象，相對的也對於環境更加的友善。

現今的加法製造技術中大部分都只能操作小尺度的產品，且加法製造技術技術因為材料因素，大多需要在特定的化學性的與溫度性的環境需求中進行，本研究也詢問是否能夠利用與增進現有的生產工法以創造一個更低環境需求的加法製造技術，提供更多建築設計構成手法、思考、及體驗的可能性。

在傳統工藝技術中，編織製造是一種傳統的加法工藝生產方式，經由現代化的工業技術已經可以大量的製造，具有輕盈性、紋理性、連貫性、堆砌性、重複性、單元性的構成特質，已經是許多設計者頻繁使用的設計元素(Fig 1-6)。如果在欣賞編織技術之後，更進一步了解其工藝身世與工業體質，用更寬廣的角度探索與發展精彩與奧妙之處，以編織作為空間組成的機會，便能提供更多與傳統經驗脈絡相關的空間體驗。

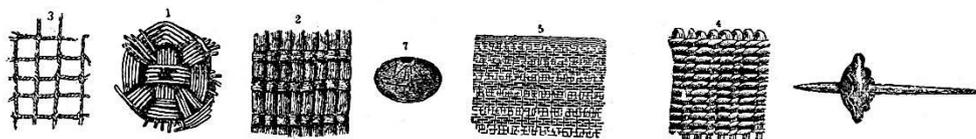


Fig 1-6 傳統編織工藝所創造的紋理

因此本研究將以編織技術出發，使之能與設計者可及的數位技術相結合，成為一種加法製造為研究作為範圍。將編織技術藉由數位工具的輔助從手工藝轉化為建築設計的空間構成和操作元素，達成一種有別於現有的快速成型技術，是創造設計者得以控制生產脈絡內容的不同的設計方式。

1.5. 研究步驟

本研究目的在探索科技進步到此，設計者是否可以容易的用連接數位設計與製造端以及數位生產工具的改變是否會影響設計的過程。由於在建築設計領域使用電腦輔助設計與製造已有相當長的一段時間，既有的研究大部分都在討論如更更精準地操作電腦輔助設計設備和數位化參數地擷取與分析的面向，而較少談及工具的多元性可能與設計媒材發

展的影響，故為了解設計環境中因操作數位模型製造工具之不同，所造成設計思考與設計操作方式之改變問題，界定建築領域在數位媒材影響下的「風格」(Liu, 2006)，本論文試圖以如下研究步驟(Fig 1-7)探討之：

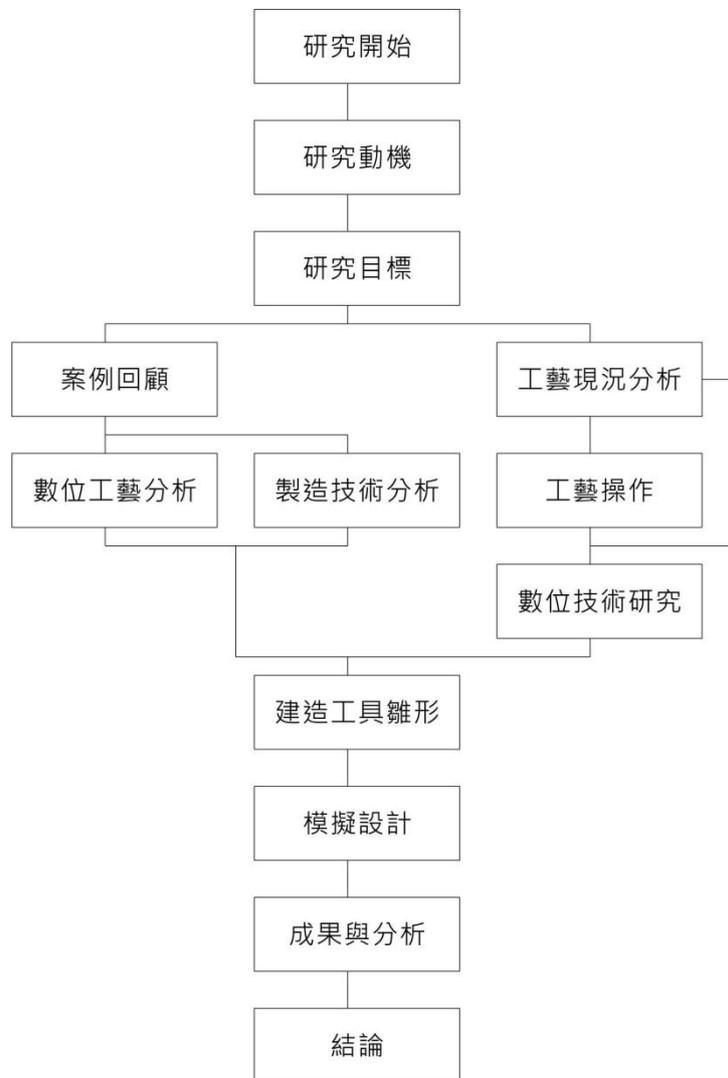


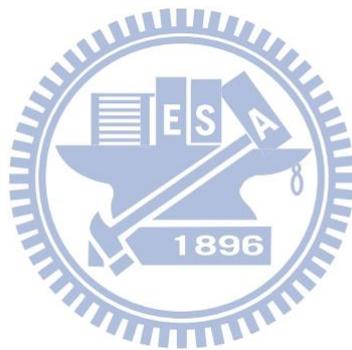
Fig 1-7 研究流程圖

(1) 傳統工藝與數位工藝的案例研究：主要是以研究工藝技術與數位科技和情感脈絡的交集為起點、配合其它相關之數位化工藝案例作為交互參照，尋找合適的傳統工藝，做為挑選合適工藝技術的基礎。分析所選數位工藝案例的媒材組成和技術操作，進一步討論新工具實做的可能性。

(2) 數位化工藝的建構：延續上一個階段的結果，進行傳統工藝的操作與分析所得到的

關於工藝的邏輯原理組成，加以拆解、比較和整理，進一步選建合適之工法進行數位化的增進其製造能力。在電腦輔助設計方面，以演算法協助設計者控制與尋找虛擬與真實的連結，控制 CAD/CAM 在這個過程中的參數，期望可以製造出真實的運作雛型 (Prototyping)，以驗證數位工具創造的可能性，與作為新數位媒材的設計影響實驗操作平台。

(3) 數位工藝影響下的設計操作：以新數位設計製造工具為基礎，針對：設計製造媒材、設計製造結構、與設計操作介面等三個設計手段進行實際操作與比較，並歸納這些操作與傳統工藝技法和當代數位製造的差異和轉變，最後整合創作之過程作為數位工藝設計者的範例與參考。



2. 文獻與案例探討

數位媒材不斷的發展，數位媒材與設計過程的關係也隨之改變：原本輔助性的工具腳色轉變為主導設計思考的設計媒材，這樣的轉變促使整個設計過程中，設計者在概念發想、設計思考及設計行為等地隨之改變，而這新型態的設計啜所謂的數位設計過程(Lynn, 1995)。由於數位媒材與技術的發展，數位媒材成為能讓設計者表達概念與想像力的強大而有力的生產與表現工具(Brady, 2003)

因此今日的設計師都在思考應用現有的電腦輔助設計製造技術加以整合，以因應不同的加工材料的可能，藉以獲得特殊的紋理、更快的速度、與嘗試不同的結構構成方式，使生產應付多元的空間與環境的需求，工具的製作與發展必須突破限制，發揮它在設計思考上的協助，並提高設計者的創造性(Luescher, 1996)。

2.1. 編織記號之背景

2.1.1. 結繩記事與數的文明

繩結記事(Knot Language)是文字發明前，人們所使用的一種記事方法，即在一條繩子上打結(Fig 2-1)。上古時期的中國及秘魯印地安人皆有此習慣，大約在 300 萬年前，處於原始社會的人類用在繩子上打結的方法來記數，並以繩結的大小來表示野獸的大小。即到近代，一些沒有文字的民族，仍然採用結繩記事來傳播信息。



Fig 2-1 繩結記事之結法

奇普 (Quipu 或 khipu) 是古代印加人的一種結繩記事的方法(Fig 2-2)，用來計數或者記錄歷史，雖然印加人那時還沒有一個數學記數系統或一種語言書寫法。它是由許多顏色的繩結編成的，不同的繩結有不同的含義。這種結繩記事方法已經失傳，目前還沒有人能夠了解其全部含義。在沒有書寫記錄的年代，結繩法也擔負了記載歷史的作用，這些歷史的結繩，一代一代地留傳了下來在他們的記憶庫裡，系結著印加帝國的信息，而且極為精確和切時。

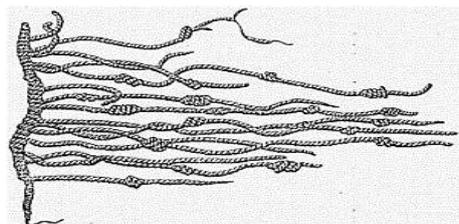


Fig 2-2 奇普結繩

奇普結繩法(Fig 2-3)是利用一種十進的位置系統在繩子上打結，奇普結繩法有時會輔以可以裝載玉米粒的計算盤，在上面可以用玉米粒來進行計算，而後再轉換為結繩，在幹繩中最遠的一行一個結代表一，次遠的一個結代表十，如此類推與累加以計算數量等等，在一股繩子上沒有結便意味著零。結的尺寸、顏色和形狀則記錄有關莊稼、產量、租稅、人口及其他資料和信息。



Fig 2-3 奇普結繩法

因此可以說數的概念和數學就是從結繩記數開始這樣逐漸發展起來的。距今兩千多年以前，在歐洲東南部生活的古希臘人，繼承和發展了這些數學知識，並將數學發展成為一門科學。古希臘文明毀滅後，阿拉伯人將他們的文化保存下來並加以發展，後來又傳回歐洲，數學重新得到繁榮，並最終導致了近代數學的創立。

2.1.2. 編織記號

編織文化也沿用了繩結記事，編織的步驟中，通常製作者會獲得以由大量的記號所組成的一組圖像(Fig 2-4)，稱之為花樣(Pattern)，各個記號及其所在的位置代表著不同的編織工法與順序。基本編織法以五種記號所組成：鎖針、短針、加針、減針、長針。

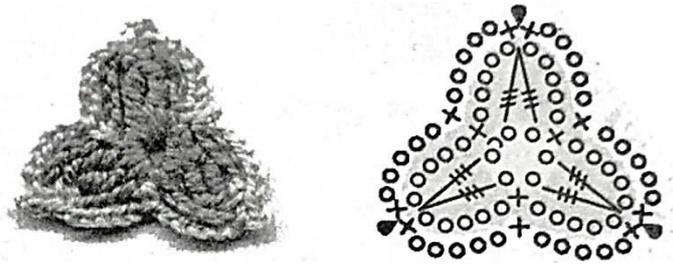


Fig 2-4 花樣

鎖針(Fig 2-5 A)的能力是製造圈狀的孔洞造型，由於鎖針是最簡易的編織法，故經常作為最初的編織起始。短針(Fig 2-5 B)是真實編織過程中使用頻率最頻繁的一種針法，由於穩定的可以藉由繩結產生六個線粗的塊狀單位，所以經常是作為堆積造型的填充元素。

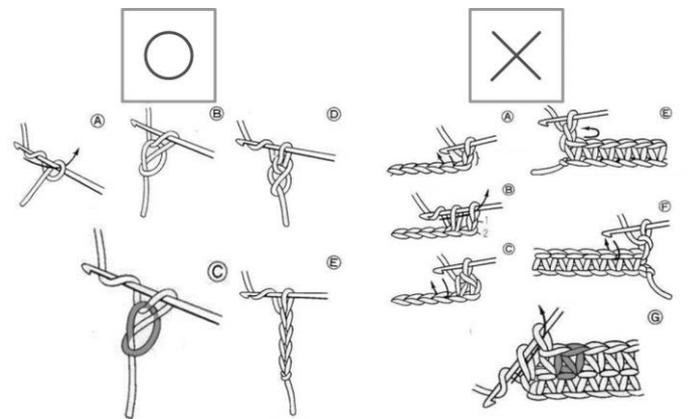


Fig 2-5 (A)鎖針及其編織法 (B)短針及其編織法

加針(Fig 2-6 A)的能力是雙倍的短針寬度，可以製造延伸的緯線，所以是擴大編織體體積的編織法。減針(Fig 2-6 B)的能力是合併兩個短針寬度為一個短針寬度，如此一來緯線的長度就會減短，是經常用於縮小編織體體積的編織法。長針(Fig 2-6 C)是用以堆疊兩倍短針長度的編織法，可以延伸經線方向的體積，也可以創造兩倍長度的紋理與連結不同紋理。

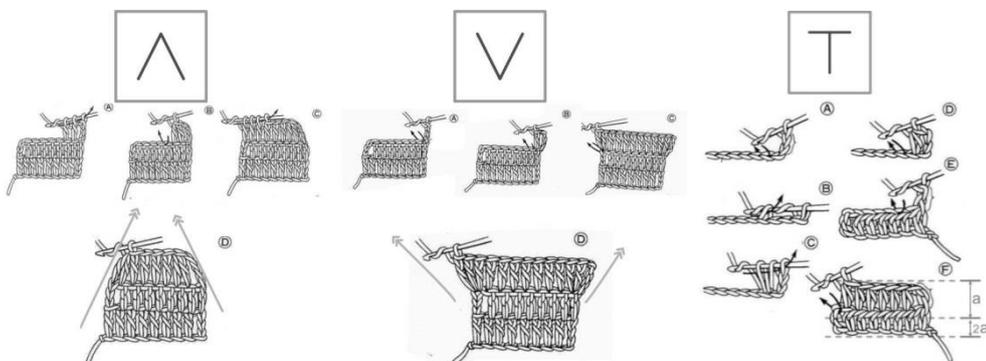


Fig 2-6 (A)減針及其編織法 (B)加針及其編織法 (C)長針加針及其編織法

以球型體結構為例的花樣，經常會是呈現由記號所組成近似於圓形的輪狀(Fig 2-7)花樣，這樣的花樣是用以告訴從事製造此編織花樣之製造者該如何按照一定順序逐一進行編織的動作，即可製造出與設計者構思之造型。

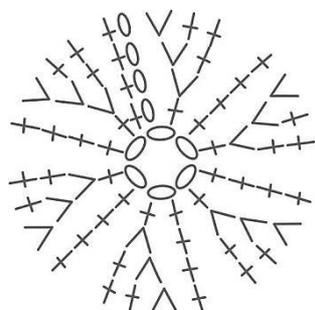


Fig 2-7 輪型花樣

通常輪型之花樣可以以兩種方式拆解，以讀取花樣中的設計資訊，第一種拆解是重複性之小組拆解法(Fig 2-8 A)，也就是以重複性之分配構成版面。以圖(Fig 2-8 B)為例，此花樣首先會先於中心創造由六個鎖針所構成的圓形，作為製造之起始中心鎖針群，由於鎖針是一種獨立的編織方式，最簡易於製造圈狀構造，故經常會作為排頭計數之用，而側邊的鎖針則告訴製造者本造型將會有四層構造所堆疊，接著以蛋糕切分的方式將記號區分為小組，如圖(Fig 2-8 A)一般，切割成六個小組，便可以這重複六次的方式構成此造型。

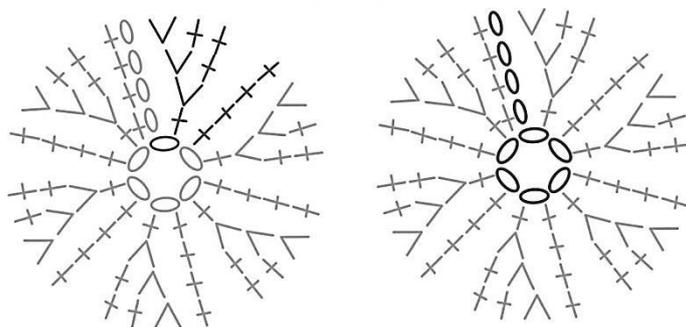


Fig 2-8 (A)小組拆解法 (B)編織之起始鎖針群與層數記號

第二種拆解法為螺旋拆解法，以鎖針群為中心起始(Fig 2-9 A)，按照順時針向外的方式依序以螺紋向外將記號拆解為一條長串之數列，便可以拆開解讀之序列(Fig 2-9 B) (僅表示部分)，因此製造者便可以得知如何逐一的製造堆疊之繩結已構成最終造型。

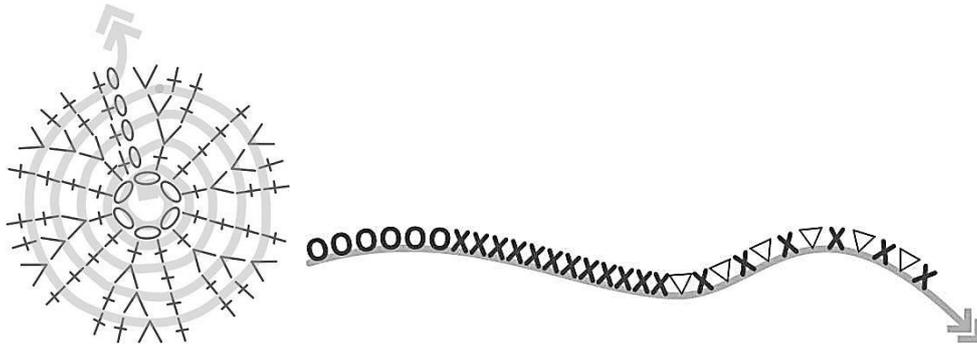


Fig 2-9 (A)編織記號之螺旋解讀法 (B)解讀後之加工序列

這樣的加工方式與加法製造之流程相當相似，每個構成的原件都可以記錄所製造的資訊，例如鎖針就會呈現扁平的圈紋，長針會出現長形的線條紋路，而短針則會出現顆粒狀的紋理，這些紋理的組合便構成最終的造型。

由此可以看出編織記號與序列對於最終產出之造型之間的關係，一般在設計者構思所需要的造型時是憑藉經驗以預測所需要之針法及針數，在描繪花樣後藉由實作間的來回參照修改微調花樣與實體間非預期之誤差。其後之施工者，僅需解讀其花樣即可複製其施工過程得到相同之編織成果。



2.2. 傳統編織技術織法研究

在所有工藝美術的類別裡，編織具有強韌的生命力與廣大的普遍性。編織從服飾、室內鋪陳裝飾及生活實用品發源，加上材料針、線、布普遍易於取得，從生活實用品裡誕生，並走向更精緻藝術化的方向發展，是人類創造的意志和情感的展現，其演進過程因時代、地理環境、經濟條件、階層性、文化技術、民族時尚和審美觀的不同而展現迥異的風格。

緊密依存於每個時代的物質條件下演進，如：針從古代的骨針到極為細小的鋼針，乃至於勾針以及現代化車針；色線從單純的單色染色技術色階到上百種的色階選擇，乃至於今日加以科技纖維的混紡；編織工藝的發展更串連著整體社會環境的織造、染料及運輸等產業條件的配合，乃至於今日電腦科技日益發達與普及，與數位製程可以達到更精準精密與高產出的現代化編紡工業。

用於服裝的紡織布料可分為三大類：機織（梭織）布料，針織布料與非織造類。前兩種是由紗織或長絲經過織造工藝織成的，後一種是由紡織纖維經黏合，融合或其他機械，或化學方法製成。可見圖(Fig 2-10)，三種織法的紋理與組成各不相同。

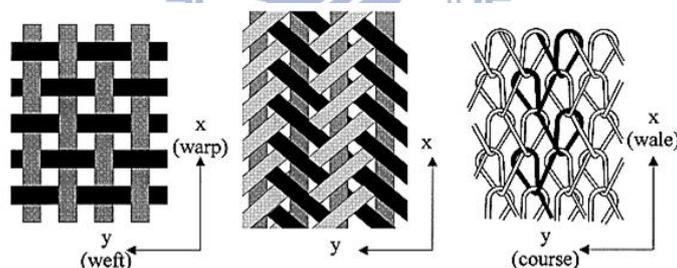


Fig 2-10 梭織、三軸梭織、與針織的織理差異

(1) 梭織 (woven garment)：經紗與緯紗相互垂直交織在一起縱橫交錯形成的織物。織品上縱向紗線稱為經紗，橫向紗線稱為緯紗(Fig 2-11 A)，按照一定的規律互相交織成組織點，其基本組織有平紋(Plain Weave)、斜紋(Twill Weave)、及緞紋。

織物中經紗浮於緯紗上面的組織點稱為經浮點，相反的緯紗浮於經紗的組織點則稱為緯浮點，不同特性組成的機織便發展出織紋，通過綜片的上升及下降，不斷運動及緯紗不斷往返，決定織機上的綜片的數目和穿過綜眼的特點，編織成各種燦爛繽紛的花紋。

當代梭織機(Fig 2-11 B)是由傳統梭織機所進化而來，基礎構成是由一組上下互動的排線來協助經紗交錯，而後由梭子穿梭於交錯之間讓緯紗編成布面。工業化的製造機台可以

提供產量與速度，也可以控制紗線的色澤，但編織面積必須與機台面積所控制，若需加大編織面積，則機台也須相對容納其寬度，故施作的環境與廠房必須消耗大量的空間。

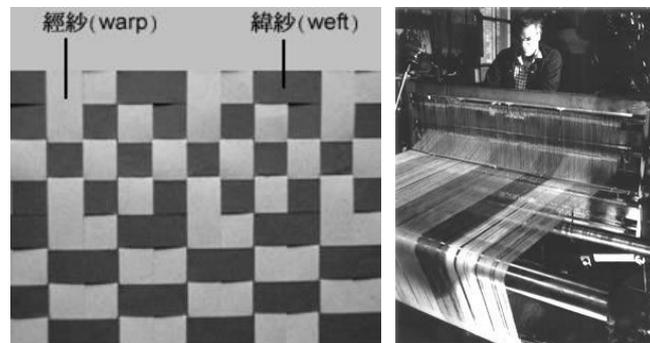


Fig 2-11 (A)平紋梭織布經緯結構 (B)工業化梭織織布機

(2) 針織 (knit garment)：針織布組織是通過織針上上落落的動作把紗線形成線圈，再把線圈相互串套緊扣相連為針織片而成，由於針織物的線圈結構特徵(Fig 2-12 A)，單位長度內儲紗量較多，因此大多有很好的彈性。針織布的織造方法，主要有緯編和經編兩種：緯編是在織造時線圈橫向一個連一個編織出來，同一刻只有一枝織針出線圈，經編是所有織針同一時間運作，一刻內以垂直方向產生一排線圈，在市場上，大部份都是緯編產品，因為成品彈性與色彩圖案變化較大。常見的有：平紋布(Jersey)、雙面布(Interlock)、籬紋布(Rib)。工業化生產的設備受編織機具的運作方式影響多是圓筒型(Fig 2-12 B)，以方便重複性的讓勾針對線圈做加工。

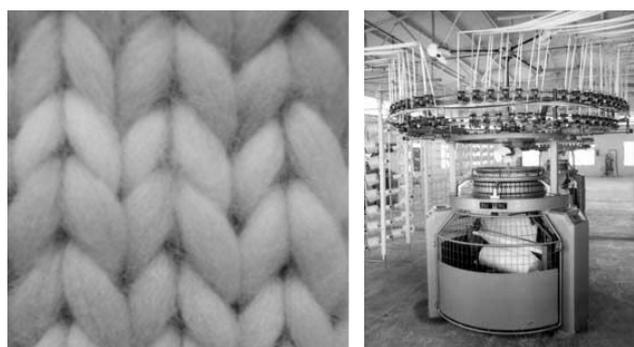


Fig 2-12 (A)針織布線圈結構 (B) 工業化針織布圓筒機

(3) 非織造布(non-woven fabric, non-woven cloth)：又稱不織布或無紡布是一種以針軋機械或梳理機械處理各種纖維原料，用高壓形成或粘合生產的一種布狀物(Fig 2-13)。非織造布紡織袋可用任何纖維作材料，這些回收纖維能經過紡織品回收廠低成本運送作進一

步加工使用。纖維可以是布碎或人造纖維合成纖維、膠、或樹脂，原料常含聚丙烯 Polypropene(PP)，因此非常容易材料取得與製成。

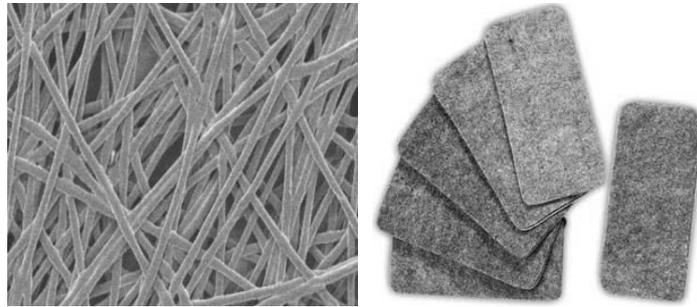


Fig 2-13 不織布結構 Non-woven Fabric Structure

非織造布不像織布由經緯編織而成，非織造布的製成隨著工法的不同而有所變化，常見的是針軋法是透過數千支針刺不斷的上下刺鉤棉花(Fig 2-14)，讓棉花藉由推拉而穿透面料彼此糾結，每一次的糾結會讓棉體越來越紮實達到連接或塑形的目的。

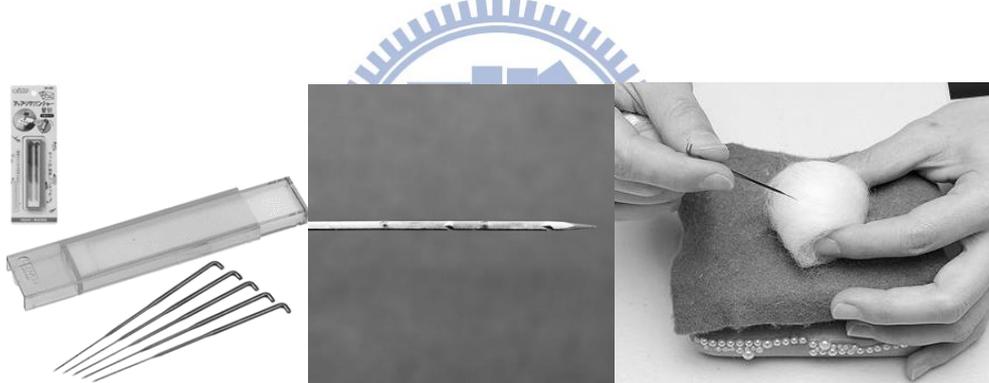


Fig 2-14 不織布戳針及其加工法

2.3. 參考案例

2.3.1. 案例一：Dreamweaver

Dreamweaver (Joao Albuquerque,2010)，這個研究藉由操作手搖編織機與馬達的連結 (Fig 2-15 A)，使得編織機可以更快速而精確的控制針織的過程，其中正反的單邊堆疊所形成的轉折角(Fig 2-16)及數量累積與停止點所形成的節點(Fig 2-17)等兩個研究重點，可以達成在空間上實體造型的影響預測。

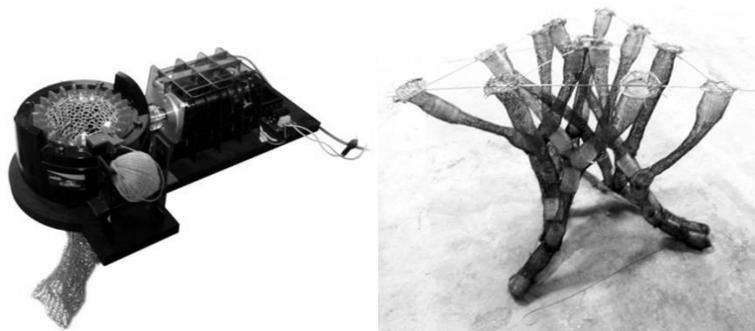


Fig 2-15 (A)Dreamweaver 本體 (B)叢簇的生成

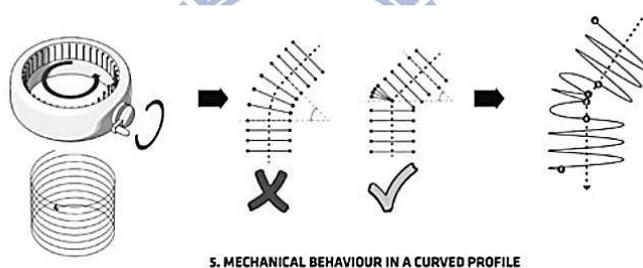


Fig 2-16 Dreamweaver 轉折角的生成原理

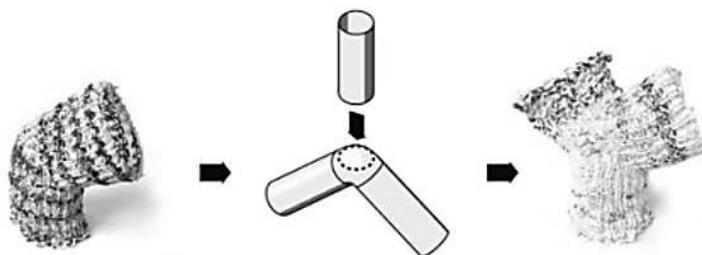


Fig 2-17 節點的生成

在可以控制管狀結構的生成後，以金屬和塑化材料編入筒狀體中加強編織物的強度，讓結構具有獨立性、允許筒狀結構形成更多向度的構造體，然後和接鄰的其他筒狀體集成具有叢簇、聚落性質的仿有機體(Fig 2-15 B)，展現控制的轉折與結點的混和操作。本案例作為連結機器操作實體互動的電子元件也讓這個作品在虛擬和實體間獲得更精準的預測和更快速的施作。

2.3.2. 案例二：Fibrous

Fibrous (Marta Malé-Alemany / Jeroen van Ameijde,2009)，本作品目的在透過數位化控制設計和製造系統，發展建構一個集輕量、自給自足、易達成、快速施作的臨時屋。通過數位裝置控制的纖維有規則、角度、與力量控制下的方式多向度的纏繞在由 CNC 製造的標準支架(Fig 2-18 A)，讓天然纖維可以在任何地點都能精準的製造。經由程式數位運算控制局部的疏密(Fig 2-18 B)，對於能參數化調節結構、光線、通風等等環境因子提供了良好的基礎。

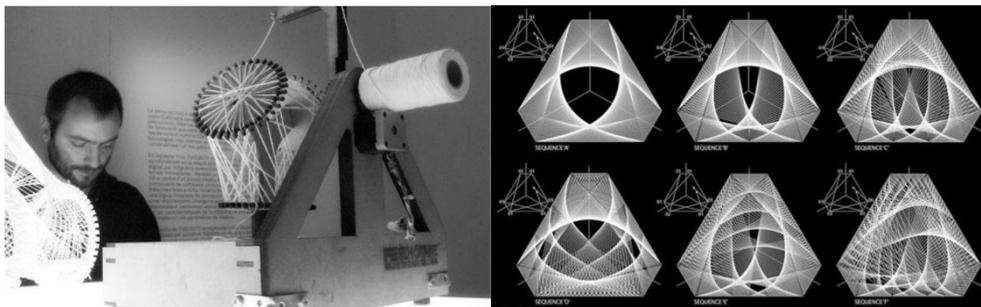


Fig 2-18 (A)Fabrous 本體 (B)數位運算控制

此研究在運算轉折點於空間中的位置而後，於自製機台中搜尋並到達指定的空間卡樺位置有非常好的控制(Fig 2-19 A)，在簡易但限定造型的骨架裡可以準確的迅速圍繞出纖維表皮具有相當高的成就，施作的骨架造型是限定(Fig 2-19 B)，以球形作為機底分割的多邊形做纏繞，所以儘管最終有對於多單元連結的想像卻尚缺乏達成的細節。

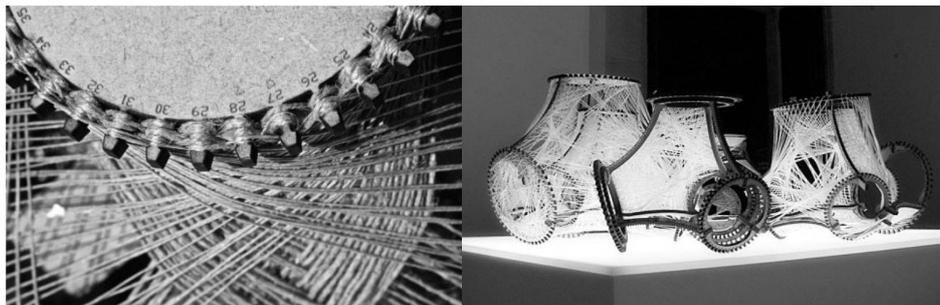


Fig 2-19 (A)Fabrous 的卡樺結構 (B)骨架與最終成品造型

2.3.3. 案例三：The Craft of Thread

Craft of Thread Wrapping (Anton Alvarez,2012)捆繩機是傳統製繩與包裝產業使用經年而成熟的機具，經由利用傳統編繩打包機(Wrapping Machine)的束縛力，改裝並重新設計機台的形式，使得其中可以置入木塊，重複性的纏繞線繩累加的力量集成作為物體與物體間的新連結方式(Fig 2-20)。



Fig 2-20 捆繩機接合法與其接合細部

在快速轉動的轉盤中纖維會因為離心的力量而具有緊縮的張力，經由電動的馬達幫助讓接合的方式更迅速、具方便性、可調整性、可變動性、與保有創造的自主性，可以取代傳統的鉚釘與卡榫，在不破壞材料的本性與形狀的情況下仍能提供有效的接合(Fig 2-21)。

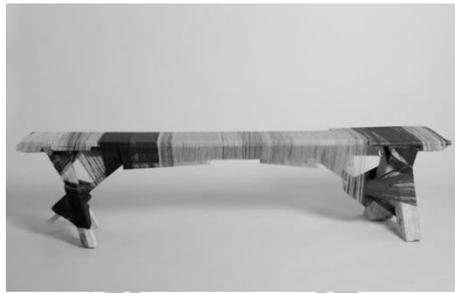


Fig 2-21 複數結構接合的成品

2.3.4. 案例四：Digital Matter

Digital Matter (Joris Laarman, 2010)數位化的材料的基本物理分子相似，以單一粒子(pixel)來構成巨大物體，但物質與物質間的接合就是最大的挑戰，利用磁性的接合讓組裝可以重複組裝，操作機械手臂並重新計算每次加入新粒子的新磁場秩序(Fig 2-22)，並精準的置入新粒子的位置讓數位模型可以在無膠合的狀態完成。



Fig 2-22 控制磁力粒子的手臂

是故本案立即是以數位控制之電腦手臂協助加工虛擬之模型成為真實模型的過程，同時需要計算粒子的位置與粒子正負極之間的接合狀態是本案例最重要的成就，最終的造型可以展現磁鐵顆粒的紋理及結構(Fig 2-23)。

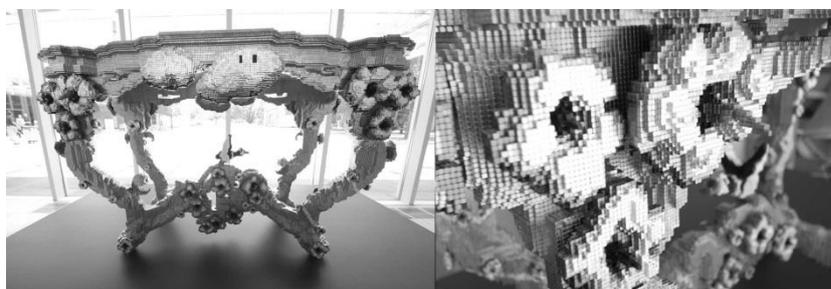


Fig 2-23 磁力粒子所構成的快速成型家具

2.3.5. 案例五：Dry Run

Dry Run (Riccardo La Magna, 2012) DryRun 是由德國斯圖加特大學建築系的 Menges 教授所帶領的實驗性數位設計團隊 Institute for Computational Design (ICD) 所完成的小型展覽場地臨時結構物。

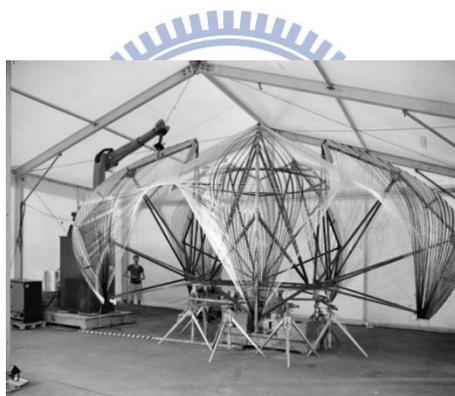


Fig 2-24 DryRun 作品製作環境

研究是從電腦出發，研究線狀的材料如何組成一個空間，以及紡編的卡樺結構如何由機械手臂精準地控制操作路徑，在現場環境中達成快速成型的空間(Fig 2-24)。首先由鋼構架的旋轉體開始製作，並設計繃緊卡樺與卡樺間的鉤狀機系手臂作為工具(Fig 2-25)，而後聯集軟體端的計算後，藉由機械手臂纏繞緊繃線狀的表面於 CNC 製造的片狀卡樺結構體，多次實驗混和材料並添加與塑料，最終使線繩上的塑料凝結後達成足以單獨挺立的棚狀體(Fig 2-24)。可以從中看到對於軟體模擬以及實體機械的控制性以及真實比例的大型空間實踐的可行性。

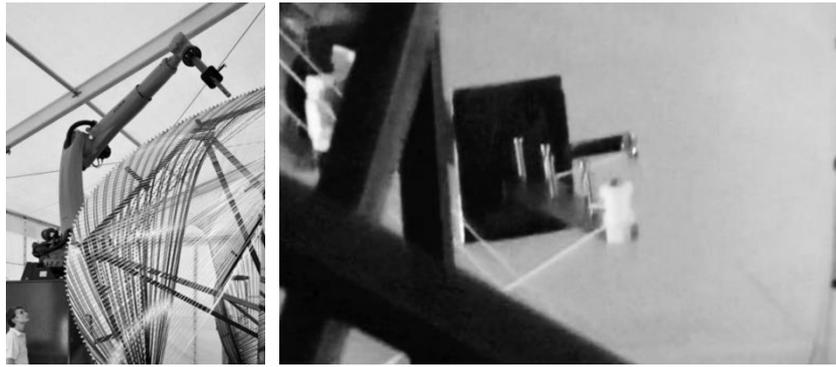


Fig 2-25 (A)機械手臂施作中狀態 (B)纏線器細部設計

2.3.6. 案例六：Beady

Beady (Yuki Igarashi, 2011)本案例是由日本筑波大学 University of Tsukuba 的 Yuki Igarashi 教授的團隊所發展的立體資訊分析管理系統，該團隊致力於發展工藝技術的數位化分析與呈現。此研究提供一個完整的 3D 建模介面，並可在介面中直觀的運算並產生加工路徑(Fig 2-26)，使得使用者可以在一個介面完成設計與檢視施作的過程。

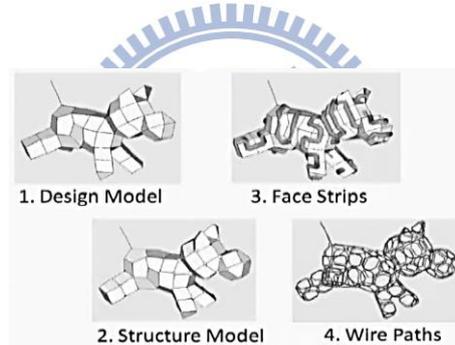


Fig 2-26 運算加工路徑的介面

軟體分析了 3D 立體模型圖像，對於串珠(Bead)與線繩(Thread)的關係進行運算，讓串珠粒子的二十六面結構性與線繩的連結方式可以一次獲得序列性的整理並且再現(Fig 2-27)，提供多面體加工資訊的圖面。

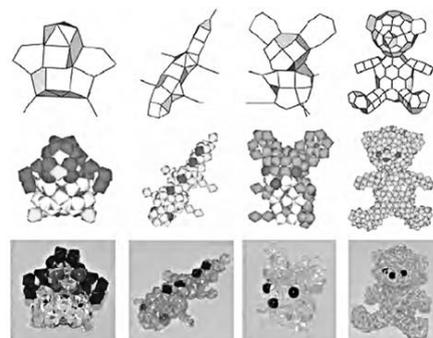


Fig 2-27 串珠粒子與多面體的關係

3. 工藝數位化的雛型建構

經由案例研究與現有工藝技術的探索，建構一個低環境需求、可以協助設計者連結虛擬與真實模型的電腦輔助設計製造過程是目前設計者普遍之需求，故本研究為了提供設計者更易控制設計產出之電腦輔助製造設備，研究設計者是否可以轉化既存之傳統工藝作為新時代數位工藝之用，

實驗以先期研究進行各種工藝的操作尋找合適之工法，而後以數位化工具實驗轉化與增進所選擇之機具及其加工流程，嘗試提供更好的運算建模界面與達成實體建模之輔助，展現新數位設計工具的特殊紋理與結構脈絡，為本章節之操作過程。

3.1. 編織機具的操作研究

3.1.1. 勾針織針具的操作研究

以針對纖維進行加工是最傳統的加工法，其中以棒針與勾針編織最常見。棒針編織較適宜於製造面狀構造，而勾針編織法較適宜於製造變動的曲面與量體，故本實驗由勾針編織的操作開始(Fig 3-1)。勾針編織所需之道具為勾針，而適應不同線材之粗細與材質有不同型號的勾針，一般由小到大區分為一到十號，可以製作不同尺度的作品，然操作法皆相同。

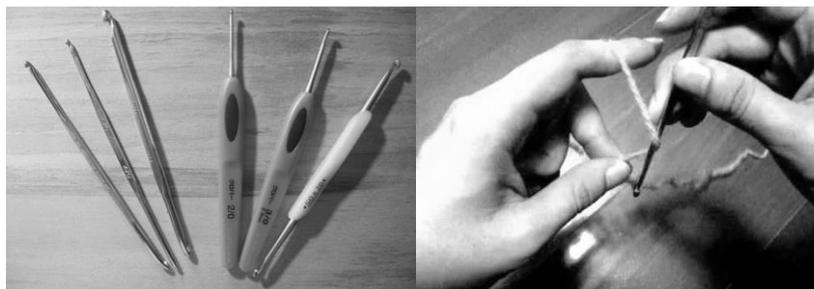


Fig 3-1 勾針及勾針手法操作

於實驗過程中進行球體和扁球體構造的製造(Fig 3-2 B)，經常會因為算錯針數、誤認節點位置、以及因為手工的熟悉程度或抽繩的緊實程度之不同之原因造成圈與圈之間大小的差異，因而導致球體造型的凹凸不平整狀況，可見純粹的人為疏失在編織造成的影響。但勾針所織造的曲面可操作性與預知性相當好，幾乎以同樣圖面的花樣而言(Fig 3-2 A)，製造出偏差率較低的相似模型的成功度很高。

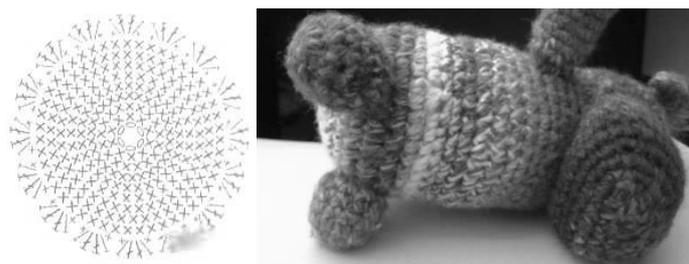


Fig 3-2 (A)勾針法放樣圖例 (B)勾針操作成品

3.1.2. 不織布戳針針具的操作研究

不織布的加工法是藉由戳針的倒鉤將纖維戳入或拉出，使纖維貫穿織片之間達成連結和緊實的加工法。為避免織片塌陷變形，加工中需要在織片之後襯以支撐物(Fig 3-3)，常見的是海綿或長毛膠刷。實驗進行中也嘗試了可以移除的撐材，如異色布料與海鹽，其中海鹽法雖然尚缺乏穩定性卻非常具有量產的可能性。戳針的操作難度雖然不高，但暫時無法以機械方式增進生產效率，故於實驗後不予採用於本研究中繼續發展。



Fig 3-3 不織布的戳針法實驗

3.1.3. 傳統式編織器

為了增進針織法的效率，傳統上會使用編織輔助器來協助固定編織的織體與計算編織的數量，如此一來便可以更穩定的控制編織體以免塌陷，也可以降低針樹的失誤。常見的編織輔助器有城堡編織器、釘板編織器，都可以經由框架來穩定編織物的形狀，加速編織過程，並讓針數統一不會因為人為疏失的關係而有疏漏而減少或誤算而增加的情形。

傳統型編織器大多可以藉由單元的組合來延長編織面積，也就是說越多的輔助片之組合編織器，單一製程就可以獲得更大的織物面積或可以利用以製造更多變化圖樣。

實驗首先操作了城堡編織器(Fig 3-4 A)，城堡編織器組成的單元片由三齒至六齒的卡槽構成，越多齒的單元片可以編織密度更高的編織體(Fig 3-4 B)，相反的是密度越低的可以編織出較稀疏的編織體。使用城堡編織器實驗同時也嘗試了混紡編織(Fig 3-5 A)，也就是在單一的編織纖維中加入第二或第三種以上的其他纖維材料，如：毛線、紗線、金屬線等，藉由不同的材料特性之組成讓編織物獲得更多的屬性，更強的張力或收縮力(Fig 3-5 B)、更密實的網孔、或更強壯的結構性等。

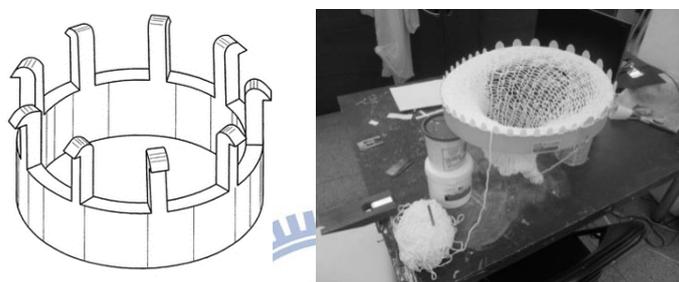


Fig 3-4 (A)城堡編織器 (B)城堡編織器織法實驗

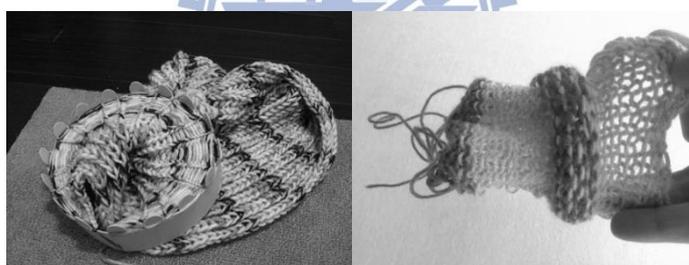


Fig 3-5 (A)城堡編織器之成品 (B)異色混紡實驗

而後實驗釘板編織器的操作，釘板編織器(Fig 3-6)可以協助計算編織的面積，釘數越多則編織面積越大，釘距越密則編織密度越高。釘板編織的困難度較低，製造的速度快，但較難操作具有空間性的改面的編織體，大多是以編織平面的圖像花紋為主，考慮與機器的結合可能性也較低後不予採用於本研究中繼續發展。

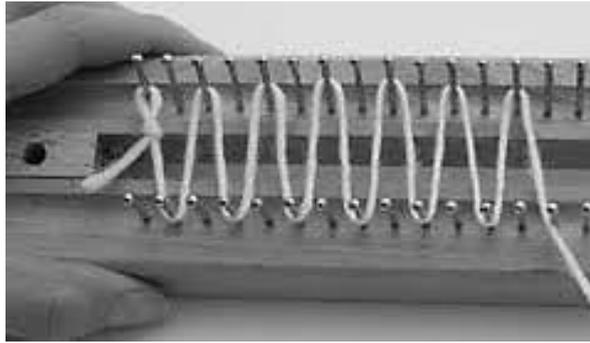


Fig 3-6 釘板編織法

3.1.4. 捆繩機接合法實驗

纖維經過整理成為紗線，多根紗線扭在一起形成一股，而多股再扭合、藉由多條纖維的旋轉與交錯，讓纖維纏繞再一起以獲得更高強度、高韌性的纖維束後，就成為繩。傳統的製繩採用天然纖維作材料，現代可以用來制繩的合成纖維、人造絲等。捆繩機是最早的繩索製造機械(Fig 3-7)，可用與生產各種圓絲、單絲、棉、麻、纖維絲束等製成繩子，在一次連續操作下製成三股或四股的成品繩，減少了製股到製繩的工作程序，特點是節省時間、減少人工與勞動強度。



Fig 3-7 捆繩機的構造

為了應用捆繩機之機能，本實驗繪製並組裝小型壓克力捆繩機模型(Fig 3-8)，仿製利用離心力束緊繩索的纏繞方式，利用其緊縛的力量讓物體可以不靠黏合或螺牙的方式緊固(Fig 3-9 A)。實驗的結果尚佳，具有應用複數纖維絞和力量接合兩物件之能力(Fig 3-9 B)。不過由於缺乏第二向的繩索，讓繩與繩間的摩擦力加大以及齒輪磨合的順暢度，應該要再附掛才能真正達到理想的操作。而且纏繞後的物件間的關係難以預測，經常會有誤差所累積的角度變化，幾乎無法達到精準的施工。

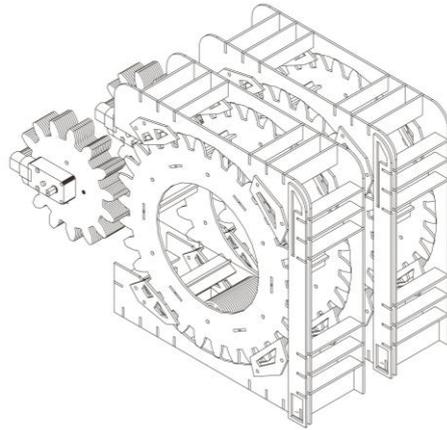


Fig 3-8 捆繩機制作圖

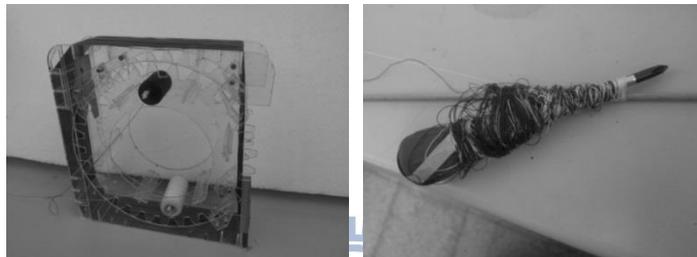


Fig 3-9 (A)捆繩機實驗機具 (B)實體施作成品

3.1.5. 手搖式編織機

手搖式編織機(Spool Knitter)是以手轉動搖把作為動力，藉由機械式的勾針重複動作而讓編織的速度與效率提高的一種編織輔助機具(Fig 3-10 A)。手搖式編織機具有三個構造：其一為一組成環狀圍繞的特殊勾針絞件，這些勾針絞件下端為滑軌，使得勾針絞件得以上下滑動，上端則為可以在上下滑動過程中配合編織繩的粗細與位置對編織物進行繞圈形成繩結的勾槽(Fig 3-11)，如此一來在勾針絞件一來一往之間，勾槽便對編織物多新增一個繩結的纏繞；第二個構造為動力搖把，動力搖把內部為一組兩片呈 90 度對接的齒輪，因此可以轉化搖把的順時針或逆時針轉動為編織的動力，讓勾針可以在滑軌間往復製造繩結；第三個構造則為筒狀的製造平台，這個製造平台可以穩定編織物、塑造編織物的造型，並且引導編織物前進，讓線繩不會堆積在手搖編織機平台中造成混亂。



Fig 3-10(A)手搖式編織機 (B)編織機實驗操作

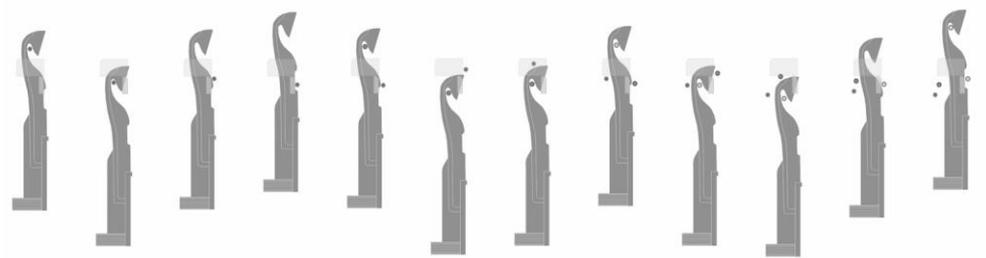


Fig 3-11 手搖式編織機的紋件運作模擬

一般市售品約在 19-24 針左右，約略可以織造襪子尺寸的筒形，而最大的販售品大約在 48 針上下，則可以織造毛帽或圍巾尺寸的織造物。但受限於台座尺度的大小，缺點則是編織的尺寸也會被限制、織法也較缺乏變化。另外有小型尺寸的手搖編織機，這種手搖編織機只有四個針，可以製造線性的索狀編織物。



Fig 3-12 手搖繩索編織機之運作與產出之編織物

實驗操作小型手搖式編織機(Fig 3-12)時，可以獲得由四組線圈所構成之編織繩索狀編織構造(Fig 3-13 B)，這樣的鎖狀構造由於筒狀加工平台的尺寸關係會在完成時由筒狀平台

(Fig 3-13 A)之內徑 2.2mm 縮減至 5mm，也就是說這是一個具有彈性的管狀構造，四組線圈是可以有彈性的構造，編織物可以有伸長與縮短的能力。



Fig 3-13 (A)手搖編織機的筒狀加工平台 (B)編織機所生產之編織物

而由於手搖把內所連結為六十齒之斜角齒輪而施作平台則連結一八十齒之斜角齒輪，這樣的齒比構造(Fig 3-14)讓手搖之圈數直接轉化為線繩構造之長度，也就是每旋轉 1.5 個迴圈後即可以得到延伸四個套圈的編織構造，而每四個套圈即為此編織物之一緯高度層，故可以藉由旋轉之次數估算線繩的長度產量。

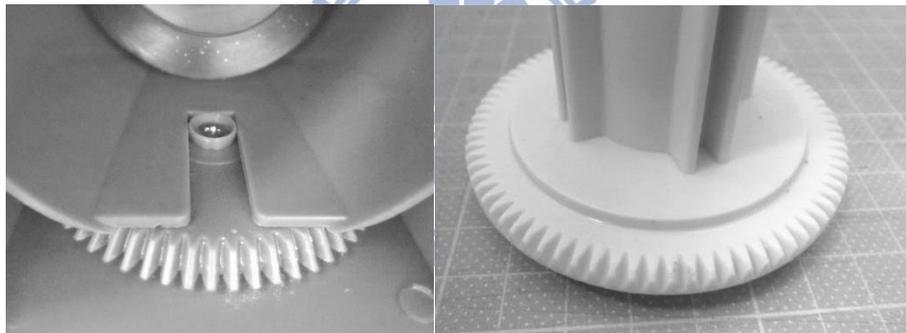


Fig 3-14 手搖把與內平台之齒輪比

在傳統編織技術中，填充材料於編織物中以獲得膨脹的物件是相當常見的技法，這樣的工法可以使得單純的編織物更具有空間性的結構，而由於手搖編織機所創造之管狀空間施工過程與造型適宜於操作填充物，故嘗試在繩索狀編織體的管狀空間製作過程當中，加入填充物(Fig 3-15)以使編織物藉由填充物改變或擴增其性質。



Fig 3-15 管狀空間的填充過程

經由填充材料後的編織體成品(Fig 3-16)可以觀察到其外觀特性呈現出一種不同於單純編織的節狀構造，而這樣的節狀構造同時具有標誌內容之團充物長度與填充物所蘊含之色澤、硬度等性質。

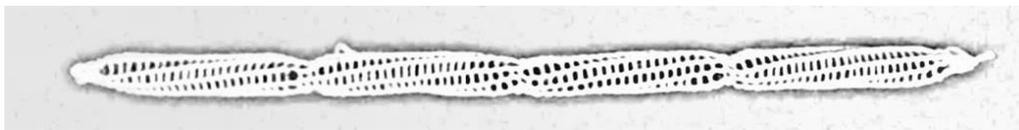


Fig 3-16 填充後編織體成品

即於填充只管材料處可見其膨脹擴大的部分，在連續的編織物中具有標誌其長度與內容物的能力，如果填充不同之材料，則編織物就具有不同的特性與尺寸大小，同時具有編織的序列控制與脈絡紋理的保留，其中管狀空間的連續性，即是一種資訊(Informations)及紋理的串聯序列(Series)，也就是說，這樣的管狀空間內的材料會脫離空間中的獨立性而藉由編織記號會成為具有關係的序列(Fig 3-17)，被鎖定在特定的地點而能夠保持製作過程的資訊，而這樣的關係是現代數位加工法所欠缺的。

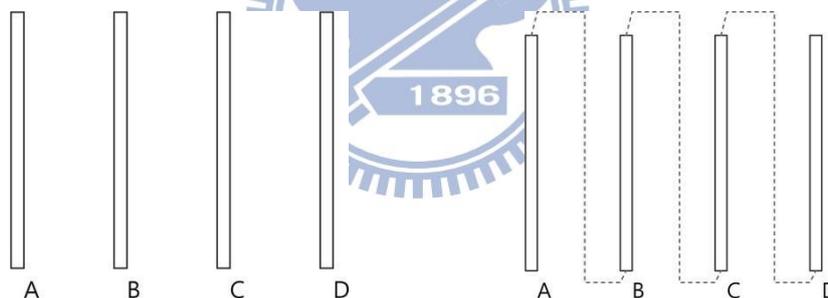


Fig 3-17 個別獨立的物件與具有序列關係的物件

3.1.6. 工藝加工模式轉化的選擇

現今的數位加工法可以對於材料進行塑型與製造，但卻缺乏對於施工流程的掌控。以雷射切割之家工工法而言，切割成品之構件為散落之片狀材料(Fig 1-1)，若是物件體積龐大，則可能有千片之多，對於如此龐大的零件數量要進行管理以及控制施工順序將會是相當繁複的一件工程。

而編織機所產生之物件是一種接近線狀的構造(Fig 3-16)，如果以線狀加工輔助設備用以建構空間模型，則會跳脫傳統減法製造的片狀構成結構與堆疊的紋理，例如要構成一個

四邊形的面，就可以用四段相同長度的編織體來組成造型(Fig 3-18)，而這樣的結構與紋理應該可以提供設計者不同的設計思維。與傳統線狀結構不同的是，這樣的結構系統是具有連續性的，所以在結構的考慮上又會是一項新的嘗試。



Fig 3-18 編織體構成四邊形的面造型

且編織機具以現有之機械構件，已經足以操作控制加工材料之性質，若能經由數位化之方式加入可以更快速而精準的量產機制，提供施工之運作動力與控制運算，編織機就可以成為新的輔助生產設備，提供設計者增進速度與控制內容物特徵的製造方法。

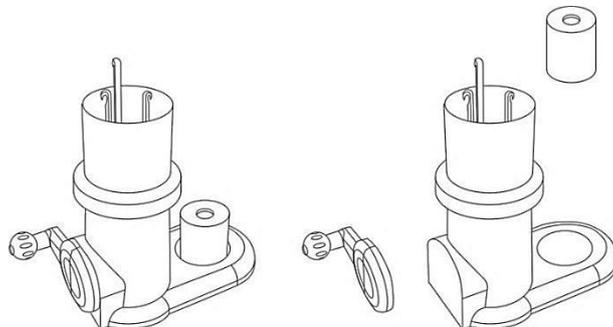
因此本研究選擇手搖式編織機作為平台，嘗試以機組目前之機能與工法作為基礎，擴增其操作的使用介面與延續其操作流程，以作為新的電腦輔助設計製造設備，提供設計者新的設計工具。



3.2. 輔助設計製造設備雛形的製作

3.2.1. 分解雛型元件

經由上一小節之傳統工藝操作，選擇了最為貼近本研究實驗目的之手搖式編織機作為電腦輔助設計製造設備之原型。為了使傳統手搖編織機與數位系統結合創造新的輔助設備雛形，故本研究首先將手搖編織機之機組拆解，將機組分解為：動力組件、材料與輸出控制組件、序列勾針組件(Fig 3-19)，以方便進行機能擴增之研發與安裝。



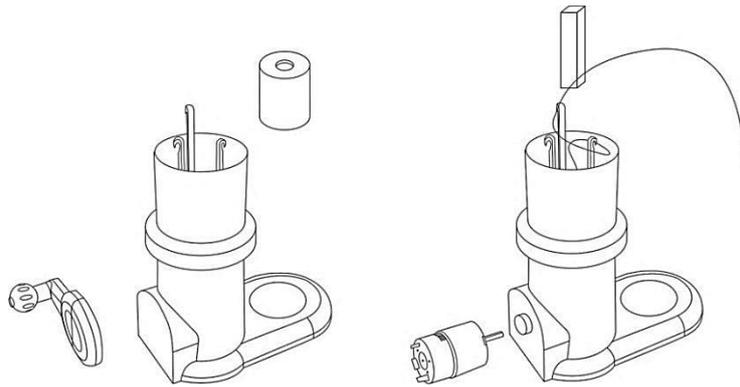


Fig 3-19 編織機數分解組件

以目前的機能考量，實驗將會以現有之硬體介面增加機台運作之速度與精準度為出發，而後考慮參數化運算其製造流程與介面之設計，最終連結由虛擬至實體之製造(Fig 3-20)，以提供 3D 模型轉化為建造真實模型的施工指引為目標。

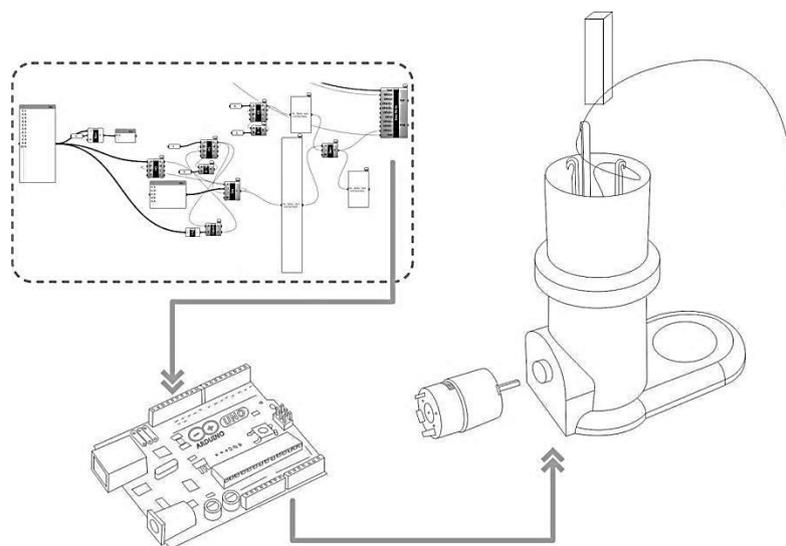


Fig 3-20 編織機數位化連結示意圖

3.2.2. 加入電腦輔助控制元件

在加入輔助控制元件之實驗操作時，需要考慮將可數位控制之動力，裝載於機組之動力端以取代手動之動力組件，而後需考慮固定裝置之穩定性與其他輔助運作之能力。故首先將伺服馬達(Servo Motor)固定於編織作為運作之動力(Fig 3-22 A)，初步的模擬機組可以於無負載狀態時運轉(Fig 3-21)，但一旦開始進行編織毛線之運動，伺服馬達就會遇到動力不足與卡齒的狀態，本機運作時也有晃動的狀況，所以初步的模擬得出了輔助控制元件可以進步的方式。

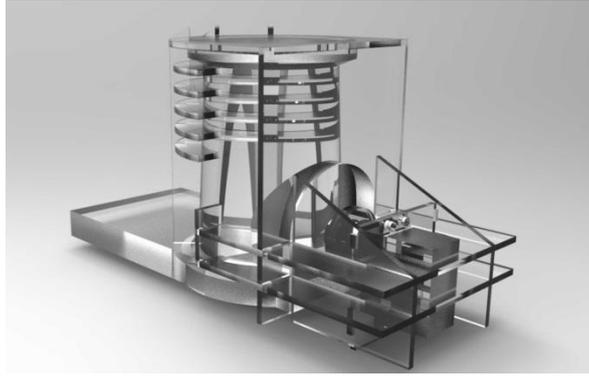


Fig 3-21 數位化編織機初步模擬

由於第一次的動力明顯的不足，改進版的動力採用強扭力直流減速馬達(Fig 3-22 B)作為動力源，由於電壓由 3.3V 提升至 12V(Fig 3-23)，轉速也相對提高到 150rpm，故施作的速度與力量、精準度都上升了，結構也強化至穩定狀態(Fig 3-24)，如此便完成可以順利的使動力構件轉動機台絞件產生編織體之數位化編織機(Fig 3-27)。



Fig 3-22 (A)伺服馬達 (B)強扭力直流減速馬達

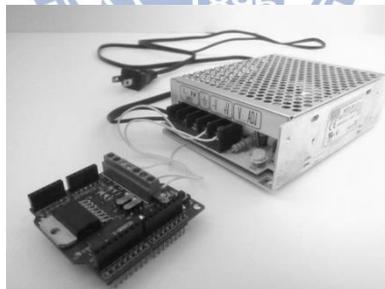


Fig 3-23 馬達控制板與 12V 電源供應器

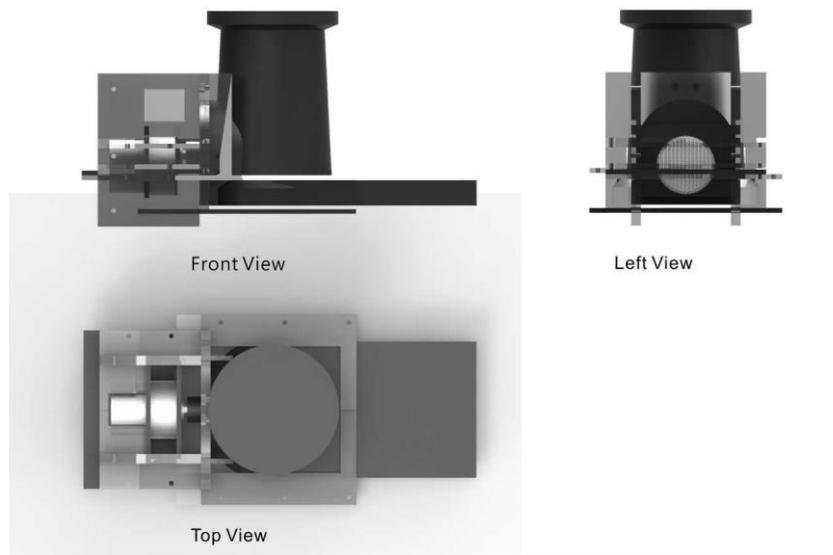


Fig 3-24 數位化編織機製作設計圖

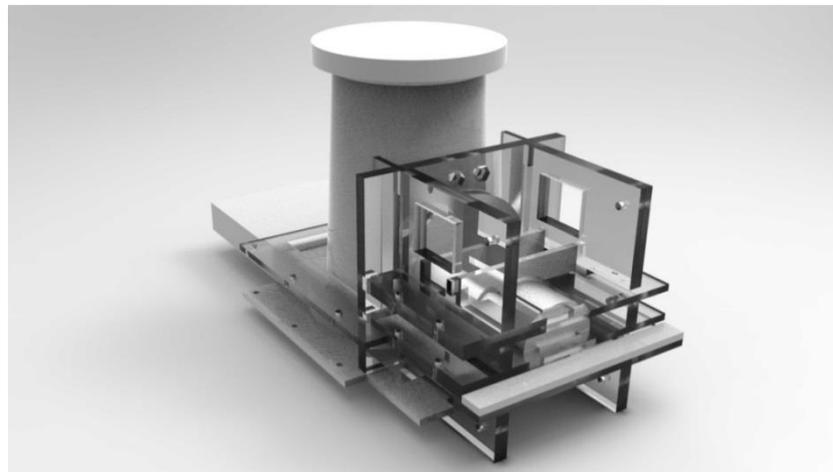


Fig 3-25 數位化編織機製作設計 3D 圖



Fig 3-26 實際改裝之狀態

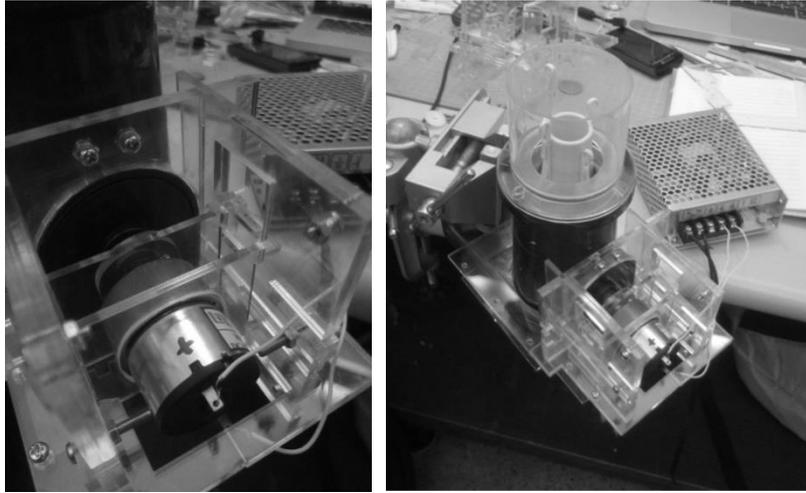


Fig 3-27 (A)編織機之動力結構 (B)數位化編織機成品

3.2.3. 電腦輔助軟硬體工具選擇

為了可以經由參數化運算與驅動數位化的編織機，連結設計與製造的落差，本實驗需要同時具備虛擬端的軟體運算介面與實體端的硬體連結驅動。考慮到本研究是以設計者所能掌握之當代電腦輔助設計運算工具，所以透過搜尋與研究後，選擇進行以下之相對應軟硬體進行運算介面之操作。



(1) Rhinoceros

Rhinoceros 是由美國的 Robert McNeel & Associates(McNeel)公司做為船舶模型電腦化，所研發的專業的 3D 立體建模軟體，用以驅動造船廠的數位化工具設備，具備可同時建模、彩現、分析、形構工具使用，功能最強大的 3D 開發平台。因為所內建的曲面工具可以精確地製作複雜的表面(Fig 3-28)，用以作為彩現、動畫、工程圖、分析評估以及生產用的模型，故廣泛的被工業設計、建築設計、玩具與珠寶相關等產業。

Rhinoceros 是個開放資源碼的軟體，所以已被開發了相當多元的輔助性外掛工具，例如：Grasshopper、Rhino.Python、RhinoScript 等等，目前推出的相關商用外掛程式已超過上百種。由於自由性與功能性的拓展，越來越多的設計師可以自行使用這些設備製造 3D 模型，在建築設計的使用至今已經相當的廣泛。

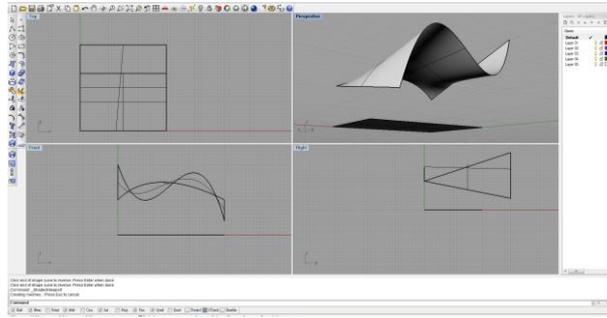


Fig 3-28 以 Rhinoceros 介面繪製之曲面

由於本研究意圖於探索虛擬設計界面與實體製造之間的連結，需要一可建構虛擬 3D 模型之介面。Rhinoceros 因具有易操作的曲面建構模式與強力的 Mesh 運算系統，可以協助結構與造型的塑造，並具有上述之眾多外掛能力，尤其以 Grasshopper 之參數分析與建模功能符合本研究之需求，故採用 Rhinoceros 作為研究之平台。



(2) Arduino with Firmata

為了獲得數位資訊轉化為控制伺服馬達等電子原件的能力，所以本實驗需要提供設計者更加貼近真實製造環境的介面平台。Arduino 是一個開源的單片機控制器，它使用基於開放原始碼的軟硬體平台，並具有使用 Java 基底的類似 Processing 程式開發環境，讓設計者可以快速使用 Arduino 編寫運作機制並作出互動作品，而且 Arduino 的快速插拔接腳的能力，讓設計者可以更容易地使用開發完成的電子元件例如：光、溫度、距離或方向的感測器，或其他控制器件、LED、伺服馬達或其他輸出裝置。

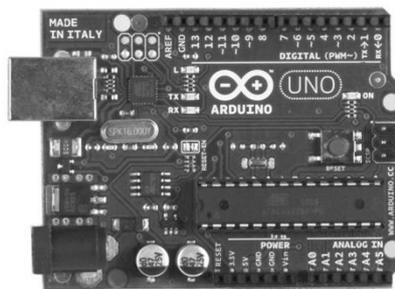
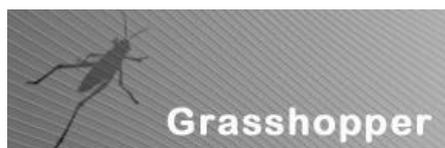


Fig 3-29 Arduino 的介面

Arduino 藉由強大的晶片，也可以獨立運作成為一個可以跟其他軟體溝通的介面，例如說與 Processing、Max/MSP、Pure Data 乃至於 Rhinoceros 等繪圖軟體互動。經由 Firmata 通訊協議的外掛 Library，Arduino 用來和電腦上的軟體進行資訊的交換與運算變得更多

易，如此一來設計者就可以在 **Arduino** 開發環境裡寫自訂需求的程式，而不用再重寫通訊協議和元件，是一種相較於過往更方便和易於操作的電腦輔助控制設備。

由於編寫的困難度降低，以及連結各種電子元件的便利與穩定，**Arduino** 充分的提供設計者更加貼近真實製造環境的平台，因此本研究採用 **Arduino** 可以獲得數位資訊轉化為控制伺服馬達等電子原件的能力，作為連結設計與製造的介面。



(3) **Grasshopper with FireFly**

Grasshopper 是 **Rhino 3D** 的外掛模組之一，由 **David Rutten** 所開發，它是一種圖形界面的演算編輯器(Fig 3-30 B)，把原本 **Rhinoceros** 的建模指令分解成可重組的元件，使得原本線性的建構過程轉變為在任何階段，都可以藉由對圖像化界面的程式介面編寫、連接不同性質的運算單元組件(Component)，獲得更複雜的參數化造型與組織系統，或進行參數變更並可得到立即變動的結果，轉而成為一種非線性設計過程，進而實現 **3D** 模型的互動性、自主性及衍生性，是一種開放性的數位設計工具。

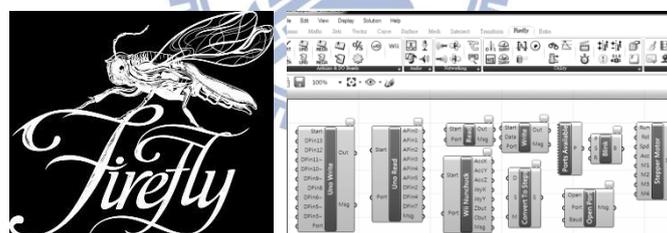


Fig 3-30 (A)Firefly (B)Grasshopper 介面

而由 **Andy Payne** 製作的螢火蟲(Firefly)是 **Grasshopper** 的輔助運算外掛(Fig 3-30 A)，可以將 **Grasshopper** 的參數數位模型和真實世界之實體互動設備如 **Arduino**、**Wii** 做連接，使得軟體容易精確地得出控制裝置，也可以控制讓實體世界的感應元件動態回饋於數位模型作為交互參照，是很容易可以拿來發展互動式建築的工具。本研究由於需要運算複雜的 **3D** 模型轉化為可輔助製造的真實元件，故 **Firefly** 之連接互動能力將會有相當之幫助。

在設計界經常使用 **Grasshopper** 之運算、判斷輸出入單元組件，以顏色顯示數據傳遞概念，有效率地呈現問題所在以及釐清參數關係，並且連結 **3D** 模型建構以及程式結構，對於設計者的建模修正與微調有極大助益，能方便地將自然界的紋理、數學邏輯的造形融入設計之中，提升設計本身的質感，也可以加速設計的進行，節省耗時成本與提升製

作的精準度。因此本研究將利用 Grasshopper 作為運算之操作介面，分析虛擬之模型轉入實體電腦輔助設計製造設備。

3.2.4. 雛形輔助製造的實驗操作

這樣的單元是否來數位化進行電腦輔助設計製造，如果可以控制其中的填充物與編織紋理就太好了。期望藉由操作數位輔助建模軟體數位化的 3D 立體模型，經由運算其結構與構成單元分析後，以其 Firefly 之能力輔助操作實體介面。實體介面端由 Arduino 做為橋樑，可以操作以伺服馬達或步進馬達控制編成的機制與機構，達到虛擬至實體建構的一貫作業。

由於數位化編織機所產生的編織紋理與包覆之單元可以顯示節狀的空間序列，而在編織機所成型如同繩索狀的構造，因其中的管狀加工平台約為直徑 2.2mm 圓形，所使用的線繩為 EXCEL 991 型之 20 號線繩之粗細約為 2mm(Fig 3-31 A)，考慮保留些許的運作餘裕降低卡繩的失敗率，故本實驗採用填充直徑為 1.2mm 之長條紙管作為試驗織機運作之填充材料(Fig 3-31 B)，因其取得性與硬度最為適中，剪裁施工也容易，且相較於塑料管材摩擦係數更好，故於線繩管狀編織空間中較不會錯動與滑動，可以更為精準的定位於特定位置。



Fig 3-31 (A) EXCEL 991 毛線 (B)填充紙管材料

數位化改造之手搖編織機具有較手動更加穩定的運作速度，可以透過毫秒計算運作之速度與旋轉圈數之關係，透過實驗實測可以得到編織物所延伸之長度公式：

$$S = t \times 1500$$

S(mm)為延伸之長度，t(ms)為運作之秒數。也就是每秒之機組運作可以產生五個繩圈的構造，約略為延伸 1.5mm 長度之編織物，可以包裹相對長度之內容填充物。這樣的數據可以輸入 Grasshopper 中做為製造之參考，提供動力控制的運作依據。

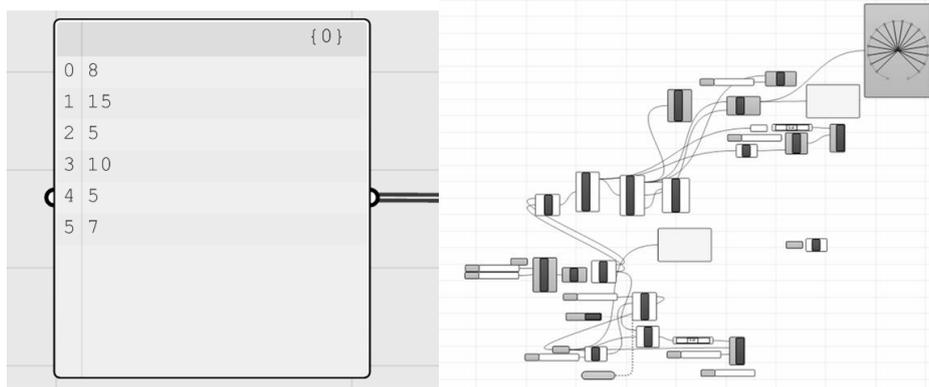


Fig 3-32 (A)輸入視窗介面 (B)Grasshopper 運算介面

在運算介面上，首先進行運作速度與效率的控制，也就是將數位資訊轉換為實體施作成品的連結。本研究以 Grasshopper 搭配 Firefly 作為運作界面平台，設計了一組參數運算程式(Fig 3-32 B)，只要一組輸入的長度需求(Fig 3-32 A)，就可以藉由計算得出運作的時間與換算旋轉圈數。這樣的操作介面相當簡易，數字的換算首先是從輸入的資訊序列拆解，轉換成所需要的結構長度以及需要編織的圈數，就可以乘以公式計算需要驅動機組運作的時間。

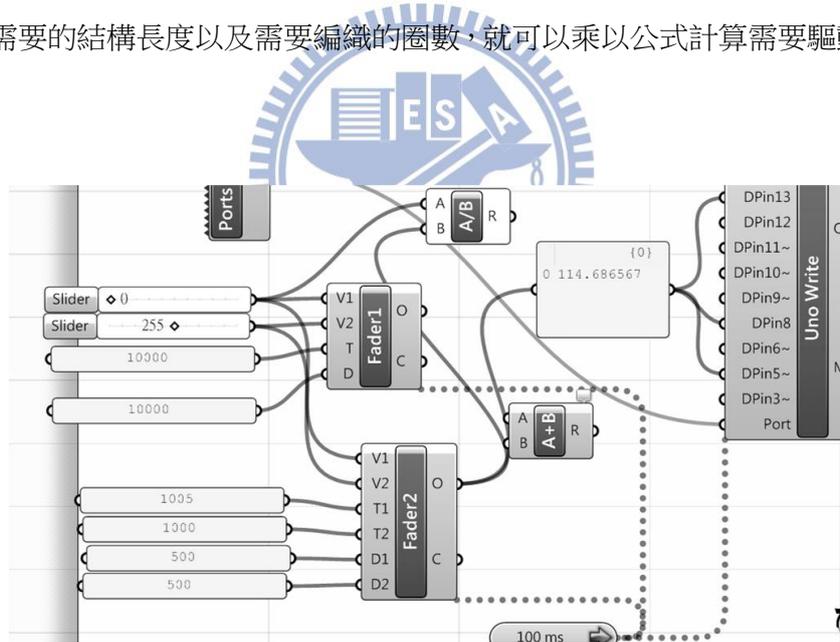


Fig 3-33 使用 Fader 控制元件

在真實世界中要藉由 Arduino 控制加工時序，也就是告訴 Arduino 要在何時何地運作何種指令與在何時停止，讓輔助製造設備得以加工編織物件，首先需在 Firefly 中以 Timer 讓 Arduino 的時脈與電腦的運算時脈同步，在輸入的資訊中插入指示運作、停止的運算參數，而後使用 Fader 的能力控制機組運作與停止的時間(Fig 3-33)，只要 Fader 的指示參數尚未歸零，則機組就會持續的運作。為了方便操作，也加入了直接緊急停止的 Button 指令，讓機器可以隨設計者的意志驅動。

這樣的整體的介面，展示了加工的序列狀態與時間的關係。經由參數運算的轉化，輸入的控制參數變成長度的計量單位，以圖(Fig 3-32 A)為例：設計者輸入了實驗用的參數，分別為 8、15、5、10、5、7，而本程式將這串數字轉換成了序列的長度(Fig 3-34)與運作的時間，輸出到真實的數位化編織機台後進行加工(Fig 3-35)，由此就可以得到按照需求所生產的編織體(Fig 3-36)。

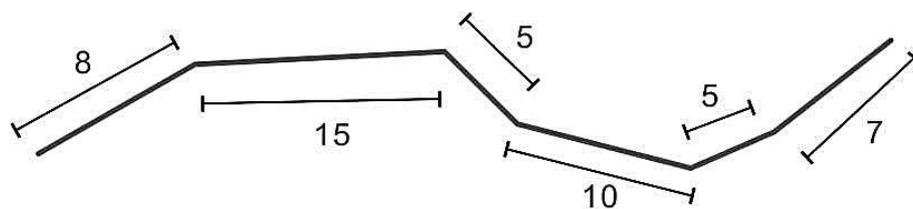


Fig 3-34 長度運算

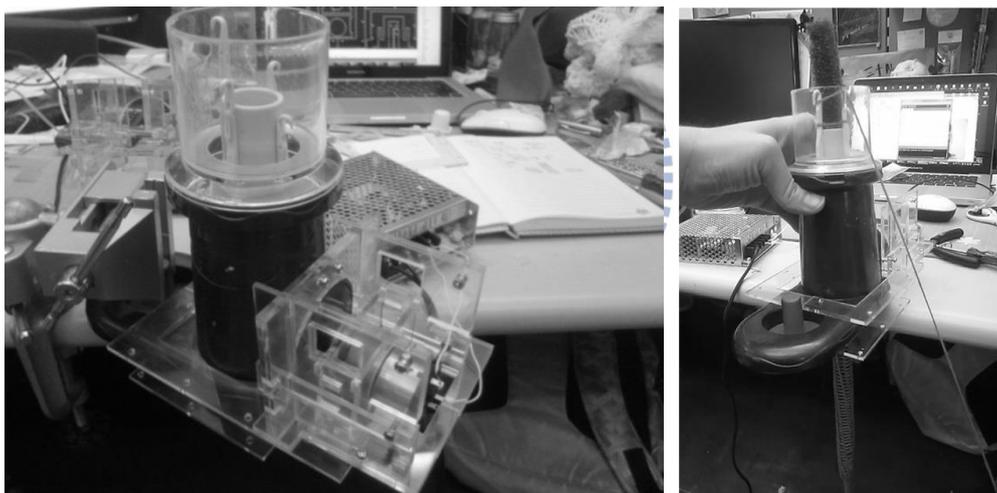


Fig 3-35 操作狀態操作中

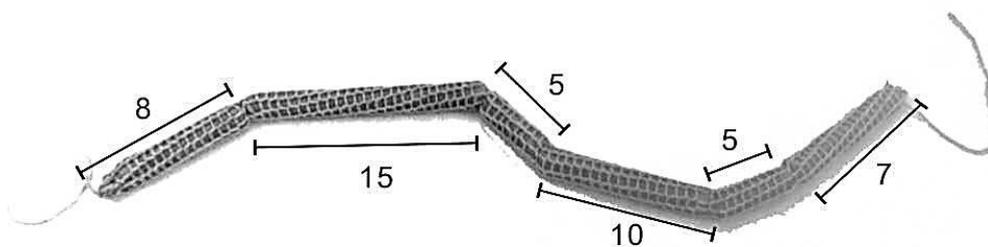


Fig 3-36 編織體製造

3.3. 幾何關係與運算介面

3.3.1. 編織體的空間幾何

本研究於 3.1.6 節之實驗操作中發現編織段落可以以為圍塑的方式構成面域，也就是以邊來構成造型。這樣的構成法如果使用在三角形上，由於三角形為穩定幾何，也就是由特定三個邊的長度閉合之三角形就可以確立一個固定型(Fig 3-37)。就可以形成與建模軟體中控制

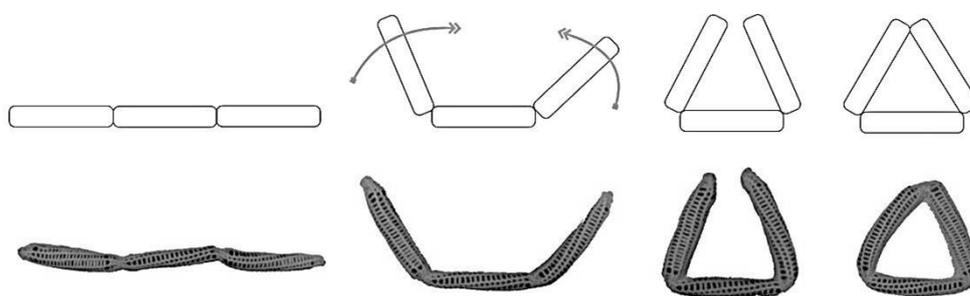


Fig 3-37 編織的三角幾何

而這樣的幾何關係如果複製、堆疊、與擴大，就可以成為一種三角網格組成的結構(Fig 3-38)，這樣的結構系統與設計件模軟體中的網格(Mesh)工具相當近似。網格是 3D 環境建立與編輯的一種邏輯，可以顯示模型表面建立的精確座標與距離關係，是設計師處理造型設計、應付生產各個階段所需編輯資訊的重要功能，可以與許多軟體例如 SketchUp 交換網格檔案格式互相編寫，也可以匯出網格模型至其它軟體進行分析或彩現。在今日的數位製造中，也用以匯出快速原型設備使用的網格模型製造數位形構的模型。

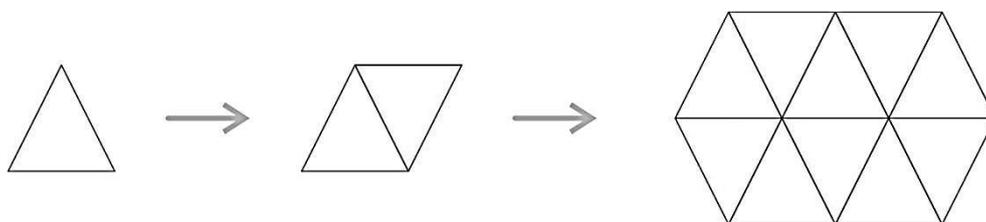


Fig 3-38 三角網格

由於 Mesh 系統是數位模型的基礎，具有讓虛擬模型分析接近真實的強大定位能力，也是協助設計者建構立體造型設計的常用手段(Fig 3-39)，故本研究為了能夠建立這樣的造型系統，必須考慮編織的數學性與幾何性，讓設計者可以透過這樣的三角網格方式轉化

虛擬之模型進入數位化之編織機進行加工。

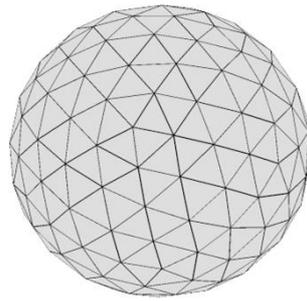


Fig 3-39 Mesh 結構系統

(1) 圖論與有向圖的研究

在網格系統中的節點與構成邊的線之間的空間關係研究是一種圖論 (Graph theory)。圖論是以圖為研究對象，主要是考慮以頂點和邊組成的圖形的數學理論和方法。圖論中的圖是由若干給定的頂點及連接兩頂點的邊所構成的圖形，這種圖形通常用來描述事物之間的某種特定關係，用頂點代表事物，用連接兩頂點的邊表示相應兩個事物間具有這種關係，例如以編織物而言就是轉折的接點以及具有填充物的線狀連接構造或者相反的思考。

如果僅考慮兩點存在一邊，稱兩點為相鄰而不考慮中間串連的線的方向性，那麼每條邊由兩個結點組成，分別代表邊的兩個端點，稱之為無向圖(Fig 3-40 A)；而如果相反的，這些串聯是有序列的，那麼每條邊是一個結點對，分別代表邊的始點和終點，在空間上的連結稱為有向圖(Fig 3-40 B)。編織物所製造的空間，由於是具有序列性的，是一種有向圖的構成。

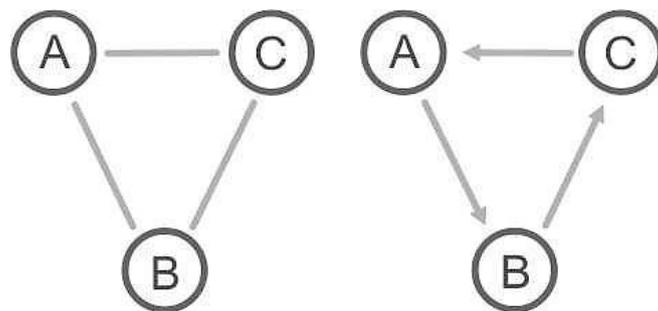


Fig 3-40 (A)無向圖 (B)有向圖

(2) 由拉路徑

由於編織的材料是由線繩，故具有一條線串完整體結構的特性，在數學幾何上要怎麼用一條線串完空間中的所有邊，稱之為一筆畫問題。一筆畫問題是圖論中起源於柯尼斯堡七橋的著名問題(Fig 3-41)，而數學家由拉(Euler)於 1736 年發表的論文《柯尼斯堡的七橋》中解決了這個流傳許久的七橋問題，這個公式叫由拉第四公式。

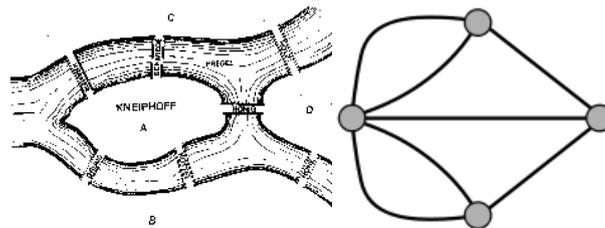


Fig 3-41 柯尼斯堡的七橋問題

由拉路徑(Eulerian Path)或稱由拉迴路(Eulerian Circuit)是指從某點出發，每個邊各經過一次的方式分析尤拉圖形(Eulerian graph)。由拉第四定理可以推算出一幅由拉同型是否可以尋得由拉路徑。如果一個圖形的滿足多面體頂點數、面數、稜數特有的規律：

$$V+F-E=2$$

其中 V 為頂點數、 F 為面數及 E 為頂點數，則此由拉圖形可以擁有一筆畫完的由拉路徑。以圖(Fig 3-42)為例，上排各種三角網格圖形可以藉由由拉分析得出下排圖形可能一筆畫完的由拉路徑。也順帶提出瞭解決一筆畫問題的由拉第四定理。

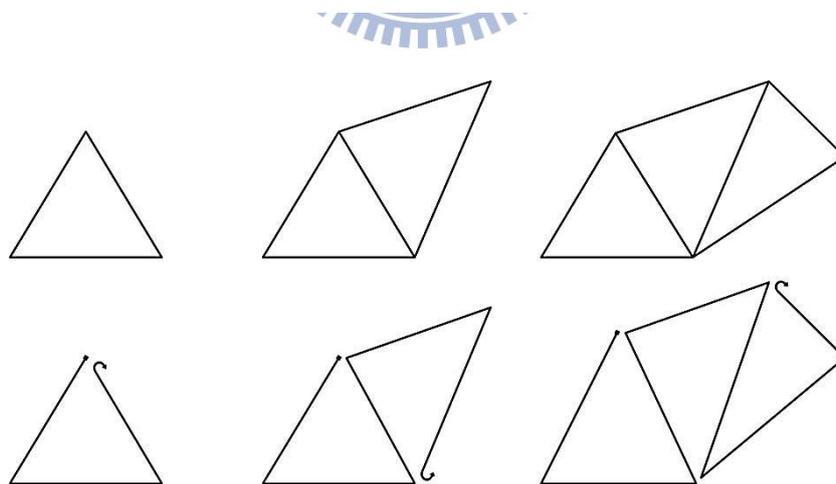


Fig 3-42 由拉圖形之由拉路徑分析

在由拉路徑分析的過程中首先會將路徑上的各點拆解並編號，以行列式紀錄其行走路徑，以圖 Fig 3-43 為例：此圖形可以由初始狀態，依序增加由 1 到 2 之路徑{1,2}、由 2 到 3 之路徑{2,3}、由 3 到 1 之路徑{3,1}、由 1 到 4 之路徑{1,4}、由 4 到 3 之路徑{4,3}，這樣

的有向圖分析紀錄法，便可提供下一小節由拉路徑運算程式編寫之用。

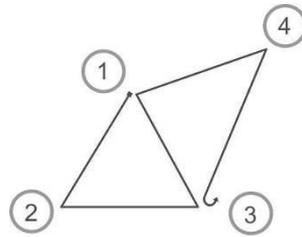


Fig 3-43 路徑的分析

$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
--	--	--	--	--	--

Fig 3-44 由拉路徑的分析記錄法

(3) 深度優先演算法

為了尋找由拉路徑，如果在程式中同時比對每個邊是否已經被走過，程式負擔將會過於龐大，以一個具有 100 條邊的圖形而言，搜尋必須完整的運算 100 的 100 次方才行。為了降低運算的複雜度，故一般會採用兩種方法：廣度優先搜尋(Breadth First Search)和深度優先搜尋(Depth First Search)。

廣度優先搜尋是先選擇任一個資訊點為起始點，然後依序搜尋相鄰的其他頂點，亦即是採用階層的方式先搜尋相鄰的頂點，再去搜尋下一層其他相鄰的頂點。如此反覆直到任何先被搜尋過的頂點，都沒有尚未被搜尋過的相鄰頂點時為止。

而深度優先搜尋則是先選擇任一個資訊點為起始點，然後選擇另一個相鄰的資訊點作為新的起點再作深度優先搜尋，如此遞迴地進行，直到沒有相鄰的頂點或者所有的相鄰頂點都已被搜尋過，才回溯到上一層繼續進行深度優先搜尋其他尚未拜訪的頂點。

在點數相對較多的狀態下，本實驗僅需要至少一條的加工路徑即可操作，如此一來深度優先搜尋的搜尋速度較快，所建立的圖形資料結構較穩定，儘管產生的順序可能每次有所不同，仍不影響最終的成果，且深度優先搜尋法亦是一種單向串聯性質的搜尋法，較貼近編織物一條線加工到底的本質，故本實驗將以深度優先搜尋法作為依據，進行由拉路徑搜尋的輔助製造程式的編寫。

3.3.2. 編織幾何的運算介面

藉由上一小節的研究，本實驗使用深度優先搜尋法，建構了一組搜尋由拉路徑單線加工法之 Grasshopper 運算程式(Fig 3-45)。這組運算程式具有經由由拉第四公式判斷圖形是否具有單線路徑串聯之結構路徑，若可搜尋此圖形之由拉路徑，則顯示於輸出端可能的起始點(StartingPoints,SP)於圖 Fig 3-46 之右側，這樣的運算法也可能會得知無法串連的結果，則程式會逐一檢查是否有增減結構以調節施工順序的可能。在程式中也加上了物件施工編號的能力，如圖 Fig 3-46 下側之 Slider，故製造數位化編織機製造編織體序列時可以參照圖示之引導，得知加工序列以及物件之關係位置。

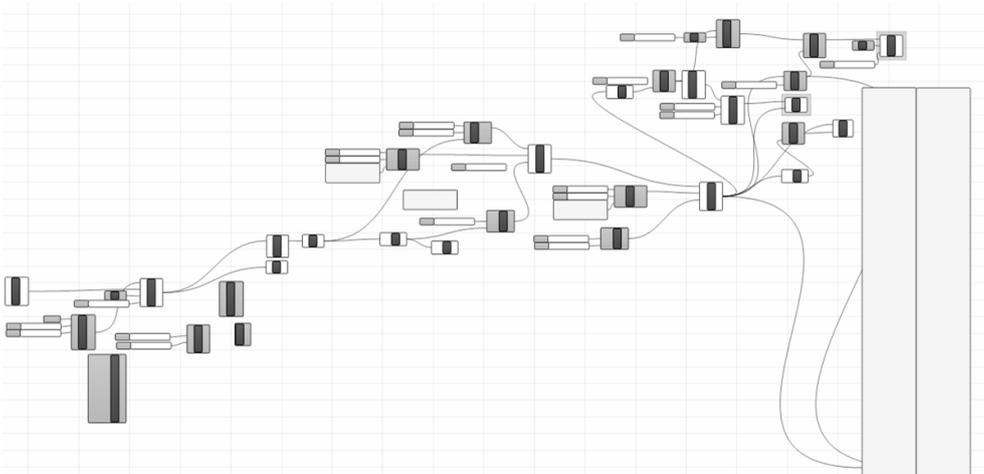


Fig 3-45 由拉路徑運算程式 Grasshopper 圖形

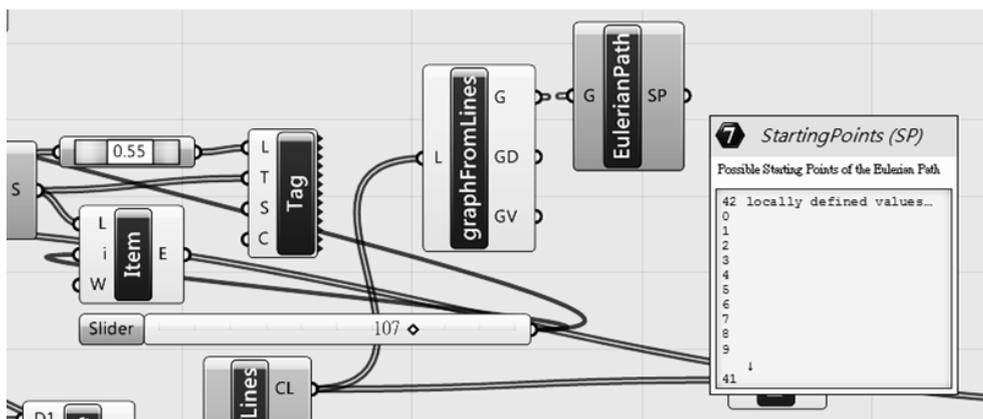


Fig 3-46 由拉路徑尋找之運算介面

3.3.3. 輔助運算操作成果

(1) 面域幾何

運用由 Rhinoceros 的 Mesh 網格工具轉化面域(Fig 3-47 A)為三角網格(Fig 3-47 C)，再以 Grasshopper 介面的由拉路徑運算搜尋程式計算可能的加工路徑(Fig 3-47 D)，如此一來就可以找到需要加工的物件序列。將所得到的物件序列參數經由 3.2 節完成之電腦輔助製造程式轉換為製造控制的參數，就可以透過數位化的編織機將虛擬之面域造型真實的製造出來(Fig 3-48)。

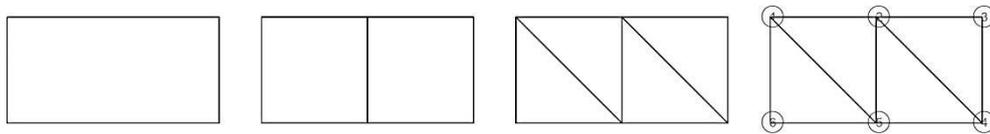


Fig 3-47(A) Surface (B) Mesh (C) Triangulate (D) Euler Path

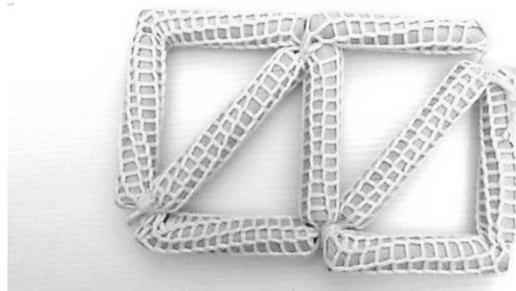


Fig 3-48 實體編織平面造型成品

(2) 立體幾何

經由上個實驗操作得知面狀結構的可能性後，既然可以操作平面性的面域，本研究繼續嘗試以立體造型輸入程式進行運算，試圖尋找立體造型的電腦輔助製造機會。故以八面體模型(Fig 3-49 A)為例，分析其幾何結構(Fig 3-49 B)，經由電腦輔助設計之數位化編織機的加工輔助(Fig 3-50)，即可製成真實之實體模型(Fig 3-51)。

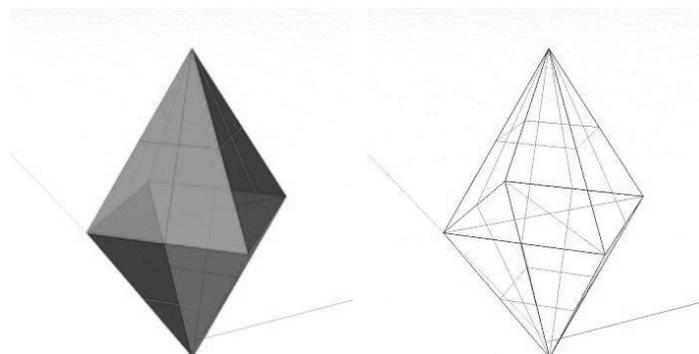


Fig 3-49 (A)3D 模型 (B)模型分析

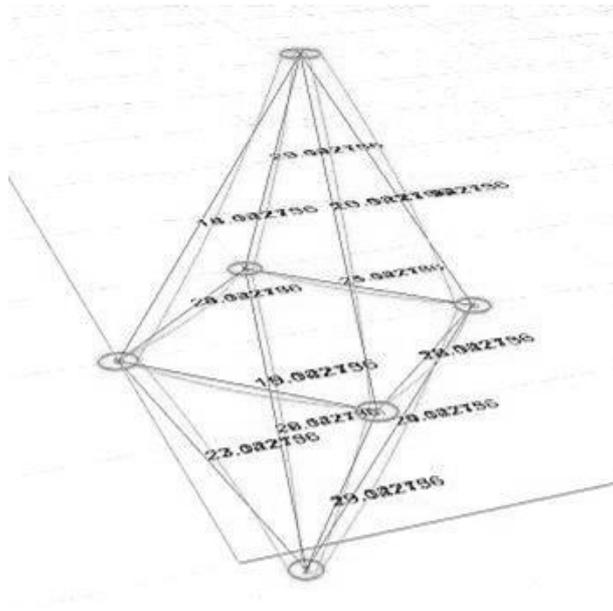


Fig 3-50 由拉路徑分析



Fig 3-51 編織物立體造型成品

由此本章節即完成目標之電腦輔助設計製造裝置之實作，是一組由機組發展、製造、乃至介面運算編寫，皆以設計者有能力自行控制之軟體和硬體所創作，可以供給設計者一個新的模型製作設計平台。

4. 新工具雛形的模擬設計操作

延續第三章所建立之電腦輔助設計製造機具雛形，進行對於數位控制之媒材與加工方式改變可能性之實驗，透過實作找出真實建造層面可能遭遇的問題，並探索不同媒材所產生的更多末行造與呈現方式。本章節分三個段論分別操作機具與設計的使用法，由向內探索媒材本質的實驗到向外因應需求的應用設計，示範新數位工具的使用法及開發新的設計可能，分別為：新媒材導致新結構的設計、新結構導致新立體造型的設計、新工法導致新的組成方式設計。

4.1 新結構媒材的模擬設計

經由第三章的數位化編織機實作與 3.3 小節的結構幾何實驗，設計者獲得包裹著序列性填充媒材的編織物與網格結構，而這樣的結構與傳統的網格結構是不同的，因為編織體的本身之材料及編織法所具有的彈性，故編織體的網格結構也就具有了可變動性(Fig 4-1)，這樣的變動性提供設計者不同於以往的設計思考。本小節將進行媒材的改變，試驗是否可以經由填充媒材的轉換獲得更加具有彈性的柔軟結構(Soft Structure)。

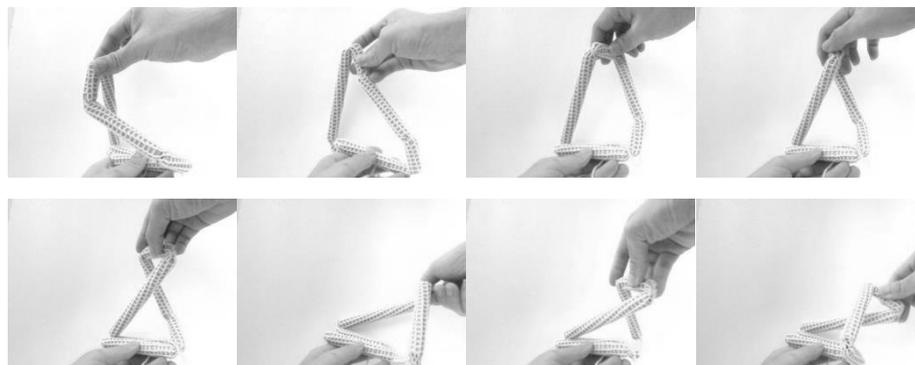


Fig 4-1 彈性的編織體

(1) 填充柔軟材料實驗 1: 構件

本實驗以編織工藝出發，應用傳統填充媒材於實驗當中。而在傳統編織中，包裹填充海

綿材料於結構中是常見的技法(Fig 4-2)，提供編織體同時具有膨脹後的支撐強度兼具彈性的柔軟質地(Fig 4-3 B)，與文化脈絡(Context)和觸感經驗(Experience)是相當相關的。故本研究進行更換柔軟結構的嘗試，實驗柔軟的工藝填充材在段狀中可展現的能力，討論是否可以提供設計者啟發新設計造型與施工過程的可能。



Fig 4-2 (A)塊狀海綿 (B)長條海綿

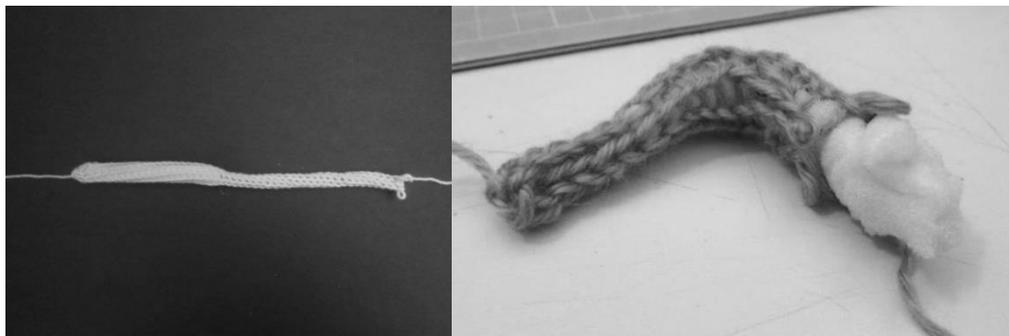


Fig 4-3 (A)編織包裹所產生的段 (B)包裹海綿示意圖

本實驗嘗試填充了 16mmX18mm 之長條海綿，所為取代紙管的填充媒材，這樣的操作獲得了三種不同的段落性質：無填充物的索狀編織體(Fig 4-4 A)、填充了紙管的硬質桿狀編織體(Fig 4-4 C)、與填充了海綿的軟質束狀編織體(Fig 4-4 E)，這三種段落在編織體中各次擁有不同的空間性質與結構能力。

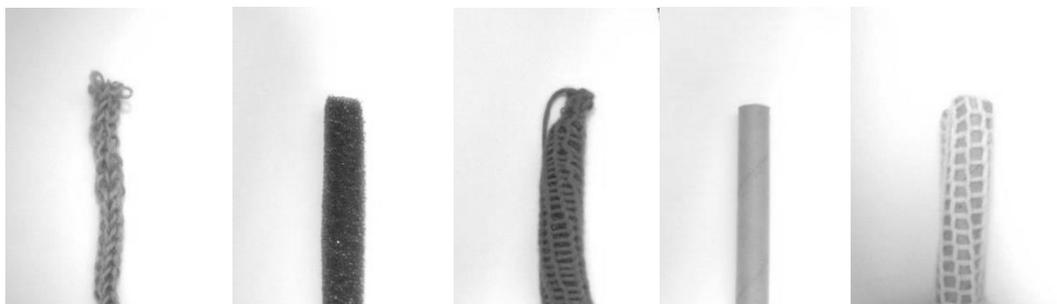


Fig 4-4 (A)索狀編織體 (B)海綿 (C)軟質編織體 (D)紙管 (E)硬質編織體

故實驗重複 3.3.3 小節之網格結構模型，轉化硬質編織體為柔軟的網格面域(Fig 4-5)。本實驗成果展現了軟性網格的結構(Fig 4-6)，不同於以往的面域構造，更加具有環境適應性與高變動性，在範圍內可以依照使用者之需求彎曲和扭轉，卻依然可以回復既有之造型，這樣的柔軟面域可以降低幾何造型的構成強度，在視覺與觸覺上讓使用者獲得較具親和力的表面。

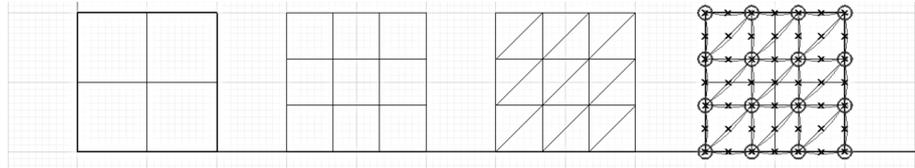


Fig 4-5 (A) Surface (B) Mesh (C) Triangulate (D) Euler Path

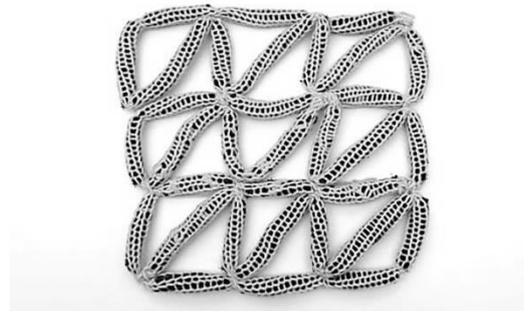


Fig 4-6 柔軟網格結構

(2) 填充柔軟材料實驗 2: 鉸接點

由於網格結構將會建立大量的交接點，傳統的編織法是用針與線的平針法串聯不同的編織體接合，但這樣的工法需消耗大量的時間與操作時間。為了提高數位化的編織機具的工作效率，故本實驗研嘗試發新的快速接合方式。

藉由觀察節點與由拉路徑串聯之邊的關係，發現節點與邊是一種十字狀的交叉結構(Fig 4-7)，這樣的結構若可以藉編織的方式，提供兩個線段在轉角處反方向的作用力，就可以做為結構上的鉸接點(Hinge)，是一種可以空間上具有旋轉或移動彈性的節點構造。以網格系統(Fig 4-8)為例，分解網格成為單一加工路徑後，若能在節點提供纏繞的編織鉸接媒材，就可以快速的游左上至右下的施工，得到網格的面域。

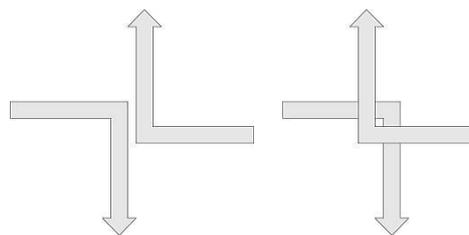


Fig 4-7 節點與串聯邊的關係

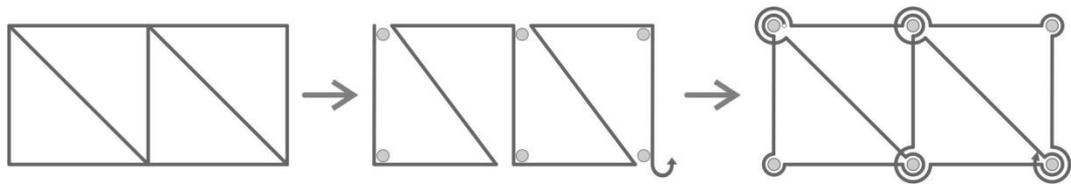


Fig 4-8 網格接點的分解

運用接近的媒材發泡海綿球(Fig 4-9)作為接合的材料，運用其兩邊球狀而內心呈短柱狀的結構特性(Fig 4-9 B)，使得索狀編織物在上方以順時針而下方以逆時針方式相對地互相纏繞於發泡海綿球之中心後(Fig 4-10)，就可以得到快速的穩定十字快速鉸接。

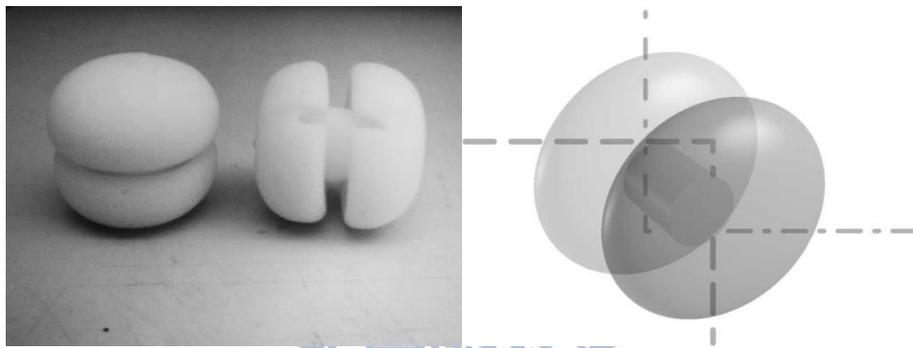


Fig 4-9 (A)發泡海綿 (B)十字快速鉸接的原理

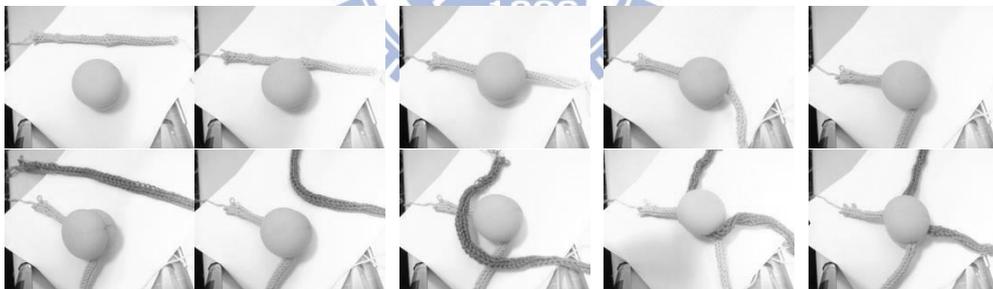


Fig 4-10 十字快速鉸接實作

實驗所獲得之網狀平面在加工速度上(Fig 4-11 A)，相對於 4.1(1)小節的相同面域結構，大約可縮減 40%的結構處理時間，如此大幅地提高了施作的速度，在施工困年度也相對地降低了。實驗還同時發現了海綿球增加了結構的穩定度與強度，讓結構更加具有支撐力(Fig 4-11 B)，使得柔軟構造展現做為立體造型的可能。

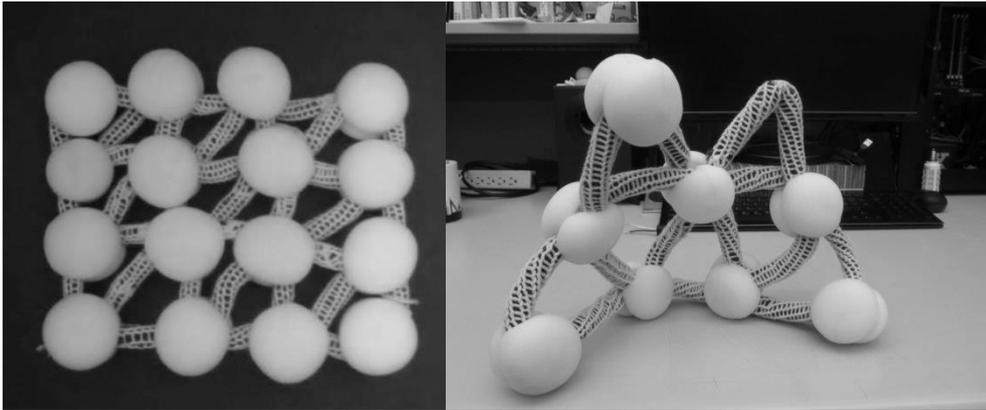


Fig 4-11 (A)海綿節點網狀平面 (B) 海綿節點立體造型

4.2 立體造型的模擬設計

本小節繼承 4.1 小節的研究成果，試圖沿用柔軟結構作為立體造型的可能，實驗設計者在連結虛擬模型和真實模型，自 3D 建模轉換為運算資訊並以數位編織機生產構件，真實的作為複雜立體模型的設計媒材，創造並討論不同的模型構成思考方式的可能性與優缺點。

(1) 柔軟媒材的立體造型

首先在 Rhinoceros 環境下建立複雜曲面模型(Fig 4-12)，嘗試以網格系統拆解與分析模型進行實作。本試驗之模擬模型造型為尺寸為 200mm(W)X150mm(L)X350mm(H)，為了同時試驗結構的穩定度、強度，故在設計了較高的高度與一鼻翼狀之懸挑造型。

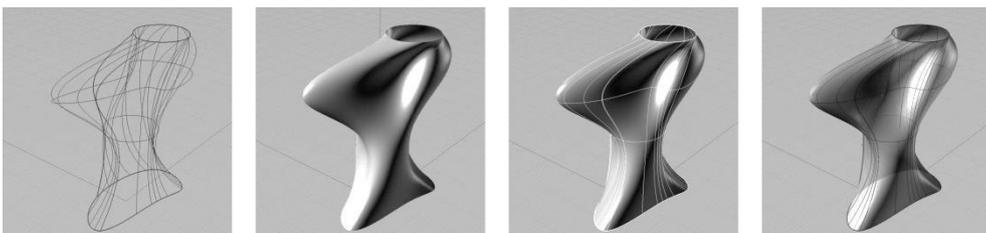


Fig 4-12 模型建構與分析

分別進行節點和邊所構成的網格結構造型分析，依序的編號這些邊與節點，將資訊輸入 Grasshopper 介面進行運算，獲得網格構造的邊與點的參數化關係，而後進行網格結構的由拉路徑分析 (Fig 4-13)，計算由拉路徑之存在與由拉路徑的行走順序(Fig 4-14)，在篩選可能的路徑後進入 FireFly 介面加入作為加工參考資訊的符號並予以編號排列，最後輸出於螢幕投影技巧進行放樣(Fig 4-15)，就可以進行實作施工。

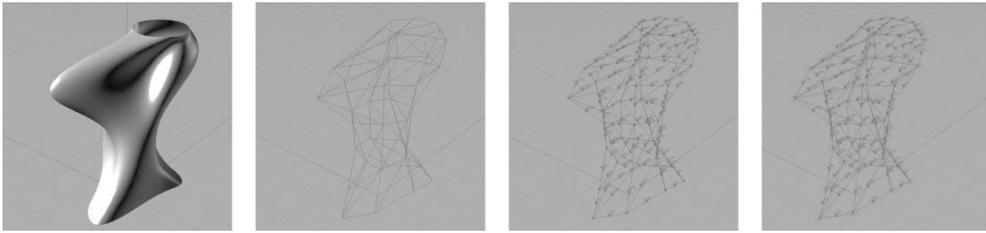


Fig 4-13 由拉路徑



Fig 4-14 組裝序展試圖

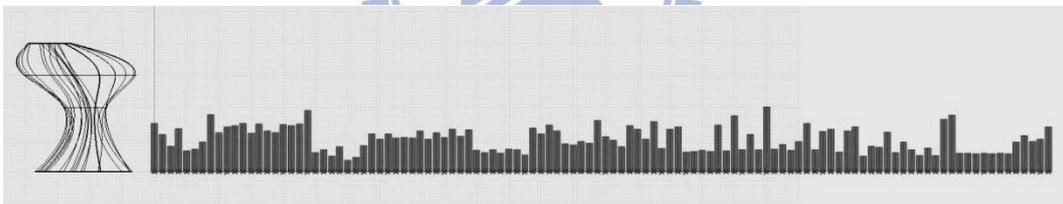


Fig 4-15 放樣圖面



Fig 4-16 柔軟結構的立體造型實作

柔軟結構的立體造型造型(Fig 4-17)驗證了由拉立體幾何路徑與本實驗所建構之電腦輔助設計製造軟體及硬體的真實模型可行性，也經由本實作實驗了柔軟結構的結構性足以建立該尺度模型挺立的可能，雖然由於填充材料的強度不足導致的造型失真雖然不可避免，可以藉由提高網格密度或以更換材料獲得更精確的模型，且本實驗藉由建控的結構空間也發展新型態柔軟空間的雛形，提供作為設計者柔軟空間的設計想像(Fig 4-18)。

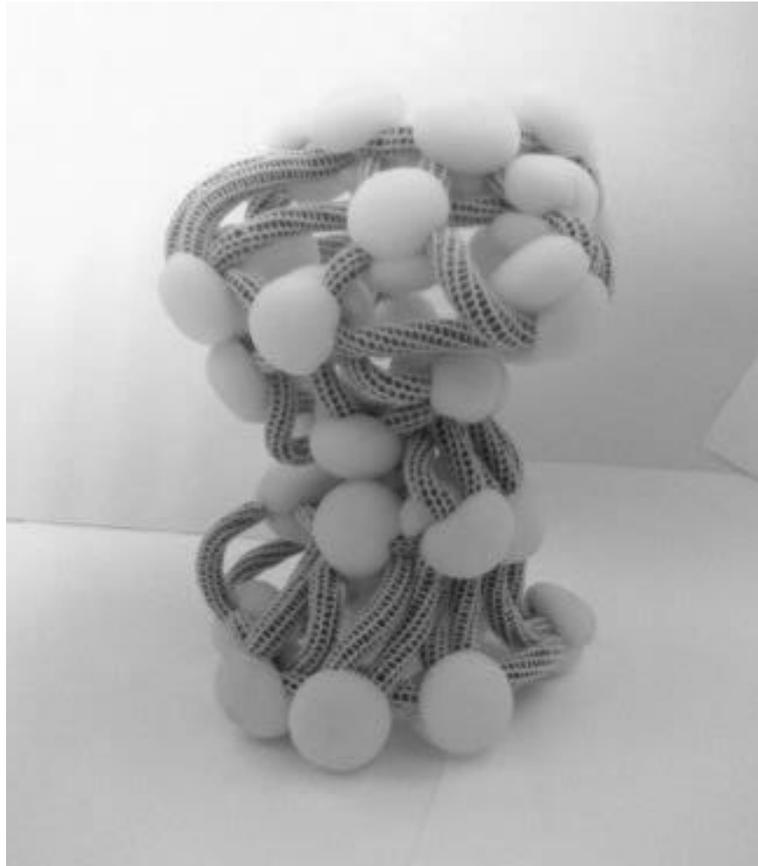


Fig 4-17 柔軟結構的立體造型成果

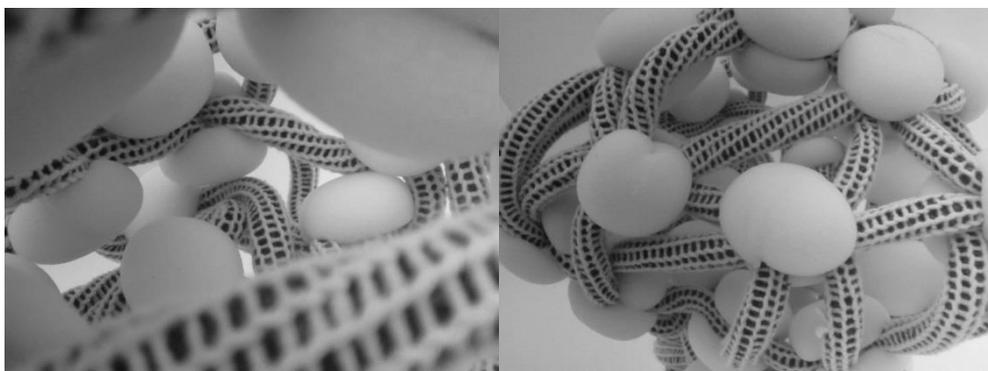


Fig 4-18 柔軟結構所建構的空間

4.3 自我編織結構的模擬設計

上一小節之研究達成了數位編織機的模型構成，唯所使用之發泡海綿因其為傳統工藝材料之市售品，非本研究發展之數位化編織機所生產，所以發泡海綿的的構造性與材料性，和其色澤、體積等皆非實驗所能控制之。為了使材料構造系統與生產製造系統都更加簡明，以及脈絡紋理更加一致，本研究進行運用編織體自我構成編織立體結構之實驗。

本研究藉由案例之研究，參考 2.1 小節之短針(Fig 2-5 B)應用於立體結構中，發展出可以利用數位化編織機製造的自我立體編織結構(Fig 4-19)，這樣的方式取代了 4.2 小節的雙球狀海綿結構，讓結繩點成為編織體上的記號之一。在運算程式中，需加入節點之編織繩圈記號(Fig 4-21)，再配置作為結構起點之啟始繩圈記號(Fig 4-22)，可以使序列性結構同時具有自我組織的能力，不須額外使用不同的材料，對於施工序來說也更加簡易。

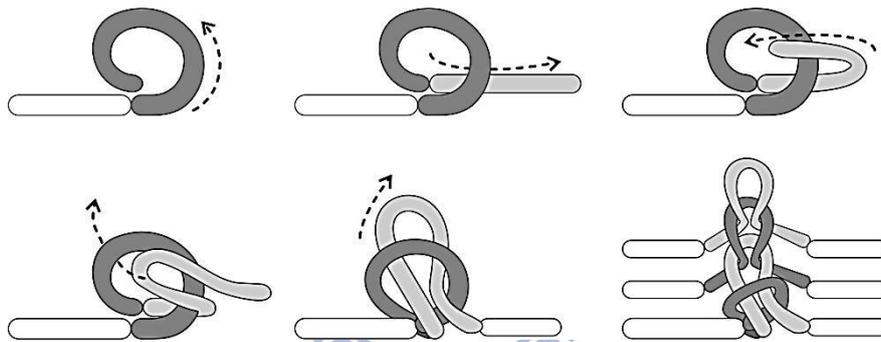


Fig 4-19 立體編織結構

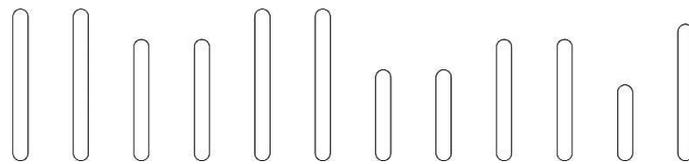


Fig 4-20 運算自我編織結構

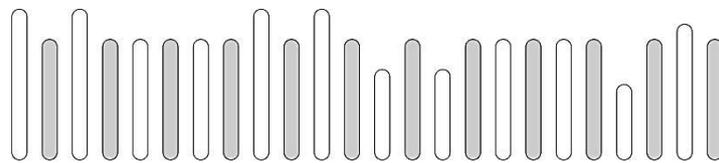


Fig 4-21 配置自我編織繩圈

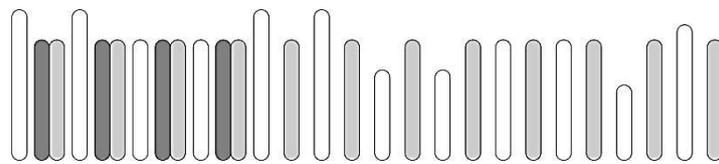


Fig 4-22 配置起始繩圈

(1) 圓筒狀立體編織結構

由於編織結構所具有的彈性，本小節嘗試利用研究所發展之自我立體編織技法，採用堆疊的技法來塑造立體的造型，並以圓形筒狀造型作為示範。由於圓形筒狀造型的結構較為穩定，故編織機是先以操作分層之結構計算(Fig 4-23)後，拆解筒狀造型的結構單元構件(Fig 4-24)，而後進行記號的配置安插與放樣(Fig 4-25)，使設計者得知加工的順序與真實組構時的加工位置，如此便可進入數位化編織機的構件序列生產以及組裝。

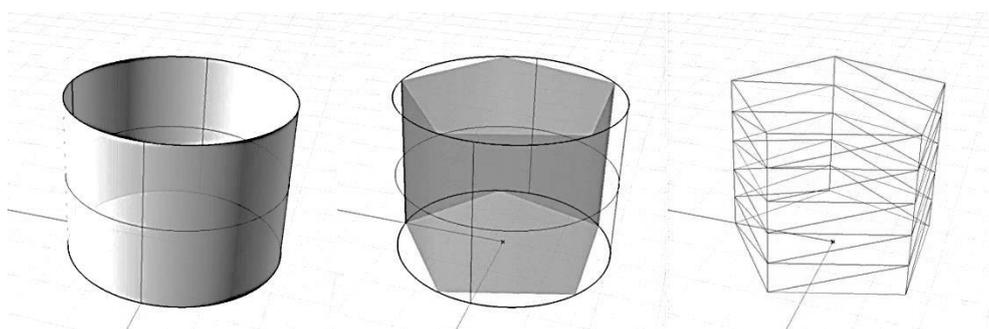


Fig 4-23 立體編織法記號分析

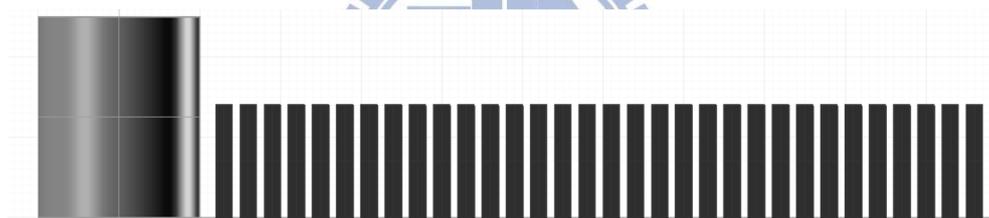


Fig 4-24 結構單元放樣

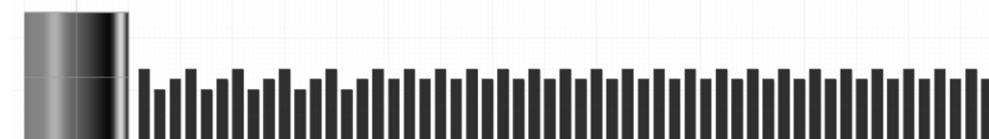


Fig 4-25 自我立體編織結構分析放樣

本實驗操作之數位化編織機之運算介面中增加做為自我立體編織的小節構造，相較於 4.1 小節的操作造型結構更加地強壯與空間定位更加準確。這樣的構造具有的特徵更加適合做為造型使用。且造型具有兩種面向，若進行造型的空間翻轉，則同一編織體可以出現兩種不一樣的樣態。內向性的節索造型(Fig 4-26)在表面上較為平滑而較貼近原始之虛擬 3D 模型，外向性的節索造型表面則由於具有繩結的脈絡(Fig 4-27)，故表面粗糙而帶有編織的施工資訊於其中。

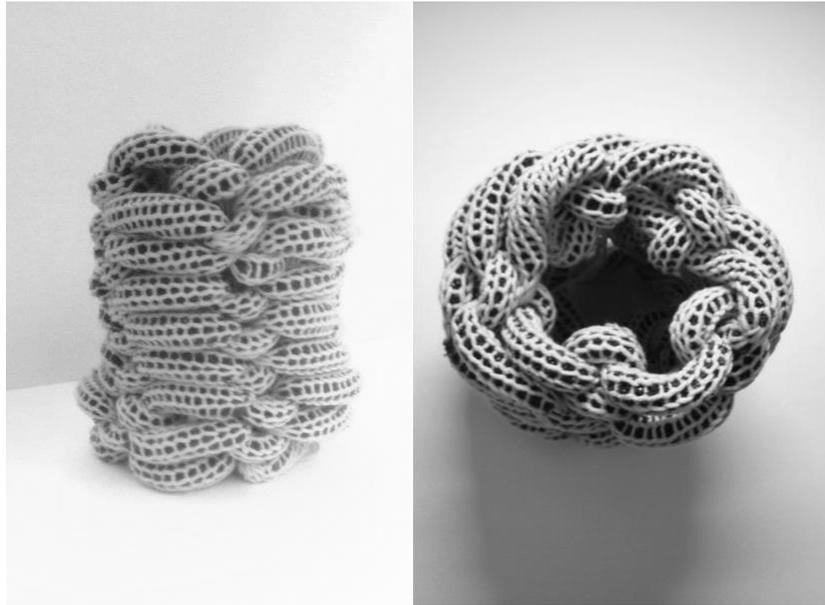


Fig 4-26 筒狀編織成品(內向)

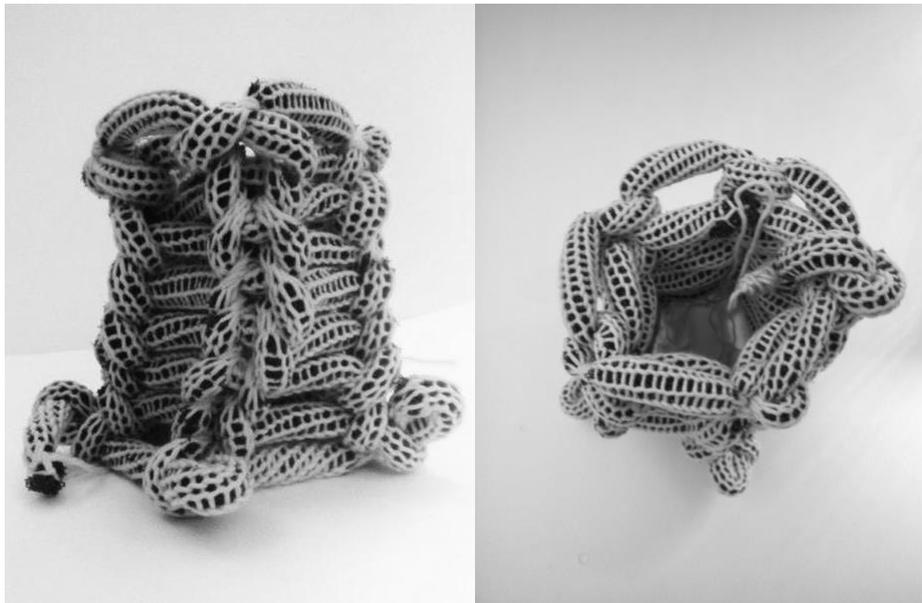


Fig 4-27 筒狀編織成品(外向)

(2) 錐體狀立體編織結構

本小節延續上述之立體編織結構，在造型上試驗不同的曲度曲面造型，這樣的造型由 Rhinoceros 的曲面造型轉化為高度分層的線狀構造(Fig 4-28)，再予以進行碎化區分出段落(Fig 4-29)，

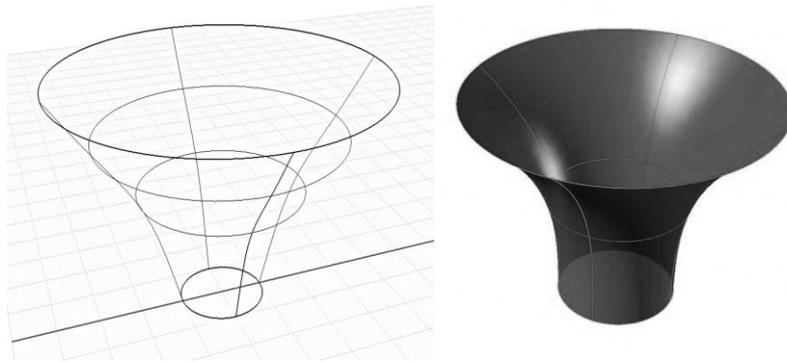


Fig 4-28 椎體造型 3D 模型

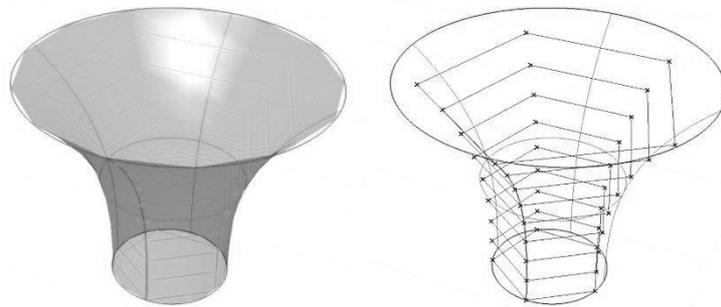


Fig 4-29 椎體造型模型分析

與上小節不同的是這次的放樣直接在放樣圖中標註施工方式與位置，分別以 O X V 一 等四個符號代表不同的施工方式(Fig 4-30)，O 為製造初始繩圈、X 為製造連接繩圈、V 為製造雙套繩圈以增加編織數量、一則為一般結構，穿插入作為自我編織的構造，程式就會生產出放樣之圖面(Fig 4-31)。

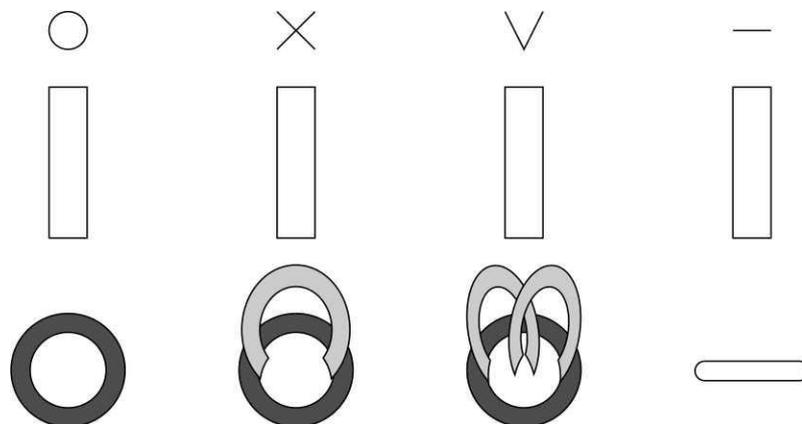


Fig 4-30 放樣符號

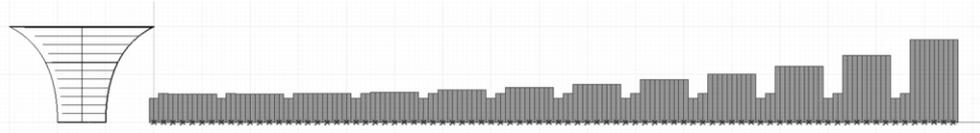


Fig 4-31 椎體造型放樣圖面



Fig 4-32 放樣記號

如此一來放樣圖面的加工序列就變得更加簡明(Fig 4-32)，僅須按造其序列放樣記號生產填充構件(Fig 4-33)，即可獲得預期之椎體造型編織體(Fig 4-34)。

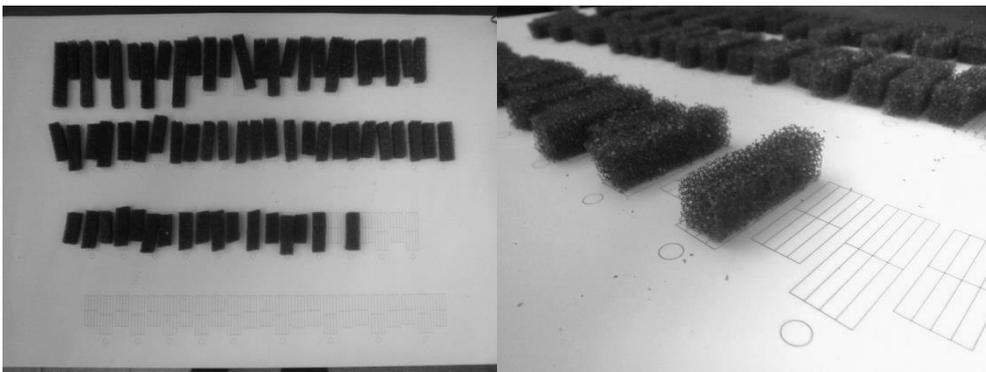


Fig 4-33 實作放樣



Fig 4-34 椎狀體造型(外向)



Fig 4-35 椎狀體造型(內向)

本小節實驗了使用新工具後的設計改變，藉實作示範操作設計的流程與步驟，經由實際的體驗得知電腦輔助設計與製造在思考到真實建構之間的落差，同時在模型上分別展現了新媒材的紋理、造型以及結構的轉變。

在這個小節裡，新工具雛型藉由軟體及硬體雙方的協助，讓設計者可以使用編織記號在空間上標誌所有的編織體構件，讓所有的原件都各別具有意義，不同於4.1小節中，實驗所使用的尤拉路徑運算技術，充分展現單一路徑加工可以讓施工過程減少圖面交互參照的時間，也可以減少失誤的發生的指示性，而是更進一步的開發了數位化雛型建立的編織結構體的四種結構構成機制，是傳統編織技術的數位性應用，讓編織體具有自我檢測、編號與安排自我編織結構的機制於生產過程中，在脈絡紋理上更加的統一，是充分認知新工具能力後運用新工具所進行的細部設計，更是設計思考明顯運用在空間造型上的進一步展現。

5 結論

本研究提出了對於現今電腦輔助設計與製造的疑問：在今日的數位設計時代，設計者是否依然被少數的幾種數位加工設備與其操作媒材所侷限，是否可以自行創作自己可以控制的設計平台，讓設計者重新定義與擁有自我的設計紋理、設計環境與設計流程；而這樣的運作流程是否可以經由簡單的介面串起技術的鴻溝，反推其影響力，讓設計師也得以從工具的束縛中脫離，重新獲得選擇與操作使用工具和媒材的自由。

5.1 研究成果

本研究經由實作驗證設計者可以透過研究挑選傳統工藝技術轉型為數位化的工藝製造設備，實作出真實可運作的新形態電腦輔助設計製造雛型平台，並藉由數位運算協助設計者構思新工具的運作構成邏輯，創造與編寫新的控制程式與操作介面，找到運用新工具與新媒材進行設計的方式，是一套經由實作驗證假設之可行性的步驟操作實驗。其中最主要的成果為以下：

- (1) 開發低度環境需求的 CAM 快速成形製造技術的設備雛形。
- (2) 建立具有脈絡的模型拆解分析與序列式的模型元件管理系統。
- (3) 提出一種新的由設計者在構思設計時可以連同製造輸出一併思考的方式。

結合「數位媒材」和「傳統工藝」在新與舊之間相互影響下思考新的可能，並且透過整合使得 CAD 和 CAM 接軌來落實整個研究的構想，也就是從電腦上進行設計，到製造生產實體的模型，建立一個數位構築的機制，提出當代設計者在控制設計形體與組裝設計上新的方向。研究的成果可以分成「傳統數位製造方式之比較」和「與傳統媒材和工具對設計的影響上之比較」兩方面來談。

(1) 與傳統數位製造方式之比較

傳統的產品設計必須預測使用者的喜好與適用特性，而且使用者的喜好是隨時在改變的

(Mitchell, 1998)，本研究站在更上端的位置，提供設計者依照自己喜好或因時因地的創造數位工藝工具的可能。以此為目標而言，經由本研究成功的驗證了這樣的工具創造是如此的可及，讓任何的設計者都可以依循這樣的設計步驟來尋找並自行創造自己的數位設計工具，使設計製造可以有更多元的可能。

本研究完成之雛型為開放彈性製造系統 (Flexible Manufacturing System)，讓設計者或研發者自定義一套生產裝配流程，只要利用控制系統的修正即可達成因應快速變化要求，並可達到多樣化少量生產製品的需求。設計者可以在設計過程中輸入不同的參數，依據相同的規則產生出不同客製化的產品，因此可以依據使用者不同的需求而客製化產品 (Branko, 2003)。提出了一個新的結構演算與製造法，包括其施作與組構方法，在這樣同時於製造時給予施工的物件序列性與串聯性的整理和指標，是可以終止混亂且增加效率的管理系統的解決方案。

相對於傳統的基層法堆積製造，本研究所建立的電腦輔助製造工具雛形不僅沒有材料上的特定性，在選用的媒材上擁有更多的彈性與選擇性、擴充性，在設計上具有更低的环境需求與更快的完成時間，因為不須經由達到特定溫度才能開始運作，且不需要等待溫度冷卻或膠合材料揮發等等的時間，是在常溫下以物理的方式完成的，所以在便利性與速度上都具有相當的可能性與優勢。

而相對於雷射切割等減法製造，本研究所創造的構成方式不僅沒有零件散落的問題，所有物件在製作完成時都已有自己所屬的清楚功能與編號序列，也不會有減法製造會產生的大量灰塵、氣味與有毒氣體，更加不會有大量廢料的出現，由於不須強力的鑽磨與雷射切斷，故對於動力與能源的需求量理論上也會更少，這樣的製造方式同時擷取了兩種傳統數位製造法的優點，並優化人工作業的效率，確實是極具潛力的開發方向。本研究所實作之數位化輔助編織技術，是一種採用毛線、紙管與軟性填充材料等環保材質做為示範的加法工法，是一種低環境需求的物理性加工方式，所以可以不用考慮溫度與材料需要膠合或固化的時間，也沒有氣體或氣味的散發，這樣的設備足以作為新時代電腦設計製造設備的下一步研究開端。

(2) 與傳統媒材和工具對設計的影響上之比較

本研究所完成的電腦輔助設計設備是一種可以從預想到真實的設計流程系統。同時處理軟體與硬體端的連結，使得設計者可以自由地在生活中挑選熟系或屬意的工藝法展現新的設計紋理，貢獻在於修正了過去的設計者使用現有設計架構的紋理框架和機具導致的設計節奏限制，提出一個工藝進化的多元觀點。這樣的新設計演算規則系統 (algorithmic system)，如設計者能妥善的發展與整理一系列形的規則逐步運用、以生成設計的集合或語法 (Mitchell, 1977)，就可以使得設計者擁有自己的獨有設計脈絡。

不同於雷射切割的平板狀構件、也與樂高積木 (LEGO) 的塊狀顆粒不同，本研究所完成的

數位化編織機是一種創造的是線性的結構的模型系統，所以設計者對於空間與模型的想像變成一種序列結構式的思考，藉由不同的媒材分別操作作為桿狀(Poles)構件與鉸接(Joints)構件在軟硬之間提供建築物更多的變動性可能，甚至創造新的軟建築(Soft Architecture)形態，展現形的文法在「分析或描述已知或既存的設計語言」及「創造新的設計語言或風格」上的潛力(Stiny, 1976)。

而這樣的輕量構造系統是一種可以一條線走完的設計過程，相反的也是可以一條線返回的拆解與回收的設計考慮，模型最終的風格也就與過往完全不同，是可以重複利用的(Reusable)、具有移動性(Movable)與可變動性(Transformable)的結構，這樣的結構物提供了電腦輔助製造的永續設計與多元使用設計的思維向度。

5.2 研究限制

本研究是經由真實實驗操作中驗證假設之可能，故所挑選的工藝技術的受限於可取得的工藝技術(在本研究中以手搖式編織技術為限)與可取得的數位操作平台(在本研究中以Arduino 與 Rhinoceros 介面為限)，而媒材也僅以傳統工藝慣用媒材進行創作(在本研究中以編織工藝所採用毛線和填充材為限)，風格是在處理問題時從眾多替選方案中擇一發展的選擇(Gombrich, 1961)，故以此為驗證機制上僅表現了眾多可行性中的其中一種而已，缺乏對更多工藝技術的轉化考慮。

人機介面而言，在數位工具軟體及硬體上都應整合更多控制資訊協助設備的生產。軟體上的結構邏輯分析方法和機械運作調整的參數都應該可以被更結構化地呈現出來，其完整度與適用範圍都可以再強化；以不同製造軟體的編寫而言，如果要嘗試編寫第三種結構，所有的過程都須重頭製作；而對於施工的流程圖面只有設計者本人可以閱讀，在展現施工工序的介面可以有更清楚的展示方式。硬體上的構件有許多協助定位編織機的加工材料設備如：協助編織物疏鬆的旋轉底盤、抽線與理線的走線系統、引導編織物的重錘等構造，都尚在原始的物件拼組階段，如果能整合這些細節成為完整的系統，則機具的運作速度、準確度將可以提高。

5.3 後續研究

本研究考慮讓設計者尋找新形態的設計製造平台與創造更多元的設計可能，而因編織技術在情感脈絡的貼近，和在數位文化發展上的關係，故以編織技術切入作為雛型之示範。但在真實的文化上還有很多影響設計的可能，例如編織繩結的歷史與造型對於人類情感的影響，以及虛擬及實體模型上在數位設計上所扮演腳色的討論。

在操作的材料上還有很多其他的可能，例如將編織材料轉換為金屬材質，就可以製造更具有強度的編織體，具有自我站立的強度，可以製作更加巨型尺度的空間作品。如果可以因應其特殊材料如記憶金屬的彈性，或者金屬的導電等的的能力，就可以使編織體更具有實用的多元可能性，可以因應環境或使用者的需求轉變型態以及延伸或掛載其他服務機能，例如對應陽光的遮擋系統、或是對應風的導流系統、對應視覺的變色指示能力等等。

在編織體的單元性上，目前尚只以單一軌道的編織路徑，以及純粹向上的堆疊方式，如果可以採用多單元式的設計，也就是單一軌道製作，但預先設計接合構造，使得各個單元之間可以契合以組成更大或更複雜的空間形式，應該可以有不同的空間體驗與使用者參與模式；而或改變運算路徑，使得運算的路線可以更加複雜與穿插，也可以更多可能性，在空間的形式以及建造的結構強度設計上就可以有更多配合的轉換。

而在雛型本體未來的後續發展，將補足本研究之限制，發展更多更方便設計者的通用使用介面。以本研究所發展之雛型而言思考其多元之使用性，嘗試將工藝在製作模型的輔具提升到空間的製造機具，進一步思考更大型製造設備的可能，以其彈性與軟性構造，可能可以作為高安全性或高隔音、高緩衝空間設計的新選項，或特殊需求空間如展場、舞台、展覽。亦考慮其他工藝如陶藝或製紙工藝的轉化之可能，發展不同媒材，創造更多元的設計製造環境平台，讓雛型更完善乃至於可以實際應用與真實服務人群。

參考文獻

- Anderson, D., Frankel, J. L., et al (2000). "Tangible Interaction + Graphical Interpretation: A New Approach to 3D Modeling", Proc 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp.393-402.
- Asanowicz, A. (1996). Using the Computer in Analysis of Architectural Form, in A. Asanowicz & A. Jakimowicz (eds.), Approaches to Computer Aided Architectural Composition. Bialystok: Technical University of Bialystok.
- Asanowicz, A. (1997). Computer - Tool vs. Medium, Challenges of the Future, eCAADe.
- Asanowicz, A. (1999). Computer in Creation of Architectural Form, AVOCAAD. pp 131-142
- Asanowicz, A. (1999). Evolution of Computer Aided Design: Three Generations of CAD,
- Asanowicz, A. (2002). Evolution of Media for Early Design Stages, in H. Timmermans (ed.), Sixth Design and Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning - Part one: Architecture Proceedings Avegoor.
- Asanowicz, A. (2003). Form Follows Media - Experiences of Bialystok School of Architectural Composition, in M. Stellingwerff and J. Verbeke (eds.), Local Values in a Networked Design World, AVOCAAD.
- Asanowicz, A. / Asanowicz, K. (1995). Designing, CAD and CAD, CAD Space. pp 181-192
- Brady, D. A. (2003). Indecision: Metaphorical. Exploration and Digital Media, eCAADe 21. Graz University of Technology, Australia, pp. 187-190.
- Brown, A. et.al. (2000). Architectural Computing from Turing to 2000, eCAADe. pp 94-100
- Gombrich, E. H. (1961). Psychology and the Riddle of Style, Art and Illusion: A Study in the Psychology of Pictorial Representation. New York: Pantheon. pp 2-30
- H.N.Christiansen, T. W. Sederberg. (1978). Conversion of complex contour line definitions into polygonal element mosaics. SIGGRAPH '78 Proceedings of the 5th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, Pages 187-192 ,ACM New York, NY, USA
- Herbert, D. H. (1993). Architecture Study Drawing, New York: Van Nostrand Reinhold.
- Herbert, D. H. (1994). A Critical Analysis of Design Process and Media.
- Kalay, Y. E. (2004). Architecture's New Media: Principles, Theories, and Methods of Computer-Aided Design. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Knight, T. W. (1991). Designing with Grammars, in G. N. Schmitt (ed.), Computer Aided Architectural Design Futures: Education, Research, Applications, CAAD Futures '91. Weisbaden: Verlag Viewag. pp 33-48

- Liu, W. Y. (2006). Attention Shift in Architectural Style Recognition: The Emerging Digital Style, Hsinchu, Taiwan, Republic of China.
- Liu, Y. T. (1996). Understanding of Architecture in the Computer Era, pp. 106-153, Taiwan.
- Liu, Y. T. (2000). Understanding of Architecture in the Computer Age. Ann Arbor, michigan: Proctor.
- Liu, Y. T. (2001). Defining Digital Architecture: 2001 FEIDAD Award, Birkhauser, Berlin.
- Luescher, A. (1996). Visual Communication in Architecture Design, EAAE Conference.
- Maxe Fisher, S.Fraser, T.Miller, R.Stevens, J.Tinnin, A.Zwaan. (2012). *Digital craft in digital space: A paradigm shift in the making*
- McQuaid, M. (2005). Extreme textiles: designing for high performance, Princeton Architectural Press, New York.
- Miller, Rebecca Leah. (2011). *Digital craft : handmade craft meets digital design.*, University of Texas at Austin.
- Mitchell, W. J. (1977). Computer-aided architectural design. New York: Van Nostrand Reinhold. A5 A] References
- Mitchell, W. J. (1990). The Logic of Architecture: Design, Computing and Cognition. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Mitchell, W. J. (1999). E-topia : "urban life, Jim--but not as we know it". Cambridge: MIT Press.
- Mitchell, W. J., Malcolm M. (1995). Digital Design Media: a handbook for architects and design professionals. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Norman, D. E. (2005). Emotional Design: Why We Love (or Hate) Everyday Things, MIT Press.
- Norman, D. E. (1990). "The Design of Everyday Things", Doubleday, New York
- Norman, D. E. (1998). The design of everyday things, The MIT Press, Cambridge, MA.
- Norman, D. E. (1998). The Invisible Computer: Why good product can fail, the personal computer is so complex, and information appliances are the solution, The MIT Press, Cambridge, MA.
- Norman, D. E. (1998). The Psychology of everyday things, Basic Books(Perseus), USA.
- Norman, D. E. (2005). Human-Centered Design Considered Harmful, ACM Interactions, Vol. 12, No. 4 (July/Aug), pp14-19.
- Oxman, N. (2007). FAB Finding. Predicting the Future, Proceedings of the 25th eCAADe Conference. ISBN 978-0-9541183-6-5. Frankfurt am Main (Germany) 26-29 September, pp. 785-792

- Oxman, N. (2007). Rapid Craft: Machine Immanence and Naïve Materialization. Towards the Future Looking to the Past, Proceedings of IASS 2007, Shell and Spatial Structures: Structural Architecture; Venice, Italy; 269 – 276.
- Oxman, N. (2008). Rapid Gestalt(en). Proceedings of Euro U-Rapid: International User's Conference on Rapid Prototyping, Rapid Tooling and Rapid Manufacturing; Berlin, Germany, 61-69.
- Oxman, N. and J. L. Rosenberg. (2007). *Digital Craft: Fabrication-Based Design in the Age of Digital Production*.
- Oxman, N. and J. L. Rosenberg. (2007). *Material-based Design Computation: An Inquiry into Digital Simulation of Physical Material Properties as Design Generators*. International Journal of Architectural Computing (IJAC). 5(1): 26-44.
- Sharlin, E., Watson, B., Kitamura, Y., Kishino, F., Itoh, Y. (2004). On tangible user interfaces, humans and spatiality, Personal and Ubiquitous Computing, Vol. 8, No. 5, pp. 338-346.
- Stiny, G. / Gips, J. (1972). Shape Grammars and the Generative Specification of Painting and Sculpture, in C. V. Freiman (ed.), Information Processing 71. Amsterdam: North-Holland. pp 1460-1465
- Yuki Igarashi, Takeo Igarashi and Jun Mitani. (2012). *Beady: Interactive Beadwork Design and Construction*. ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2012), Volume 31, Issue 4, Article No. 49, Los Angeles, USA, August.
- Yuki Igarashi, Takeo Igarashi, Hiromasa Suzuki. (2008). *Knitting a 3D Model*. Computer Graphics Forum (Proceedings of Pacific Graphics 2008), Volume 27, Number 7, pp.1737-1743, ISSN 0167-7055, Tokyo, Japan, Oct.
- Zimmermann, T. G., Lanier, J. , Blanchard, C., et al (1987). "A hand gesture interface device", Proc. ACM, Human Factor in Computing Systems and Graphics Interface, pp. 189-192.