

TR-91-001

電腦繪圖模擬陶器製作之應用系統

參	考	書
不	外	借

中央研究院 資訊科學研究所
79.8.-1
圖書室

R5932

中研院資訊所圖書室



3 0330 03 000335 9

私立淡江大學資訊工程研究所

碩士論文

指導教授：鄭國揚 博士

電腦繪圖模擬陶器製作之應用系統

A Computer Graphics Application System
for the Simulation of Pottery Manufacturing

楊玫真 撰

中華民國七十九年五月三十日

資訊工程研究所楊玫真君所提之論文
電腦繪圖模擬陶器製作之應用系統 (題目)，
經本委員會審議，認為符合碩士資格標準。

論文口試委員會 主任委員 吳惠明 (簽章)

委

員

鄭國揚

中華民國 79 年 5 月 30 日

誌 謝

本論文的完成，首先要深深感謝指導教授鄭國揚博士在研究期間耐心的指導與啟發，使學生我獲益豐富。

同時感謝黃俊堯、顏文龍、嚴漢偉、曾德沛、許丕忠、朱首龍等同學在課業上的砥志鼓勵和熱心幫助。

二姊楊淑芳百忙奔走幫我拍攝論文成果，好友程日昌鼎力協助編排論文以及家人親切的關懷，在此誠心誌謝。

再則感謝國科會對這次計畫的支持以及中央研究院資訊科學研究所提供優良的研究環境，使本論文得以順利完成。

最後，謹將本論文呈獻最敬愛的父母親及家人。

楊 玫 真 謹誌

中華民國七十九年六月

論文名稱：電腦繪圖模擬陶器製作之應用系統

頁數：68

校(院)所組別：私立淡江大學(學院)資訊工程研究所

組

畢業時間及提要別：七十八學年度第二學期碩士學位論文提要。

研究生：楊致真

指導教授：鄭國揚 博士

論文提要內容：

近年來，電腦繪圖的應用已深入藝術界，有鑑於一般藝術家對數學和電腦知識的瞭解有限，提供一個專業性的繪圖設計環境，幫助藝術家把他們對視覺認知 (Visual Perception) 的想法，透過電腦產生逼真的影像，是一個值得研究發展的方向。本論文的研究主旨在設計建立一套交談式 (Interactive) 的電腦繪圖應用系統，模擬陶器製作之過程，提供使用親切、便利的製陶創作環境。

分析模擬陶器藝品製作過程的變化及特徵，分別就下列幾個立體電腦繪圖的理論範圍進行探討：

1. 物體模型的塑造 (Object Modeling) —

以 Beta-Spline 曲線描繪陶器藝品縱切面半邊輪廓的線條，並利用其可區域性調整形狀的特性來表現陶坯成形變化的效果，再以旋轉掃掠表示法 (Rotational Sweep Representation) 形成物體模型的立體線架構 (Wireframe)。

2. 真實影像的表現 (Image Rendering) —

採用紋理對應 (Texture Mapping) 和繪影打光 (Shading) 等理論技術來達成影像的逼真效果。

3. 交談式使用者介面 (Interactive User Interface) —

強調以圖形表示、具有高度互動性和直接操縱的使用介面，管理使用者與應用系統之間的溝通問題。

Title of Thesis : A Computer Graphics Total Pages : 68
Application System for
the Simulation of Pottery Manufacturing

Name of Institue : Information Engineering Graduate School
Tamkang University

Graduate Date : 06/1990 Degree Conferred : Master

Name of Student : Mei-Jen Yang Advisor : Prof. Kuo-Young Cheng
楊 政 真

Abstract :

Recently, the application of computer graphics has been widely used in the world of art. However, professional artists usually possess little knowledge of computer graphics and the mathematics used. From this point of view, the design of a programming environment for novice users (artists) easily to represent their visual perception into executable forms is a good research topic. Our study is therefore to design and develop an interactive computer graphics application system for such a purpose. In this thesis, the simulation of pottery manufacturing is selected as an example to show such a goal can be achieved.

To serve our purpose for the simulation of pottery manufacturing, three topics of computer graphics are discussed :

1. Object Modeling —
The half part of the vertical cross-cut portion of the pottery is represented by a Beta-spline curve as the generator for Rotational Sweeping.
2. Image Rendering —
The Texture Mapping and Shading (both Gouraud's and Phong's) are used for the synthesis of realistic 3-D images.
3. Interactive User Interface —
A Visual-oriented and object-based (graphics-based) approach is used in a highly interactive environment for data manipulation.

目 錄

=====

摘 要

第一章	簡 介	-----	1
1.1	緒論	-----	1
1.2	研究動機與目的	-----	4
1.3	論文內容	-----	6
第二章	問 題 解 析	-----	7
2.1	陶器製作流程	-----	7
2.2	模擬範圍界定	-----	9
2.3	問題屬性解析	-----	12
第三章	系 統 模 型	-----	23
3.1	系統環境需求	-----	24
3.2	系統架構	-----	28
3.3	系統描述	-----	28

第四章	理 論 基 礎	35
4.1	曲線表示法	35
4.2	掃掠表示法	40
4.3	繪影打光	42
4.4	紋理產生方法	49
4.5	變形處理	52
第五章	實 例 與 結 果	54
第六章	結 論	64
	參 考 文 獻	66

第一章 簡介

1.1 緒論

圖學在日常生活中扮演著舉足輕重的角色，它是最普通、最多彩多姿的表現方式，也是最自然的溝通語言；然而，就某些應用而言，例如：卡通圖樣、廣告設計片和實驗模擬分析圖等，其製作過程是又耗時間又費成本，因此運用電腦來處理圖學的研究呼之而出。但是，無論是藝術創造或者是描繪自然景物，用電腦來表現都牽扯到大量的數字資料和繁複的運算學理，需要大容量的記憶空間、高速計算處理能力和高解析度的顯像儀器，這些問題在電腦硬體技術的日新月異之下，已逐漸克服，促使電腦繪圖（Computer Graphics）躍昇為熱門的計算機應用科學之一，在電腦輔助設計（CAD）、電腦輔助教學（CAI）、電腦藝術、廣告和建築設計及實驗模擬等學門內，都廣泛採用探討著，[1]。

近年來，電腦繪圖著眼點於三維電腦繪圖（3-D Computer Graphics）的研究，內容在考量使用者對電腦的認知來開發視覺導向語言（Visual-Oriented Language）的電腦繪圖系統，期能將使用者腦中想的景物，以圖形的相

關數據表示，經過系統的處理轉換，輸出圖形顯示數據。其分下列幾個研究範圍，涵蓋了電腦、數學、物理和藝術等四大學門的綜合應用：

1.物體塑形 (Object Modeling)：

針對立體或幾何物體形狀的設計和製作，以及演算法和資料結構等之研究，目的在勾畫出物體的立體造型 [2]。

2.影像合成 (Image Synthesis)：

建立物理模式，模擬真實物體與光源之間的光學現象 (Optical Process)，以產生真正逼真的 (Realistic)合成影像畫面 [3]。

3.立體電腦動畫 (3-D Computer Animation)：

利用電腦來製作一連串的畫面，並藉著人類視覺暫留的特性，以一定的速度連續顯示畫面而產生動感。例如：Keyframe 動畫系統和 Physical-based Modeling 動畫系統，分別在研討以電腦產生 Keyframe 主畫面之間的變化圖形 (In-between) 和以模擬自然界或物理學的現象來產生動畫 [4]。

4.使用者介面管理系統 (User Interface Management System)：

建立使用者與應用系統之間的溝通管道，強調以圖形表示 (Graphic-based)、直接操縱 (Direct Manipu-

lation) 和高度互動性 (Interactive) 的特性，達到易用 (Usability)、用途廣 (Generality)、容易維護 (Maintainability) 和移植性 (Portability) 的目標。如今，個體導向的使用者介面 (Object-Oriented User Interface) 不同於以往以處理程序導向 (Procedure-Oriented) 揣摩使用者心態的想法，而改以個體件 (Object) 為處理對象的觀點來架構系統 [5][6]，是一頗具潛力的研究題目。

目前電腦繪圖工作站 (Computer Graphics Workstation) 正方興未艾，為電腦繪圖的研究打出一片光明的前景，也替各行各業創造了一個繪圖製作的好環境。然而，縱使電腦繪圖的軟硬體設備能提供愈來愈多的功能和產生很逼真的影像效果，對一般非電腦業界的某專業應用者而言，這仍是電腦世界，必須同時具備電腦繪圖的概念和專業應用知識者，才能夠得心應手地充分發揮。因此，一種以電腦繪圖設備提供的繪圖軟體從事基層的影像構圖工作，而上層架構以應用對象的專業知識為引導方向的溝通介面之應用系統的研究開發，是電腦繪圖應用領域極待努力的方針，也是本論文的重點。

1.2 研究動機與目的

傳統的設計工作是設計家把創作構思草擬於紙上，再依照草圖來實作，重覆修正結果直到符合設計原意為止；但是，實作的成本往往很高，需要一套實體藍圖模型(Physical Model of the Blueprint)，模擬實作的環境和步驟，預先展現設計成果，以便進行修正和評估，減少不必要的成本浪費；有鑑於此，電腦繪圖被運用於模型設立的理念因此興起，藉由其容易製作和圖像顯示的功能，將設計工作環境轉移到電腦提供的模型系統上。

站在應用的立場，利用電腦繪圖建立藝術設計的模型環境，在藝術家使用者與應用系統之間，搭建一座圖形溝通橋樑，是本論文的研究動機。目的在希望架構一套電腦繪圖應用系統，把藝術家腦中所構想的圖像（稱構想圖形模型），以數學公式來描述（稱數學模型），經由電腦的運算和影像處理，產生結果（稱實體圖形模型）；讓使用者透過系統介面環境，輸入設計藍圖，可以直接操作和修改，來驗證設計的成品 [9]，其關係請參考圖 1-1。

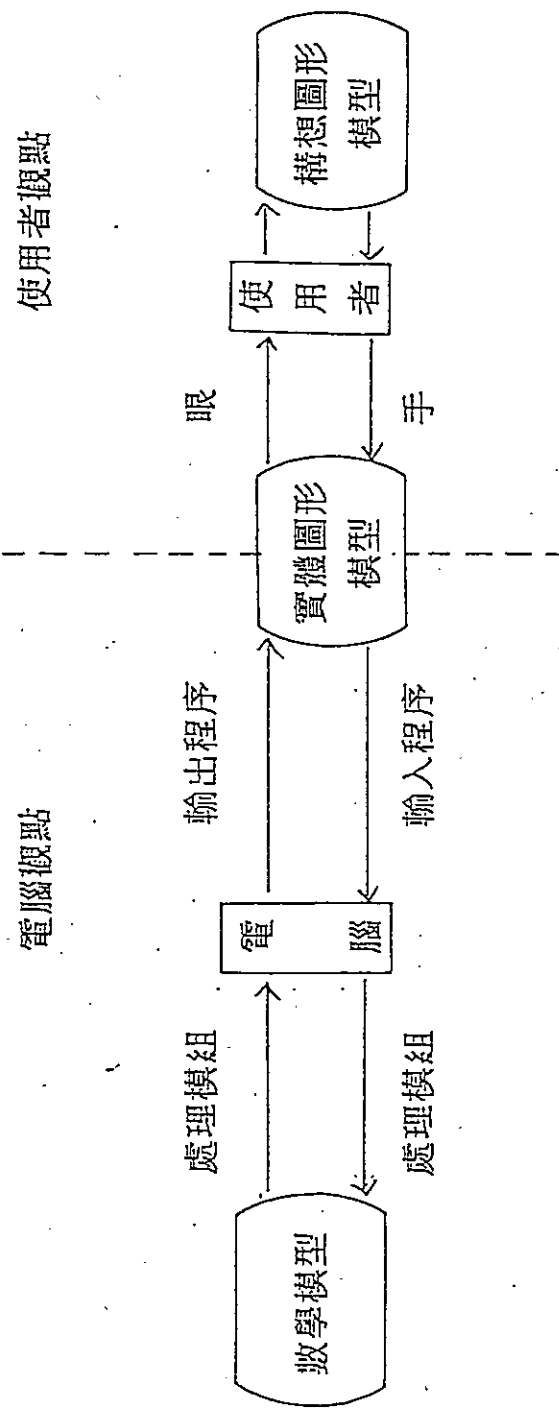


圖 1-1：使用者與電腦繪圖應用系統之關係

1.3 論文內容

基於上述的觀念，本文以陶器製作為例，發展一套電腦繪圖應用系統，以交談式的表現方式，模擬陶藝家製作陶器藝品的過程。個別分析使用者立場之構想圖形模型的屬性、電腦系統立場處理的數學模型和圖形影像理論以及使用介面管理等部份一一進行討論。章節的內容概要簡述於後：

第二章 問題解析：

了解陶器實際製作的情形，分析陶器體本身和生產過程的特徵，提出解決辦法，並且以電腦繪圖之應用立場考慮處理之道。

第三章 系統模型：

以軟體系統設計的觀點，架構陶器製作模擬系統，包括系統的需求環境、系統結構和運作功能描述等。

第四章 理論基礎：

探討系統模型所依據採用的電腦繪圖學理。

第五章 實例與結果：

示範陶器製作模擬系統的執行動作和結果。

第六章 結論：

評估應用系統的結果以及未來的延伸方向。

第二章 問題解析

本章重點在瞭解人工陶器製作的情形，分析陶器體本身及其製造過程的屬性，以系統設計觀點，討論這些屬性在物體塑形、影像表現和使用介面三方面有何解決之道。內容分三小節：2.1 陶器製作流程；2.2 模擬範圍界定；2.3 問題屬性解析。

2.1 陶器製作流程

傳統人工的陶器製造分為兩大步驟：1.製坯，2.上釉。所謂製坯就是製作陶坯：把一團已經揉練處理過的陶土以雙手或器具用拉、捻、壓、擠等方法塑造陶器品的立體形狀，稱之為陶坯。製坯的方式有下列幾種 [17] [18]：

1.手捏製坯法：

不採用任何器具，完全運用雙手捏壓陶土成形；此法在製作上雖然較有彈性，陶坯形狀卻較為粗糙，適合小樣且形狀特殊的陶器藝品之製作。

2.盤繞製坯法：

將陶土搓成圓形細長繩狀，盤繞成固定的形狀，再用陶土糊平接縫處之空隙；此法一般被用於大型陶器體的製作，例如酒甕。

3. 滾壓成形製坯法：

使用工具在陶土上以滾動和壓擠的方式來製成陶坯的粗略外形；此法通常配合其他製坯法的採用，適於製作扁平寬大的盤子狀陶器。

4. 旋轉拉坯法：

將陶土放置在一個一直轉動不停的旋轉盤上，用雙手手掌合抱緊貼土緣，利用黏土之可塑性，以力道拉壓成形；這類的陶坯形狀都是輪廓左右對稱的圓形體，諸如壺、瓶等，為我國製陶術古老的方法之一；因為此種製器法為個人技術之最高表現，可以不需任何模具而能製出劃一式樣的陶器用具，目前有陶藝工廠將旋轉拉坯法委以機械全自動化大量生產；相反地，也可製成絕對不相同樣式的任何圓形坯體，將作者本身的思想、意境表現無遺，是一種高度的技與藝之結合，所以仍為近代極受重視的一種製陶技術。

為了增加陶藝品樣式的多變性，在經過上述製坯法完成後的陶坯，可施以再加工的處理，例如：(1) 多邊形體，拍打壓平圓形弧面改變圓形體成為有角的多邊形體；(2) 坯口造型，在坯口用手捻出壺嘴或波浪花瓣形；(3) 非對稱性變形，拉彎直立的坯體，使之對稱性改變；(4) 坯體結合，把多件獨立的陶坯體加以組合黏接成一件完整品

，比如，茶壺之壺嘴、手把和壺身之接合等，這些加工變形大大地添加了陶器藝品之趣味性。

陶坯的形狀確定完成後，於坯體刻畫圖案，塗繪釉彩後送進爐窯內燒陶，這是製陶的第二大步驟——上釉；經過施釉燒陶後的陶器，才是具有釉彩光亮平滑質感的製成品。綜合以上的描述，陶器製作的過程可歸納於圖2-1。

2.2 模擬範圍界定

陶器製作的幾種製坯法中，以旋轉拉坯法製造的形狀最具有固定的模式，也最受陶藝家喜愛，因此，在本論文中僅針對旋轉拉坯法來揣摩製坯時陶坯體的變化，而坯體加工部份則考慮多邊形體、坯口造型和非對稱性變形的處理，最後，表現陶器表面施釉的紋彩效果。模擬範圍界定圖請參考圖2-2。

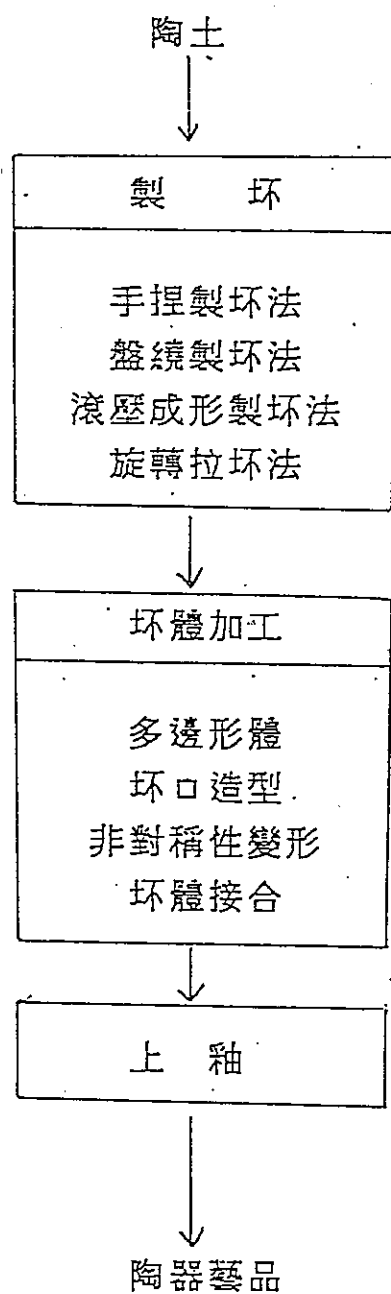


圖 2-1 : 陶器製作流程圖

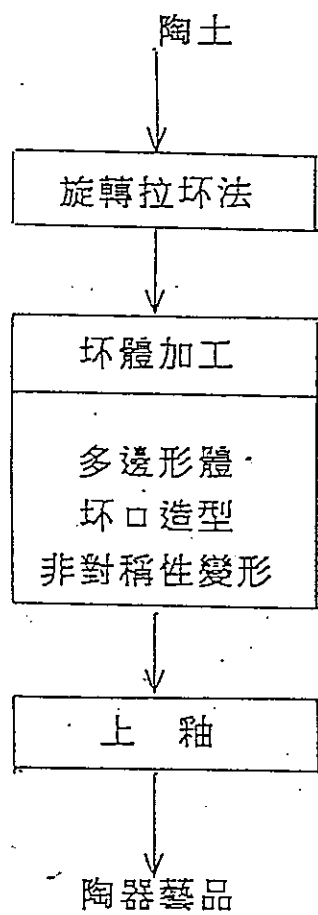


圖 2-2：陶器製作模擬範圍界定圖

2.3 問題屬性解析

一件陶器藝品的品味重點在於陶器的立體造型；為了能夠抓住陶器的神韻達到在電腦繪圖上的表現效果，茲就1.問題的屬性，分析陶器形狀的特徵和陶器在成形過程中的考慮因素；2.解決問題的方法，討論相對於屬性和問題的解決辦法方；3.電腦繪圖處理之道，依據前二項的結果，應用電腦繪圖的理論做為系統的處理基礎，從物體模型塑造、真實影像表現和使用介面等三方面來探討。

1.問題的屬性：

採用旋轉拉坯法來製坯，陶器體從未成形的陶土到成形的陶坯都具有相似的形狀模式：

- (1) 為立體固狀器形。
- (2) 器體的橫切面是半徑大小不等的同心圓形面，請參考圖2-3。
- (3) 器體的縱切面是一輪廓為不規則(free-form)形狀而左右兩邊對稱的圓滑曲線，請參考圖2-4。

至於陶器在成形過程中的考慮因素有：

- (4) 陶坯的大小受陶土的體積限制。
- (5) 拉坯的過程是不斷地以雙手擠壓和拉高陶土等動作來反覆修飾坯體的形狀，直到滿意為止。
- (6) 坯體因為雙手合包的力道，在受力處產生一圓環

狀的外形變化，被擠出多餘的陶土，則以拉高的手法往上撫平。

(7) 坯體加工的部份，例如：在圓平的器口處做出壺嘴或波浪花瓣狀，或者拍壓圓弧面使之扁平形成多邊形體，或者歪曲扭捻坯體改變其直立對稱性，變化情形請參考圖2-5。

(8) 上過釉彩的陶器製成品，因為釉質料的關係，使器體表面呈現平滑光亮的質感。

2. 解決問題的方法：

陶器的形狀特徵，是物體幾何表示的依據；關於陶器這一類型立體模型的產生方法有二種：

(1) 由半徑不等的大小同心圓面，以縱向軸為軸心，緊密排列組合相疊而成立體形狀，請參考圖2-6。各圓面在理論上有二種定義法：

(a) 二維的圓面依直線軸方向掃掠，掃掠過程中圓面 s 隔一段距離後增減半徑值得圓面 t ，二圓面以直線相連兜成立體物，如圖2-7。

(b) 先產生幾個圓面主畫面(Keyframe)，再計算填滿主畫面之間的圓面(in-between)而連接成形，如圖2-8。

(2) 取得縱切面輪廓左右對稱的半邊線條形狀，其為

一條平滑的二維曲線，以縱向軸為中心軸，旋轉曲線一圈三百六十度，所轉動走過的軌跡，即是器體的三維立體造型，請參考圖2-9。

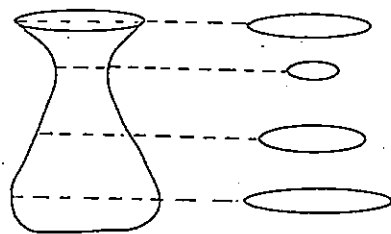


圖 2-3：陶器橫切面圖

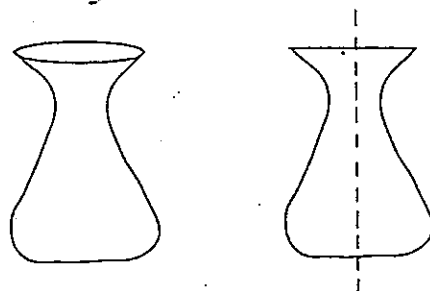
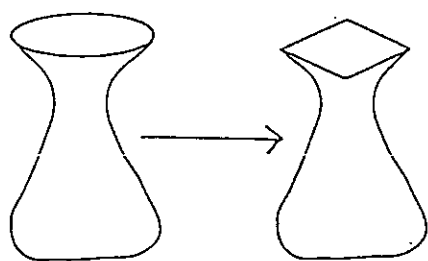
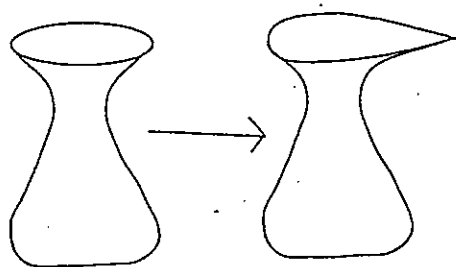


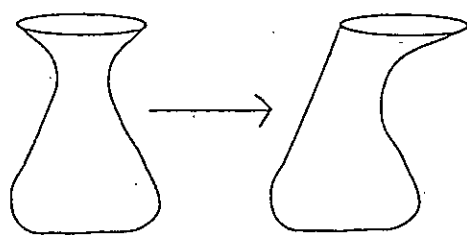
圖 2-4：陶器縱切面圖



多邊形體變形



坏口造型



非對稱性變形

圖 2-5 : 坏體加工變形圖

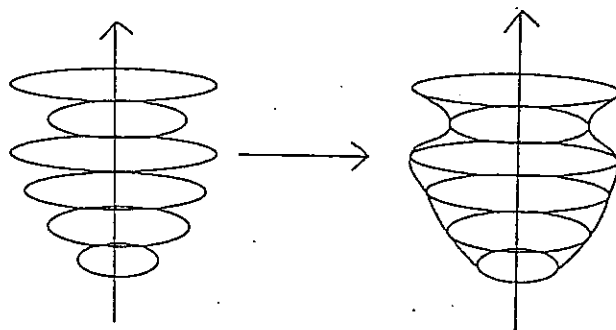


圖 2-6：半徑不同同心圓面之塑形法

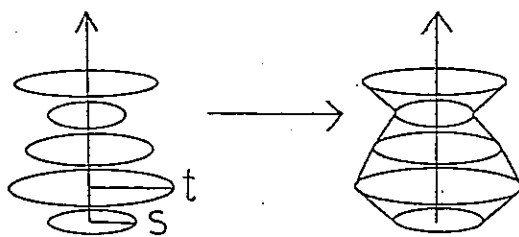


圖 2-7：圓面直線掃掠法

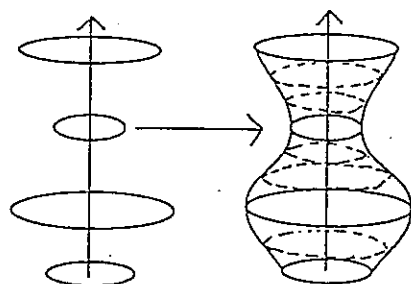


圖 2-8：圓面主畫面塑形法

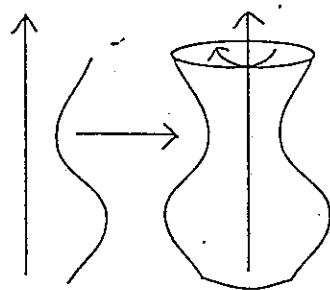


圖 2-9：曲線旋轉之塑形法

由於坯體形狀的改變是利用雙手在坯體外形上移動擠壓來達到修飾坯形的目的，對整體而言，只有在受力處發生變形；基於這一點，以前述之第二種塑形法較容易達到這方面的效果，只要採用具有區域性可調整變形的二維曲線來描述半邊輪廓，藉著同一條曲線的調整變化，表現出拉坯時擠壓坯體的感覺，如此可以造出不同外形的陶坯，請參考圖2-10。同樣地，坯體加工是為了增加陶器的多樣性，藉著修改陶坯的輪廓曲線，根據該曲線的變化來對陶坯做整體性的變形而產生非對稱性的效果，請參考圖2-11；致於多邊形體的造型，則改變曲線旋轉軌跡的路徑，以多邊形軌跡取代圓形軌跡，請參考圖2-12；而坯口造型則在器口附近做局部性的變形處理，請參考圖2-13。再則，因為陶土的體積決定了陶器的體形大小，依照這一個準則來控制製坯過程中各階段陶坯的形狀變動範圍，以符合近似實際製作的情況。最後，要表現出陶器體表面的平滑光亮感，考慮器體的圖案顏色及跟光線的關係(亮度模組)，這就要運用電腦繪圖的影像處理理論來配合達成。

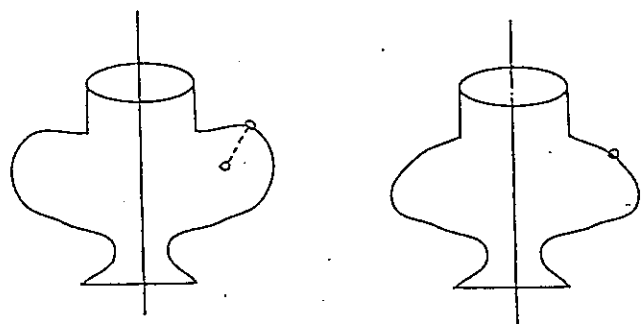


圖 2-10：曲線區域性變化改變陶坯的造型

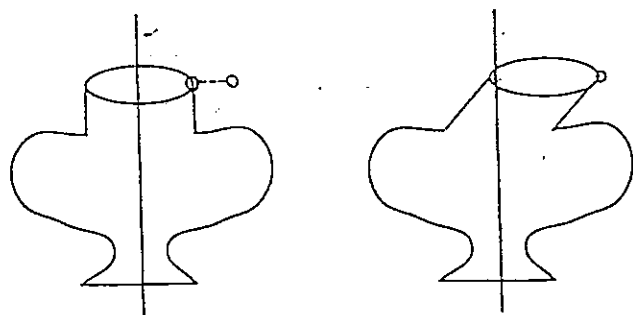


圖 2-11：變化曲線達到非對稱性變形效果

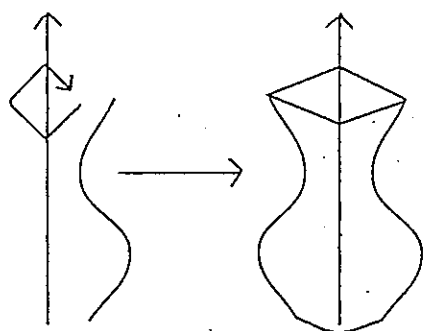
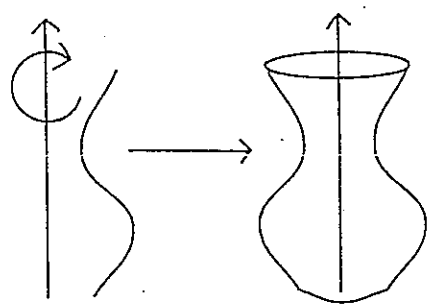


圖 2-12：變化旋轉軌跡達到多邊形體效果

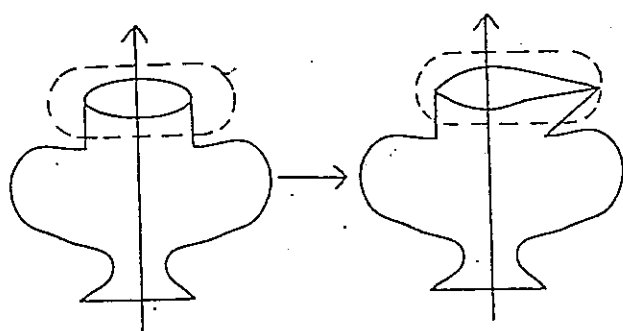


圖 2-13：環口區域性造型

3. 電腦繪圖處理之道：

綜合上述的分析結論，欲以電腦繪圖來模擬陶器製作，其處理要點須從三方面著手：(1) 物體塑造模型，(2) 真實影像表現，(3) 使用介面；針對各種屬性和問題解決方式提出可以應用的電腦繪圖理論及方法，做為架構系統模型的基礎。

(1) 物體塑造模型 (Object Modeling)：

是電腦繪圖的基礎，也是影響影像成敗的關鍵。陶器的塑形方式，經過分析後知道其主要決定於一段曲線和一條旋轉軌跡，在電腦繪圖幾何模型 (Geometric Modeling) 中旋轉掃掠表示法 (Rotational Sweep Representation) 正滿足此描繪功能，其具有二個參數，分別為一段曲線 (或面) 和一條方向路徑，讓曲線沿著路徑旋轉而得到立體模型，至於曲線表示法有多種 Spline 理論，本論文採用 Beta-spline 曲線來表現陶器半邊輪廓的不規則形狀，利用控制點 (Control points) 的調整而區域性改變形狀；另外，坯體加工是屬物體變形的範圍，變形理論 (Deformation) 也是應用的基礎。

(2) 真實影像表現 (Image Synthesis)：

在電腦繪圖裡要讓物體看起來逼真，繪影打光 (

Shading)的處理步驟是不可減少的，透過它才能表現出陶器立體的真實感，而研究物體外表紋路生成的紋理產生方法(Texturing)，則有助於凸顯出陶器表面的釉彩花紋。

(3)使用介面 (User Interface):

根據使用者製作陶器的概念來設計介面環境，編排簡便的參數和圖形做為輸入和輸出的溝通語言，拉近使用者與系統之間的距離。

圖2-14是綜合前面談到的理論與應用系統的關係圖，理論細節將於第四章中介紹。

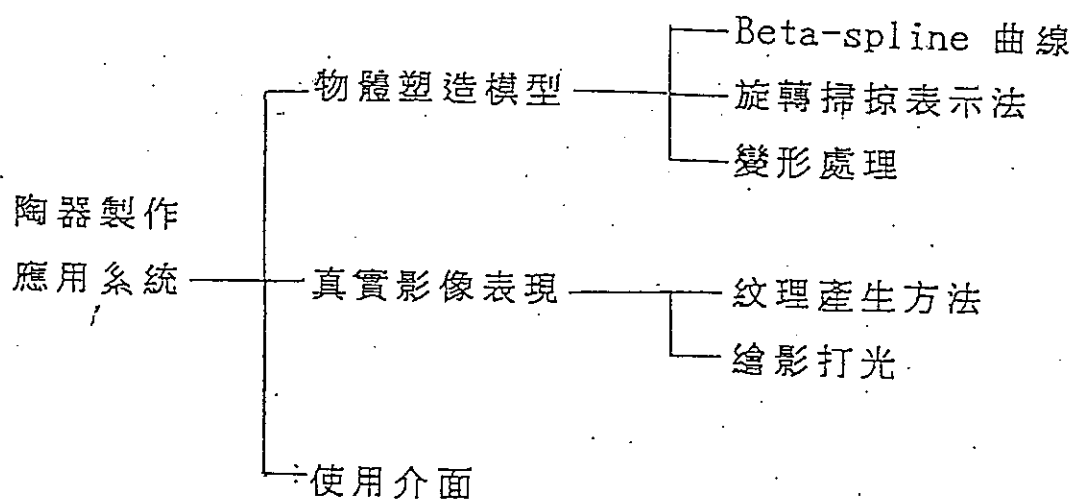


圖 2-14 : 電腦繪圖應用系統之理論

第三章 系統模型

發展電腦繪圖模擬陶器製作之應用系統，主要在建立一套系統模型，其輸入陶器的描述參數，經過系統轉換處理後，能輸出陶器的立體逼真影像，而透過系統的重覆運作，修訂描述資料，直到產生滿意的結果為止。系統模型圖如圖3-1 所示。

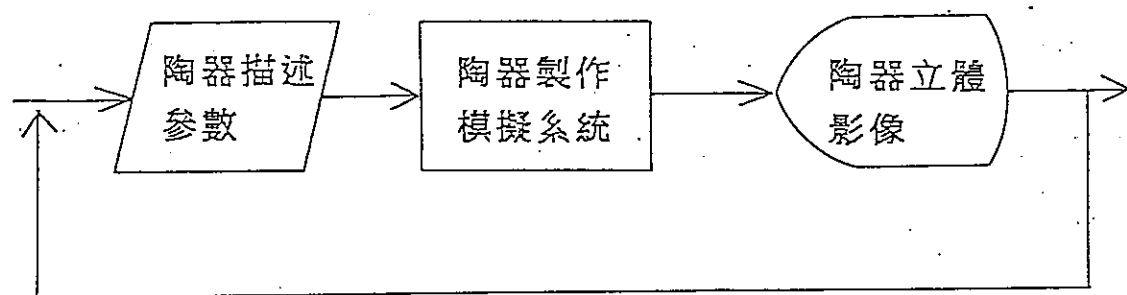


圖 3-1：系統模型圖

整理前一章分析的結論和處理理論要點，本章以系統開發的觀點來完成系統模型的細部內容，以 1.系統環境需求、2.系統架構和 3.系統描述等三小節來敘述。

3.1 系統環境需求

研究發展的系統設備環境，不外乎分硬體和軟體兩大要件，缺一不可：

1. 硬體設備：

本系統在 VAX-11/750 主電腦和 SUN 工作站上開發，並配合採用 Evans & Sutherland(E&S) 的 PS300 電腦繪圖工作站來負責圖形的向量處理和真實影像表現；硬體設備的整體結構圖請參考圖 3-2。

2. 軟體設備：

本系統使用到的軟體工具有：

(1) VAX-11/750 ULTRIX 作業系統。

(2) C 語言：

擔任架構系統運作的流程控制與整合工作。

(3) USNA CADIG Software：

為美國海軍學院所開發，是一套電腦繪圖輔助設計工具，用來幫助物體模型的塑造。

(4) Animator：

是電腦動畫產生系統，由美國柯羅拉多州大學設計，處理真實影像表現的問題。

(5) PS300 Software System：

由 E&S 公司發展，針對 PS300 繪圖工作站特定機器提供的軟體。

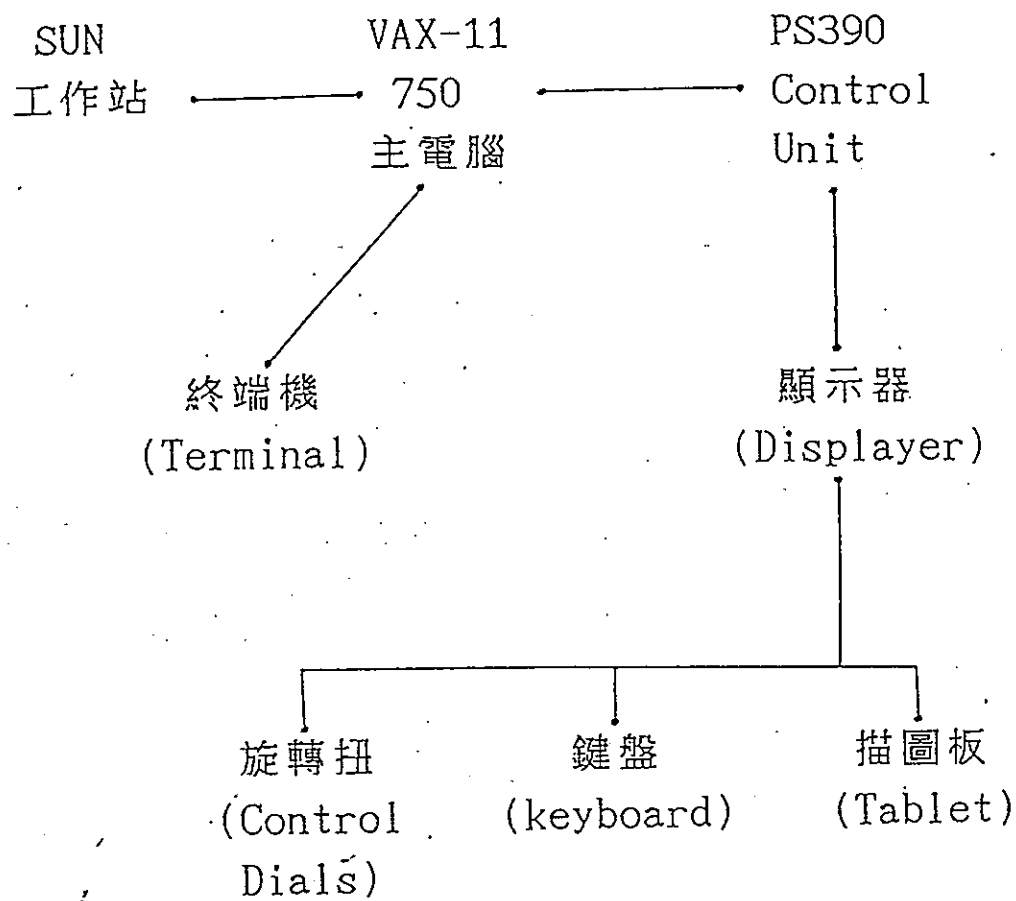


圖 3-2 : 硬體設備結構圖

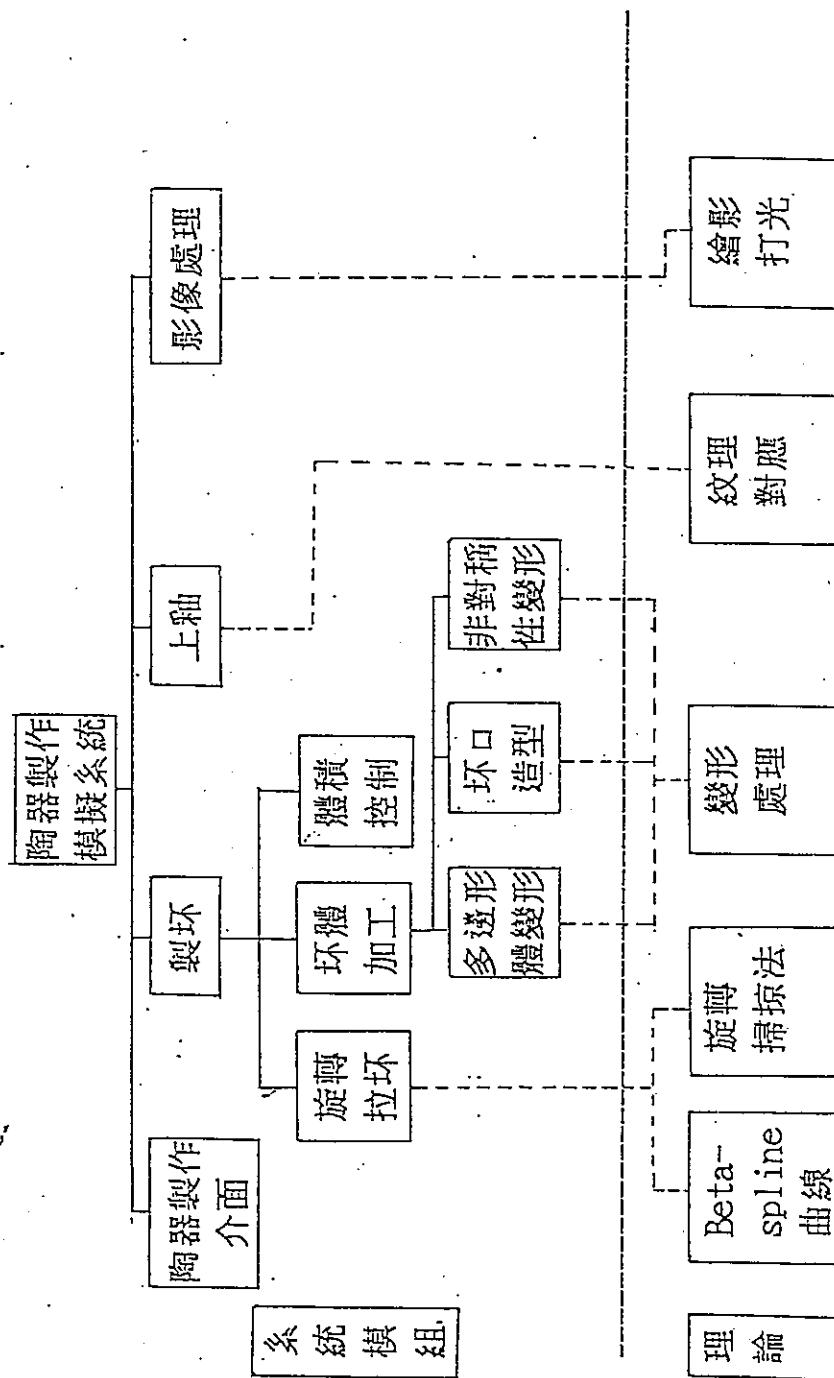
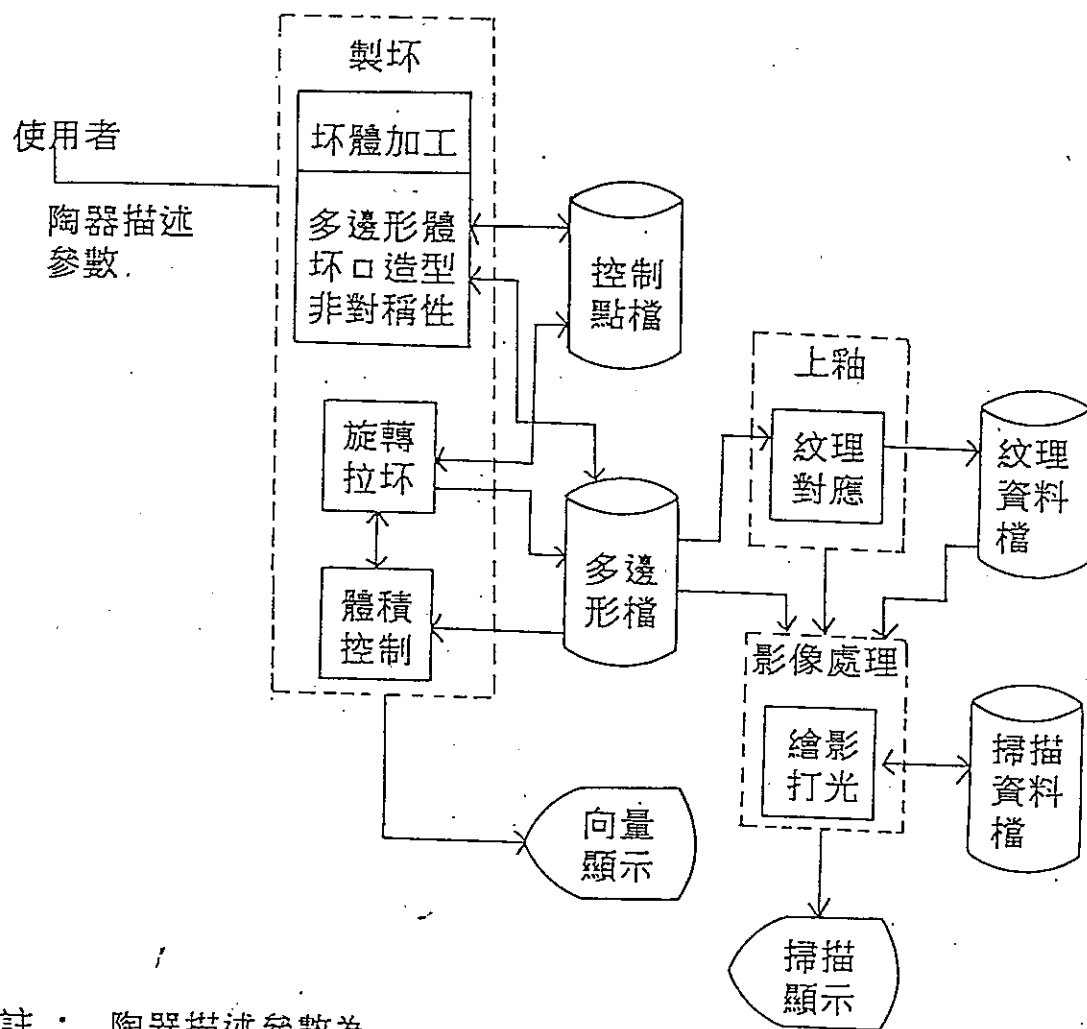


圖 3-3：系統架構圖



註：陶器描述參數為
 1. 陶土之高、寬、厚度值
 2. 陶器之輪廓控制點、
 紋理和變形參數

圖 3-4：系統資料流程圖

3.2 系統架構

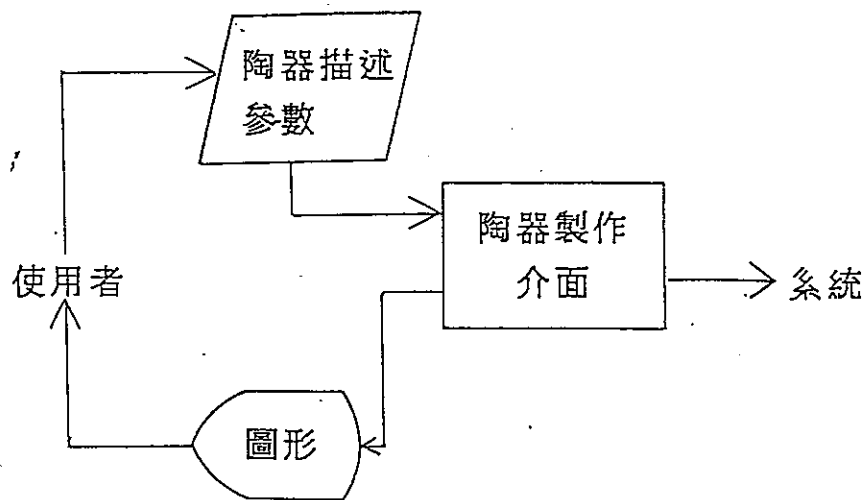
總匯模擬陶器製作的內容與適用的電腦繪圖處理方法，建立系統模組架構圖為圖3-3。系統的運轉帶動了資料的流動，加入資料的觀點，圖3-4 為系統資料流程圖。

3.3 系統描述

茲就系統架構圖中，各模組的流程圖、輸出資料、輸入資料和功能等說明來描述系統模型。

1. 陶器製作介面模組：

流程圖：



輸出：(1) 電腦系統可接受處理的資料格式。

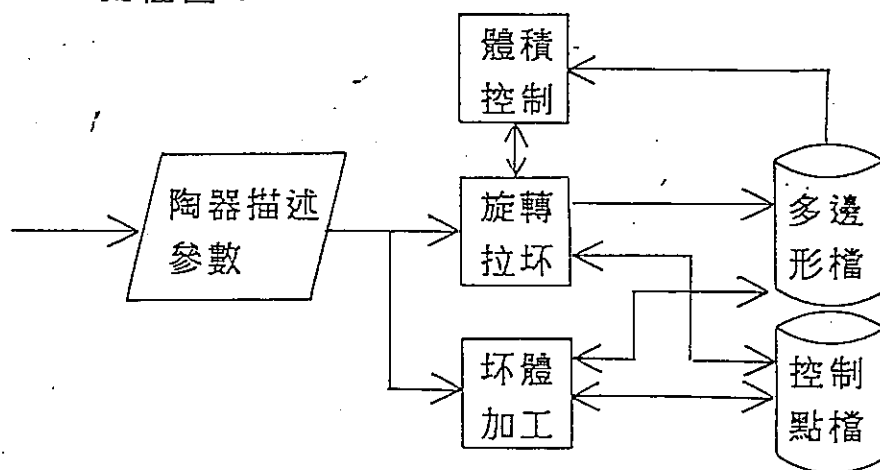
(2) 使用者能了解的陶器製作術語和圖形。

輸入：陶器描述參數，如陶土的高度、寬度和厚度、變形參數以及陶器的外形輪廓和紋理資料。

功能：設定系統的起始環境，並在系統運作的全部過程中擔任使用者與系統之間的語言傳達轉譯工作，採取以陶器製作之步驟為指引的交談方式，接受使用者輸入陶器描述參數和處理控制指令，配合圖形表現方式，供使用者重覆修飾陶器半面輪廓的形狀，最後，將系統處理完成的影像結果顯示給使用者。

2. 製坯模組：

流程圖：



輸出：陶器立體造型的多邊形(Polygon) 檔。

輸入：陶器半面輪廓控制點(contorl points)檔和陶器描述參數，如陶器之寬、高、厚和變形參數。

功能：完成陶器立體塑形的工作，內分旋轉拉坯、坯體加工和體積控制等三個子模組。前二個子模組於後說明；體積控制子模組的功能是計算陶器的體積和控制陶器成形變化的限度，採用一般的立體幾何體積公式：

$$V_o = \sum_{i=1}^n H \cdot (B_1 + 4 B_m + B_2) / 6$$

其中 n ：物體被分割成 n 小段

V_o ：物體的體積，為各小段體積之和

B_1 ：每小段的上底面積

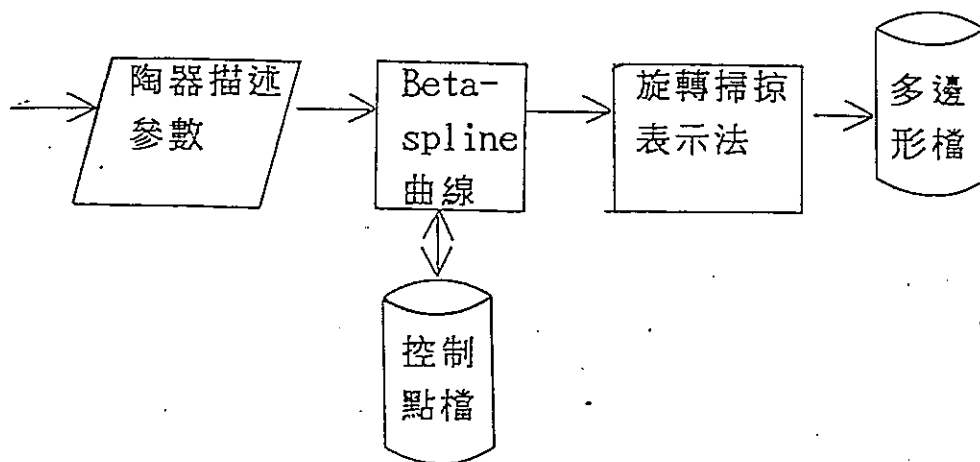
B_2 ：每小段的下底面積

H ：每小段的高度

B_m ：每小段中間層面積

3. 旋轉拉坯子模組：

流程圖：



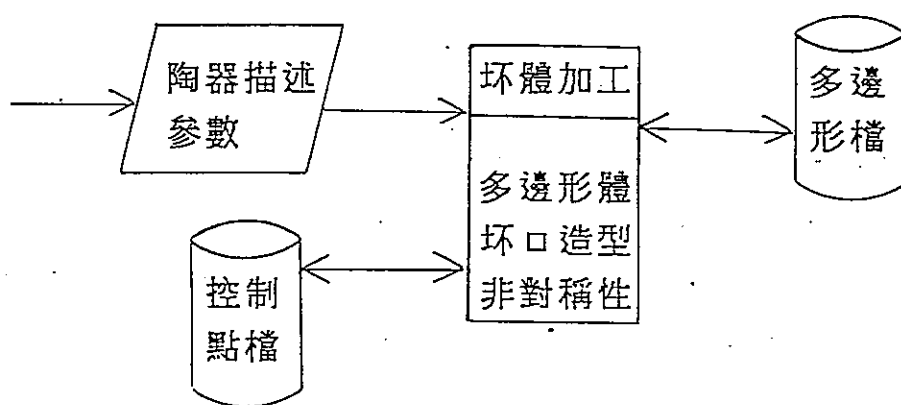
輸出：陶器立體造型的多邊形檔。

輸入：陶器半面輪廓控制點檔和陶器描述參數，如陶器之寬、高、厚度。

功能：造出陶器的立體型態。先以 Beta-spline求得對應控制點的曲線 G ，再用旋轉掃掠法 R 依著旋轉軌跡 r 轉動 360度求得對應曲線形狀的立體資料多邊形檔 P ，則 $P = R(G, r)$ 。

4. 坯體加工子模組：

流程圖：



輸出：已經加工變形後的多邊形檔。

輸入：陶器半面輪廓控制點檔和陶器描述參數，如多邊形體的邊數、坯口控制參數和非對稱性變形之輪廓控制點。

功能：處理坯體加工變形，根據變形參數應用變形理論執行三個獨立的子功能：

(1) 多邊形體變形子功能：輸入多邊形的邊數
改變輪廓曲線掃掠的路徑。

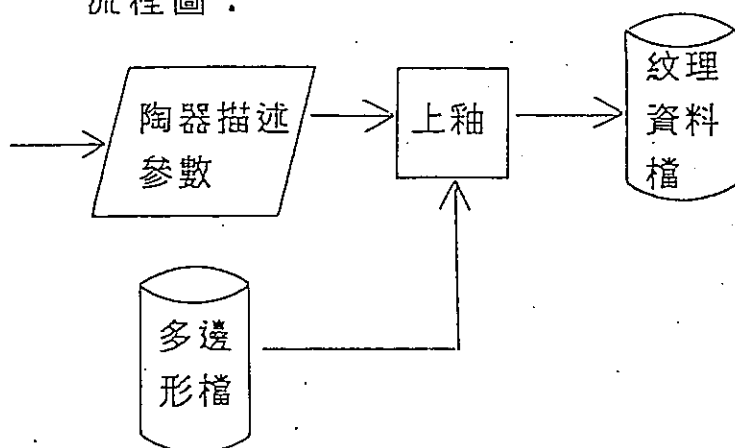
(2) 坯口造型：指定樣式參數，如壺嘴或花瓣

數目，調整坯口部份的控制點予以造型。

(3)非對稱性變形：調整原對稱性之陶坯輪廓曲線，由新舊二條曲線的差異以變形公式處理產生非對稱性之結果。

5.上釉模組：

流程圖：



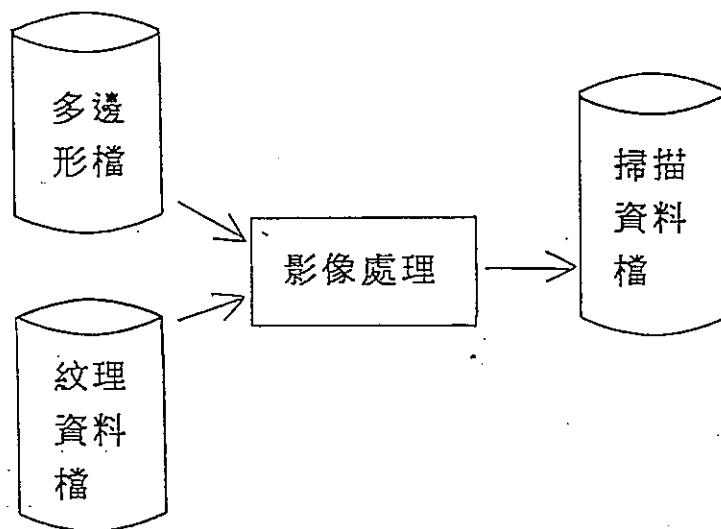
輸出：已經完成紋理對應的紋理資料檔。

輸入：陶器立體造型的多邊形檔和陶器描述參數，如紋理描述資料。

功能：處理陶器表面圖紋繪彩的表現，應用電腦繪圖的紋理產生方法(Texturing)做為基礎理論。

6. 影像處理模組：

流程圖：



輸出：掃描顯示資料(Raster) 檔。

輸入：陶器立體造型的多邊形檔和紋理資料檔。

功能：採用繪影打光(Shading) 的理論，產生陶器的真實影像，以彩色掃描方式顯示結果於螢幕。

第四章 理論基礎

由於陶器製作模擬應用系統的表現方式乃以圖形影像為主，必須參考到電腦繪圖的理論，本章即就這些學理一一加以探討，以期了解其特性及其被採用的理由。

4.1 曲線表示法

曲線表示法在立體電腦繪圖領域裡，常被用於不規則狀(free-form)物體的塑形，以Bezier曲線和B-spline曲線為最常見到的模式，而Beta-spline曲線，是B-spline曲線另一種公式表示法的新生代，藉著 Bias 和 Tension 這兩個自由度參數的搭配，方便形狀修飾，增加了物體多變性的造型。Frank Crow 曾以 Bezier 曲面來勾畫茶壺的外形[7][8]，為茶壺的製作方式立下了範本，但是，因為 Bezier 曲線不具區域控制性(localness)，無法局部修改曲線的形狀，並不適合用於表現陶器輪廓小範圍變形的要求。B-spline曲線配合旋轉處理造出各種花瓶的例子[9]，已具有相當不錯的效果；然而，本應用系統採用了Beta-spline曲線，理由在於其除了涵蓋 B-spline 曲線的所有屬性外，更具有較少的限制，在應用上會產生較大的彈性。以下則對 Beta-spline曲線的理論和特性做一說

明 [10][11] :

1. Beta-spline 理論是Brian 和Barsky所提出的曲線畫法。
2. Beta-spline 曲線由一組控制點(Control Points)所定義，控制點的位置決定了曲線的形狀。
3. 採近似法(Approximation Method)，曲線逼近控制點但並不通過，其結果會落於控制點圍成的凸面多邊形(Convex Hull) 範圍內。
4. 具有區域性(Localness)，每一點控制點的影響範圍只限於控制點附近的區段。
5. 每一段曲線由 4 點控制點控制，所以 n 點控制點可決定 $(n - 3)$ 段曲線，曲線段上的每一點可視為這 4 點控制點的平均權數值，而曲線次數(degree)為 3 次。
6. Beta-spline 的數學式子：
 - (1) 令 μ 表範圍參數(Domain Parameter) $0 \leq \mu < 1$ ，其決定在一段曲線上的位置，所以第 i 段曲線可以 $Q_i(\mu)$ 表示。
 - (2) 令 $[V_0, V_1, \dots, V_n]$ 為一組控制點，則第 i 段曲線 $Q_i(\mu)$ 決定於四點控制點 V_{i+r} ， $r = -2, -1, 0, 1$

$$Q_i(\mu) = \sum_{r=-2}^1 b_r(\beta_1, \beta_2; \mu) V_{i+r} \quad 0 \leq \mu < 1$$

其中

(a) $b_r(\beta_1, \beta_2; \mu)$ 為 Basis Function, 具有 Convex Hull 特性,

$$\sum_{r=-2}^1 b_r(\beta_1, \beta_2; \mu) = 1$$

$$b_r(\beta_1, \beta_2; \mu) = \sum_{g=0}^3 C_{rg}(\beta_1, \beta_2) \mu^g$$

$$0 \leq \mu < 1, \\ r = -2, -1, 0, 1$$

而 $C_{rg}(\beta_1, \beta_2)$ 是係數矩陣

$$C_{rg}(\beta_1, \beta_2) =$$

$$\frac{1}{\delta} \begin{bmatrix} 2\beta_1^3 & 2(\beta_2 + \beta_1 + \beta_1 + \beta_1) & -2(\beta_2 + \beta_1 + \beta_1 + 1) & 2 \\ 6\beta_1^3 & -3(\beta_2 + 2\beta_1 + 2\beta_1) & 3(\beta_2 + 2\beta_1) & 0 \\ -6\beta_1^3 & 6(\beta_1 - \beta_1) & 6\beta_1 & 0 \\ 2\beta_1^3 & \beta_2 + 4(\beta_1 + \beta_1) & 2 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\delta = 2\beta_1^3 + 4\beta_1^2 + 4\beta_1 + \beta_2 + 2$$

(b) β_1 與 β_2 為形狀參數 (Shape Parameters) [12]

β_1 為 Bias, 控制曲線段的歪斜度, $\beta_1 > 0$

$\beta_1 = 1 \rightarrow$ 曲線不歪斜

$\beta_1 \neq 1 \rightarrow$ 曲線向一邊歪斜

β_2 為 Tension, 控制曲線段的鬆緊度, $\beta_2 \geq 0$

$\beta_2 = 0 \rightarrow$ 曲線圓滑

$\beta_2 > 0 \rightarrow$ 曲線隨 β_2 值增大而愈平直。

當 $\beta_1 = 1$, $\beta_2 = 0$ 時, 則 $C_{gr}(\beta_1, \beta_2)$ 即為 B-spline 曲線的係數矩陣。

7. Beta-spline 曲線為 Geometric Continuity。

令 $Q_i(\mu)$, $Q_{i+1}(\mu)$ 表二段曲線, 滿足下列三點:

(1) 二段曲線位置連續 (Positional Continuity)

$$Q_{i+1}(0) = Q_i(1)$$

(2) 單位切向量連續 (Continuity of Unit tangent Vector)

$$Q_{i+1}^{(1)}(0) = \beta_1 Q_i^{(1)}(1)$$

(3) 曲率向量連續 (Continuity of Curvature Vector)

$$Q_{i+1}^{(2)}(0) = \beta_1 Q_i^{(2)}(1) + \beta_2 Q_i^{(1)}(1)$$

其中

Curvature Vector =

$$\frac{\beta_1^{(1)} Q_i(1) \cdot Q_{i+1}^{(2)}(0) \cdot \beta_1^{(1)} Q_i(1)}{|\beta_1^{(1)} Q_i(1)|^4}$$

當 $\beta_1 = 1$ 時，可得到一次導函數的 Parametric Continuity；而 $\beta_1 = 1$ ， $\beta_2 = 0$ 時，表示為一次及二次導函數的 Parametric continuity，可知 Geometric Continuity也包含了Parametric Continuity的意義。

Beta-spline曲線其實是 B-spline曲線另一種公式形式的表示法，其特性乃繼承於 B-spline，二者最大的差別是前者為 Geometric Continuity 而後者是Parametric Continuity；B-spline 曲線表示的技術發展於參數導函數向量(Parametric Derivative Vectors)的連續，缺點是不僅與曲線的幾何特性有關還取決於參數表示法的選擇，其受限條件較多；Beta-spline 針對改進此一缺點，藉由Bias和 Tension這二個形狀參數，以更具基本幾何衡量

意義的單位切向量和曲率向量來取代參數導函數，提高控制曲線形狀的彈性自由度。因此，以其能產生連續平滑的曲度和能局部性調整曲線段的特性來描繪修改陶器的外形輪廓以及其能調整參數Bias和 Tension使器體線條富有更多的變化，是應用系統採用的理由。

4.2 掃掠表示法(Sweep Representation)

幾何模型 (Geometric Modeling) 是電腦繪圖塑造立體物件的方法，掃掠表示法為其中一支，其精神是把一2D範圍的曲線或平面沿著一條路徑或軌道做掃掠，掃掠軌跡即為3D物體形狀[3]，表示法為：

Object = Sweep Representation(Generator, Director)

在此，Generator為一2D平面或曲線

Director 為一路徑或軌道

掃掠表示法依掃掠方式不同，分為三種：

1. 平移掃掠法(Translational Sweeping)

將一2D範圍G，沿著一向量方向V平移d距離，如圖4-1所示。

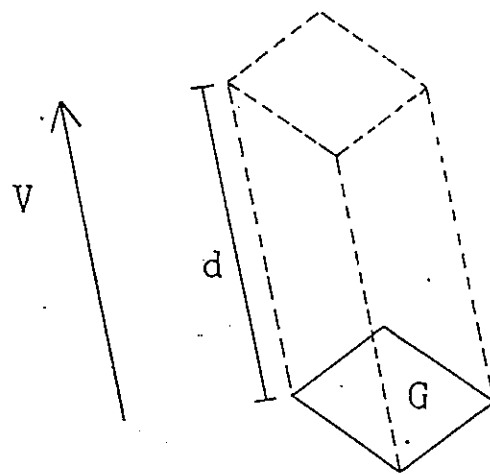


圖 4-1：平移掃掠法

2. 旋轉掃掠法 (Rotational Sweeping)：

將一2D範圍 G，沿著旋轉軸 R 做三百六十度旋轉掃掠，如圖4-2 所示。

3. 一般掃掠法 (General Sweeping)：

綜合前二種掃掠法，將2D範圍 G 沿著路徑 R 掃掠，掃掠方式可為平移、旋轉或者是二者之混合式，而掃掠路徑可定為不規則狀之曲線，同時，範圍輪廓和路徑在掃掠動作中可任意變形，如此產生了不規律形狀的特殊物體。

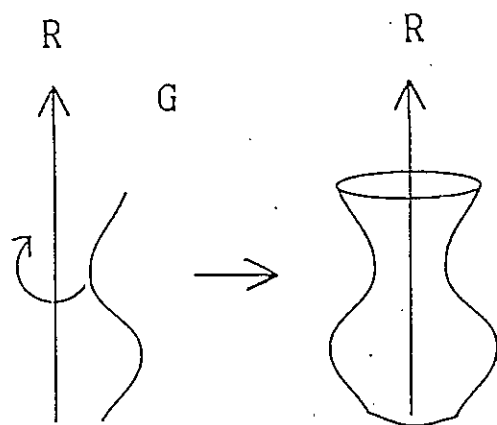


圖 4-1：旋轉掃掠法

基於旋轉掃掠法是形成圓形旋轉(Revolution)物體造型的最佳表示法，正適合用來處理陶器的立體塑形，所以，以Beta-Spline 曲線段描繪陶器輪廓做為範圍，沿著中心直線軸轉動掃掠，陶器的立體樣式即可呈現。

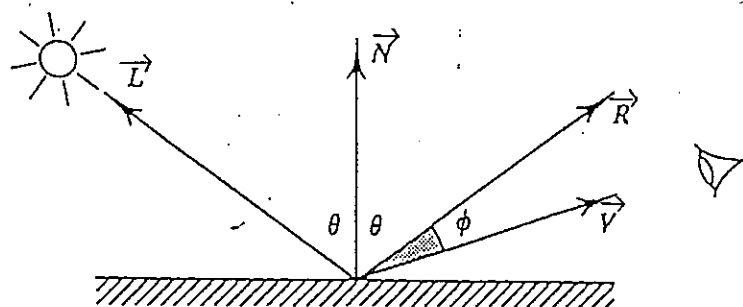
4.3 繪影打光(Shading)

繪影打光(Shading) 是立體電腦繪圖中展現影像真實感的重要步驟，處理物體表面受光源照射後產生的光學現象(Optical Process)。一般而言，由電腦繪圖造出來的

物體，其表面是由一些點集合所定義的多邊形網(Polygon Mesh)形式表示。shading 的處理就是引用亮度模組(Reflection Model)的公式來計算多邊形網上每一點及位於多邊形內部各點的亮度。以下茲先說明亮度模組的基本原理，做為計算物體表面上點亮度的依據，再就如何抓取物體表面點以求亮度之不同技術進行說明。

1. 亮度模組 (Reflection Model):

物體表面上一點受光源照射產生反射光和觀看者眼睛位置的關係如圖4-3：



- 圖中 $\vec{N}$: 物體表面一點的法向量
 $\vec{L}$: 光源方向量
 $\vec{R}$: 反射向量
 $\vec{V}$: 觀看位置向量

圖 4-3 : 物體表面、光源、反射光與觀看者之關係

取亮度模組 Phong Illumination Model 之公式來計算物體表面上一點的亮度：

$$I = I_a + I_d + I_s$$

公式中各變數的意義為：

I : 亮度值(Intensity)

I_a : 周光亮度值(Ambient Light Reflection)

$$I_a = K_a C_s$$

I_d : 散射光亮度值(Diffuse Reflection)

根據 Lambert's Law 得

$$\begin{aligned} I_d &= K_d C_s I_p \cos \theta & 0 \leq \theta \leq \pi / 2 \\ &= K_d C_s I_p (\vec{N} \cdot \vec{L}) \end{aligned}$$

I_s : 反射光亮度值(Specular Reflection)

$$I_s = K_s C_s I_p (\vec{V} \cdot \vec{R})^n$$

其中

K_a : 周光係數

K_d : 散光係數

K_s : 反射光係數

C_s : 物體表面之顏色

I_p : 光源亮度

n : 明暗程度值, $n = 200$ 表示非常亮

$n = 1$ 表示非常暗

2. Shading 的技術

由亮度模組公式中可以看出，在一個既定的環境中，光源和觀看者的位置固定，物體顏色、周光、散光、反射光和光源亮度等係數值已給的情況下，則物體表面的亮度決定於法向量。因為物體結構為多邊形網狀，依據取多邊形面的法向量或者是取平面上各點的法向量來計算亮度而有不同的 Shading 方法：

(1) Constant Shading :

直接以每一個多邊形面的法向量，就是垂直於該平面的向量，代入亮度模組公式求得該平面的亮度；此法的結果使物體看起來具有粗糙的格狀線條，通常採用於物體位置離光源和觀看者距離很遠時，較適合不具平滑曲面之物體表現。

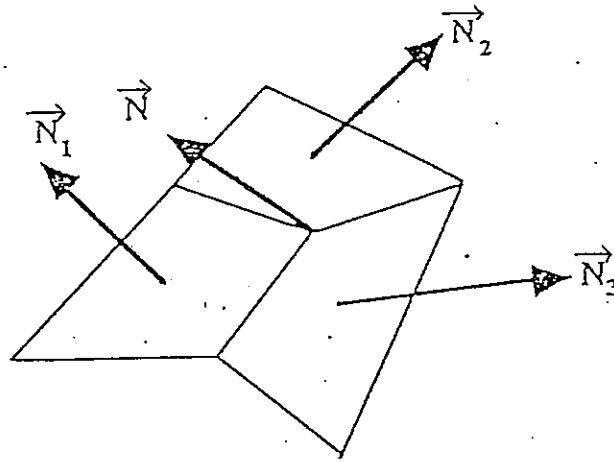
(2) Gouraud Shading :

改進 Constant Shading 的缺點，計算物體表面上所有點的亮度，包括多邊形網線上的點和多邊形格內各點，能取得較均勻柔和的亮度差異，步驟為：

(a) 先計算每一個多邊形面的法向量。

(b) 求多邊形各頂點的法向量，為共點多邊形

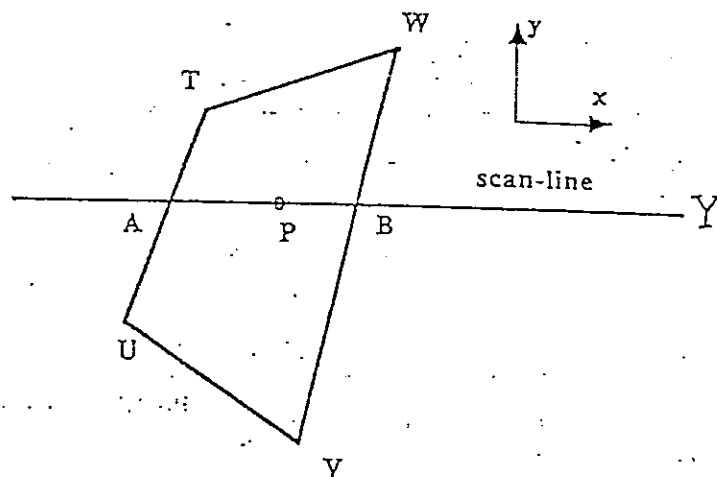
面法向量之平均值，請參考圖4-4。



$$\vec{N} = \frac{\vec{N}_1 + \vec{N}_2 + \vec{N}_3}{|\vec{N}_1 + \vec{N}_2 + \vec{N}_3|}$$

圖 4-4：多邊形交點法向量之求法

- (c) 頂點法向量代入亮度模組取得該點的亮度。
- (d) 以 Scan-line方式和點亮度線性內插法 (Linear Interpolation of Vertex Intensities)求得物體面所有點的亮度。請參考圖4-5。



先求邊線與 Scan-line Y 之交點 A、B 的亮度，以線性內插法得

$$I_A = \frac{I_T(I_A - I_U) + I_U(I_T - I_A)}{I_T - I_U}$$

$$I_B = \frac{I_V(I_B - I_V) + I_V(I_W - I_B)}{I_V - I_V}$$

再以線性內插法求 Scan-line 上位於 A、B 二點之間點 P 的亮度得

$$I_P = \frac{I_A(I_P - I_B) + I_B(I_A - I_P)}{I_A - I_B}$$

圖 4-5：點亮度線性內插法

(3) Phong Shading :

取代 Gouraud Shading 的點亮度線性內插法改以點法向量線性內插法 (Linear Interpolation of Normal-Vector) 來計算物體面上所有點之法向量，再分別代入亮度模組求得各點的亮度，請參考圖 4-6。此法很費計算工夫，但是，能得到近似表面的曲率 (Curvature) 和更好極亮度點 (Highlights) 效果。

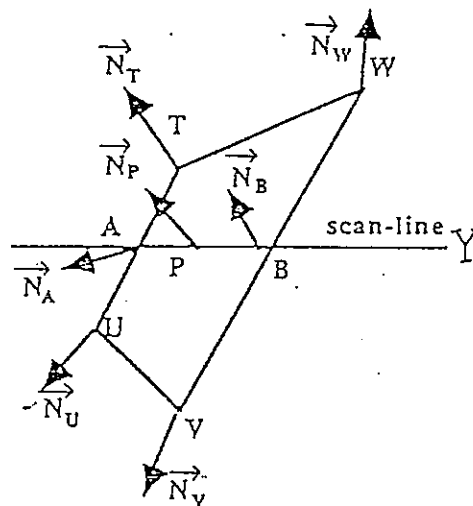


圖 4-6 : 點法向量線性內插法

在本系統中採用 Animator 軟體工具來處理 Shading 的工作，其運用 Gouraud Shading 技術，已能夠產生不錯

的陶器影像，但是，改用 Phong Shading技術，更能表現陶器表面釉彩亮麗的效果。

4.4 紋理產生方法 (Texturing)

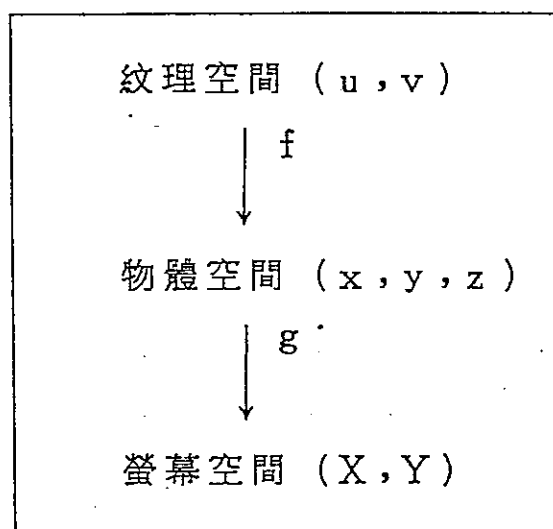
一幅影像要達到真正逼真的情境，物體表面紋路的處理是不可省略的步驟，紋理產生方法 (Texturing)之研究以製作自然的紋理來解決這一方面的問題。

紋理圖樣(Texture Pattern) 可由照片或圖畫經過數位掃描器轉換製作或者是由紋理函數(Texture Function)定義產生；而紋理與物體形狀之間的對應方法分紋理對應(Texture Mapping)、擾亂對應(Perturbation Mapping)和立體對應(Solid Mapping)三大類[14][15]：

1. 紋理對應法(Texture Mapping)：

又稱為影像對應(Image Mapping)；做法是把2D的紋理圖樣貼到3D的物體表面，有如在物體表面上畫上紋彩一般；此法適用於平滑表面的紋理處理，對應方式為將2D的紋理圖樣分割成網格狀空間 (μ, ν) 對應到3D的物體多邊形結構立體空間 (x, y, z) ，再轉換到2D的螢幕空間 (X, Y) 顯示，請參考圖4-7。此法的

缺點是紋理圖案與物體的形狀有關，會隨物體結構而扭曲、放大或縮小。



$$(x, y, z) = f(u, v)$$

$$(X, Y) = g(x, y, z)$$

其中

f 為一轉換紋理空間到物體空間的函數

g 為一轉換物體影像投射到螢幕空間的函數

圖 4-7：紋理對應關係

2. 擾亂對應法 (Pertrubation Mapping):

物體表面受光源照射時會有色彩明暗層次的變化，利用紋理函數為擾亂函數(Perturbation Function)來干擾物體表面原有的顏色而產生特殊效果，是擾亂對應法的概念，有二種方式：

(1) 顏色擾亂對應法 (Color Perturbation Mapping):

取物體表面上每一點的顏色與擾亂函數值做處理而改變各點的顏色，產生不規則的色彩變化；這個方法常用於製造雲和焰火等有濃密程度之紋理。

(2) 法向量擾亂對應法 (Normal Perturbation Mapping):

又稱為Bump mapping；物體表面的顏色明暗深淺和質感直接受該點的法向量和光線角度關係的影響，利用擾亂函數改變點的法向量，使 Shading 時，會產生粗糙或凹凸等感覺，適用橘子皮或布料縐褶等紋理之模擬。

3. 立體對應法 (Solid Mapping):

鑑於紋理對應法會因3D物體的形狀而使紋理失真，立體對應法乃定義紋理函數為3D的空間範圍，直接產生與物體空間相符合的三維紋理，如木質紋、大理石紋之表現。

在本應用系統中表現陶器上的平面圖案，採用紋理對應法和顏色擾亂對應法來處理，配合 Animator 軟體提供的紋理產生方法工具，製造陶器平滑圖紋的彩衣效果。

4.5 變形處理 (Deformation)

變形處理(Deformation)使同一物體有了變化的樣式，在電腦塑形或動畫製作上創造了不少的特殊畫面，其考慮原始物體的變形範圍(Deformation Domain)或體積改變等條件，透過變形公式(Deformation Formula)的運算而產生整體性或區域性變形的效果[3]。變形處理為

$$P_d = f(P, D)$$

其中

P_d 表變形後之物體

P 表變形前之原始物體

f 表變形公式函數

D 表變形範圍或體積限制

應用系統中，坯體加工的步驟就是變形處理之應用；

除了體積的考量條件外，多邊形體改變圓形的掃掠路徑以多邊形之旋轉軌道取代而使坯體產生整體性之變形；坯口造型則局限在坯口部份的範圍，透過公式計算而達成。至於非對稱性變形，因為陶器體是由曲線塑造的不規則狀 (free-form) 物體，其形狀決定於控制點，依據 Sederberg 提出的不規則狀物體變形 (Free-Form Deformation; FFD) 理論 [16]，可藉著控制點的調整來處理變形，因此，修改輪廓曲線的控制點以取得變形範圍再與陶器原型進行轉換即可以達到變形的效果。

第五章 實例與結果

系統運作以步驟指引的方式來引導使用者輸入陶器描述參數，並於每一步驟指令下達之後，可以得到該階段的執行結果，以向量顯示和掃描顯示陶器立體圖。現在以實例示範各項動作及結果，分段列舉說明之。

1. 產生陶土

輸入：陶土的寬度和高度，例如：

Input the width of pot earth: 2

Input the height of pot earth: 1

輸出：陶土形狀的向量顯示和掃描顯示，如圖5-1。

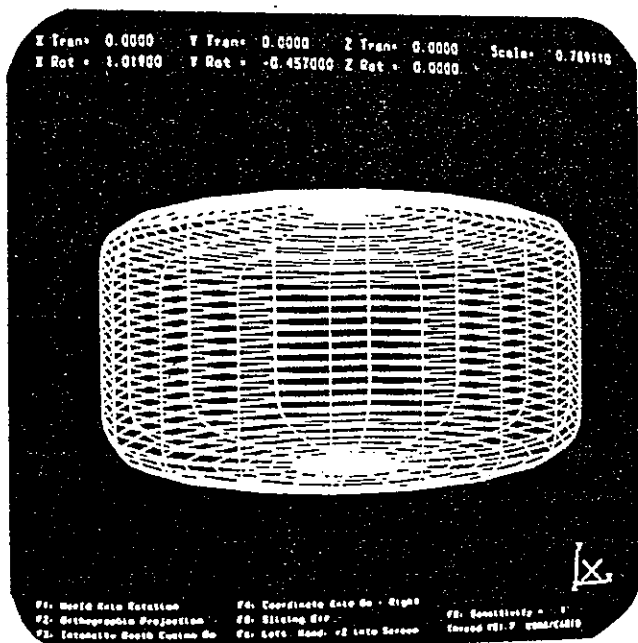
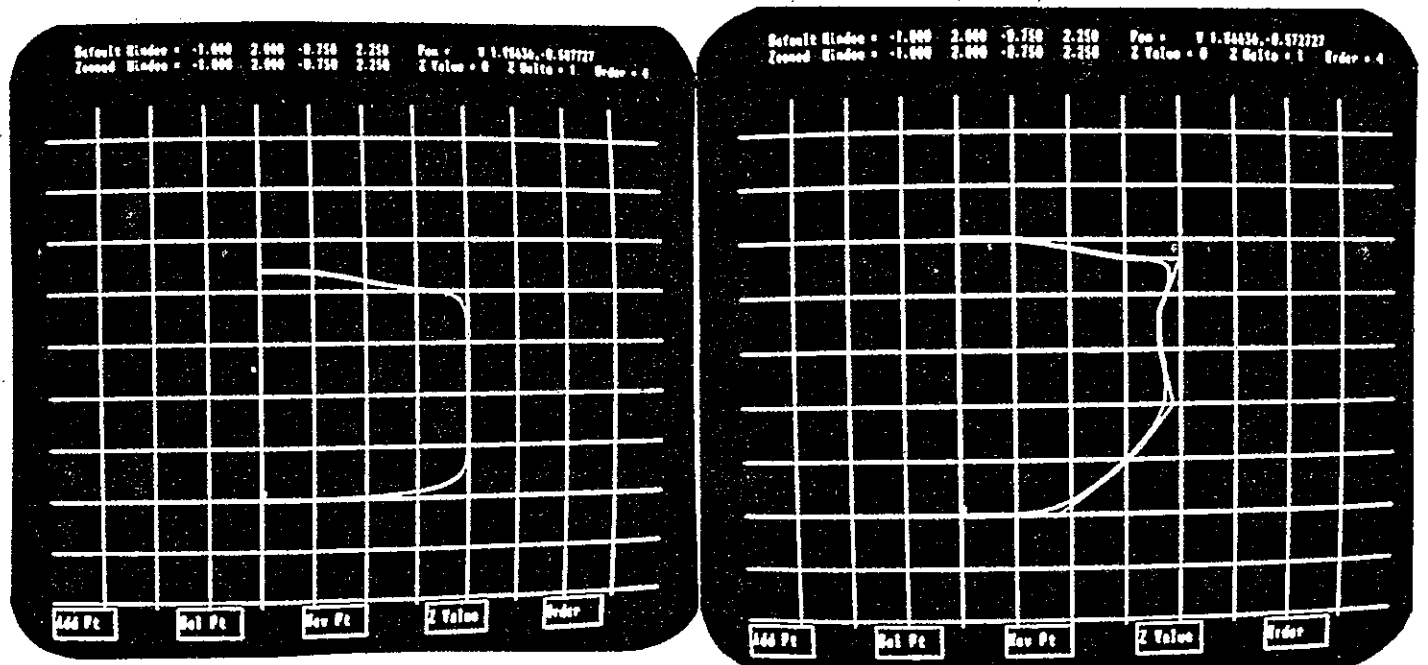


圖 5-1：陶土的向量顯示和掃描顯示

2. 實心拉坯

輸入：實心陶坯半面輪廓修改圖，如圖5-2。輪廓曲線乃透過 USNA CADIG 軟體的交談式輔助工具 Camill來定義，在描繪板 (Tablet) 上用指標 (Cursor)選擇畫面功能目錄的項目，移動曲線控制點來調整形狀直到滿意為止。

輸出：實心拉坯中的陶坯向量顯示和掃描顯示，如圖5-3。



(a) 修改前

(b) 修改後

圖 5-2：實心陶坯半面輪廓修改圖

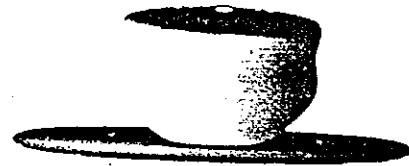
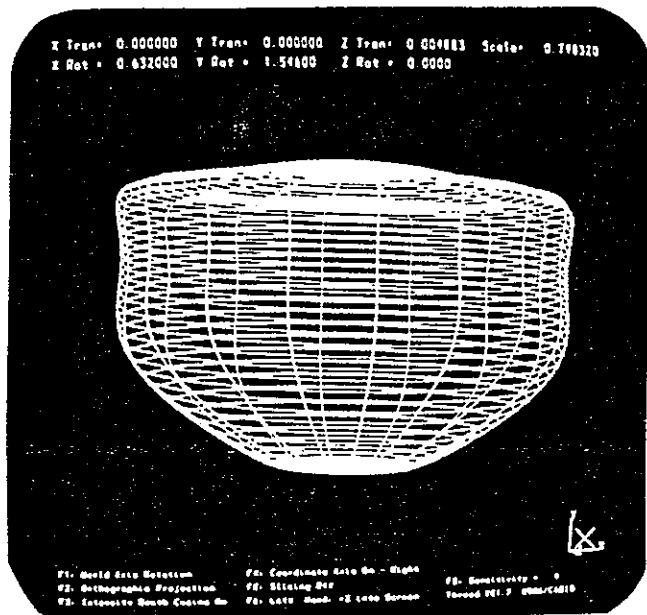


圖 5-3：拉环中實心陶环向量顯示和掃描顯示

3. 空心拉环

(1) 挖空环心：

輸入：陶环的厚度，例如

Input the thickness of pottery: 0.15

輸出：挖空环心後的陶环向量顯示和掃描顯示，
如圖5-4。

(2) 修飾陶环：

輸入：空心陶环半面輪廓修改圖，如圖5-5。

輸出：空心拉环中的陶环向量顯示和掃描顯示，
如圖5-6。

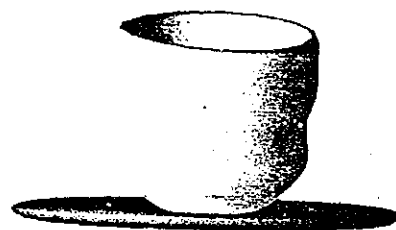
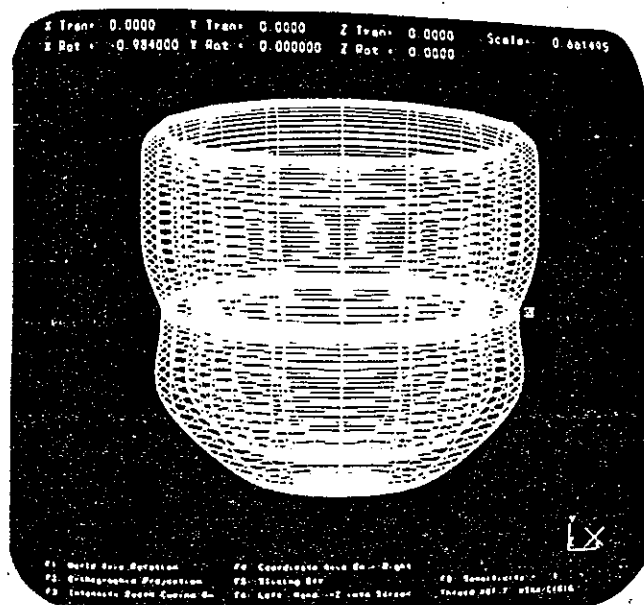
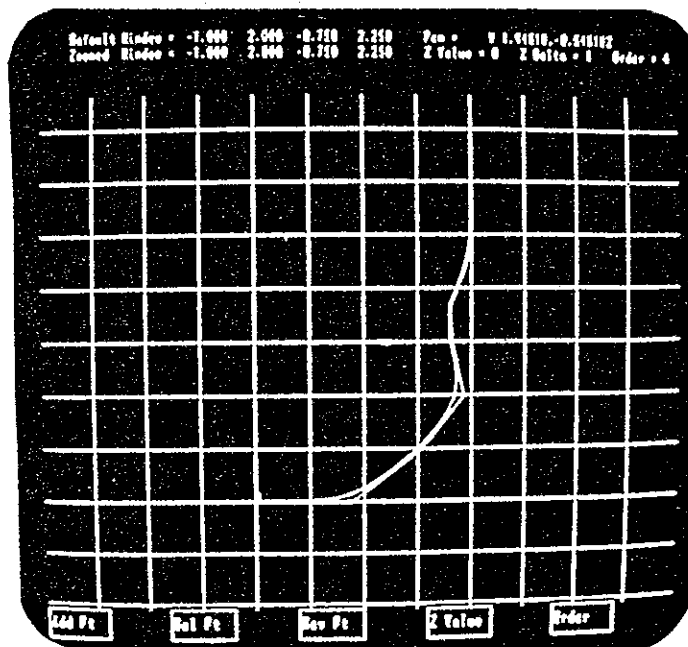
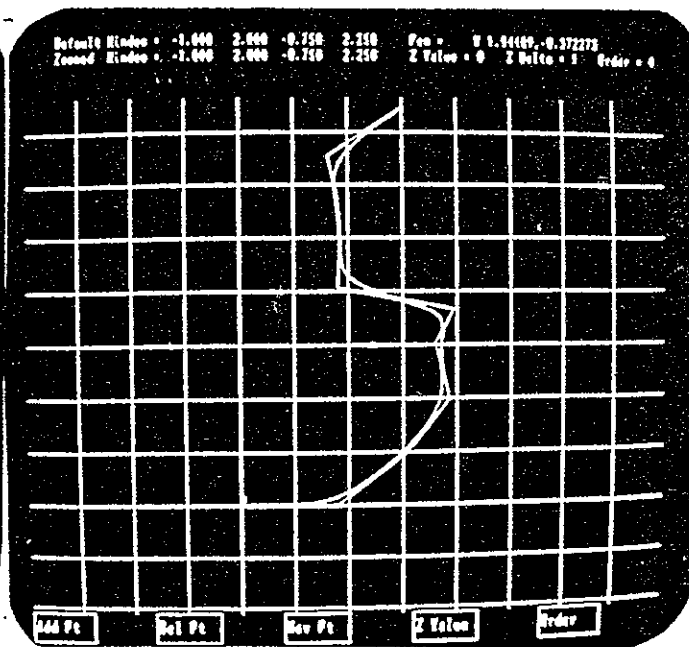


圖 5-4：空心陶坯向量顯示和掃描顯示



(a) 修改前



(b) 修改後

圖 5-5：空心陶坯半面輪廓修改圖

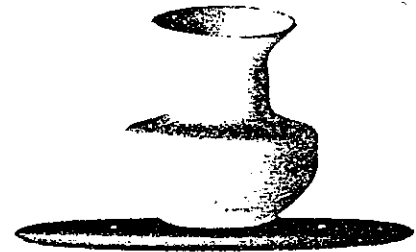
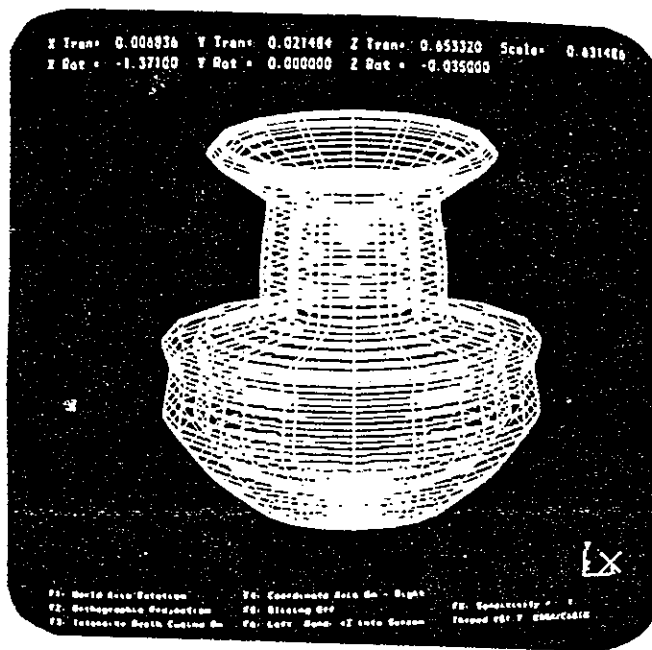


圖 5-6：拉坯中空心陶坯向量顯示和掃描顯示

4. 坯體加工：

(1) 多邊形體變形

輸入：多邊形體的邊數，例如：

Input the polygonal region: 6

輸出：多邊形體變形後的陶坯向量顯示和掃描顯示，如圖5-7。

(2) 坯口造型

輸入：坯口的壺嘴數或花瓣數目，例如：

Input the mouth form: 8

輸出：坯口造型後的陶坯向量顯示和掃描顯示，如圖5-8。

(3) 非對稱性變形

輸入：變形陶坯半面輪廓修改圖，如圖5-9。

輸出：非對稱性變形後的陶坯向量顯示和掃描顯示，如圖5-10。

5. 上釉

輸入：圖案及顏色。

輸出：施釉後的陶器掃描顯示，如圖5-11。

6. 綜合應用

各種不同造型和不同紋理的陶器影像，如圖5-12和圖5-13。

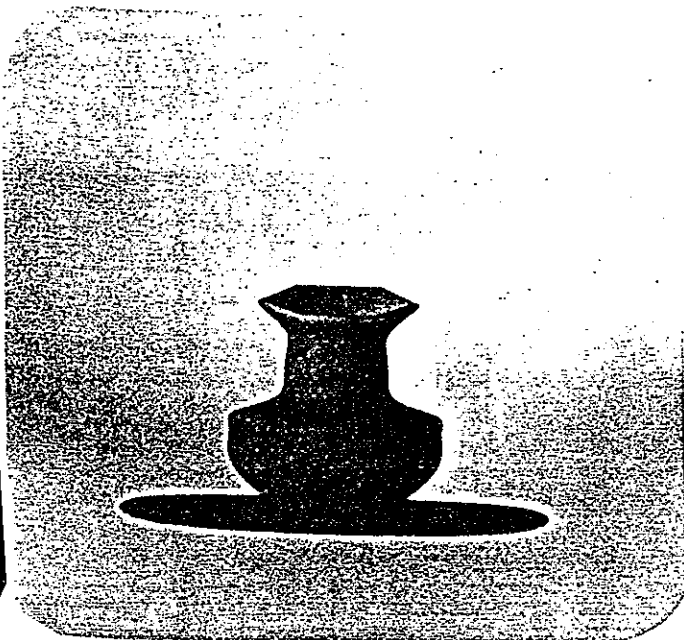
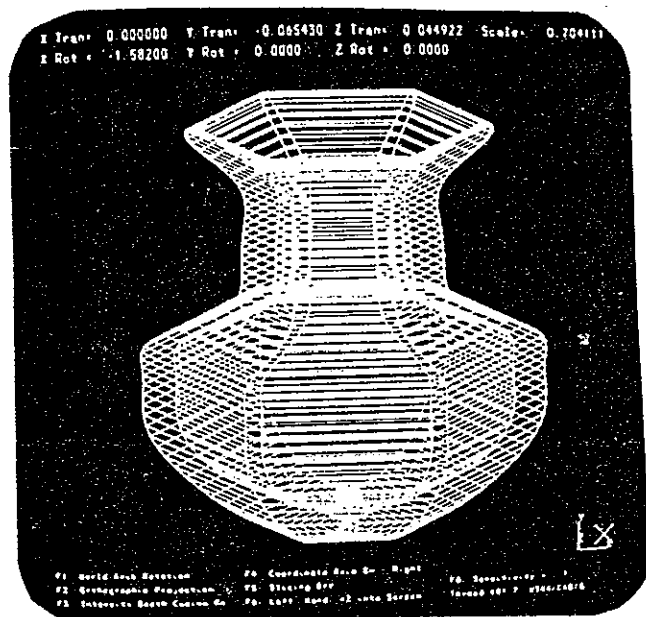


圖 5-7：六邊形體陶坯向量顯示和掃描顯示

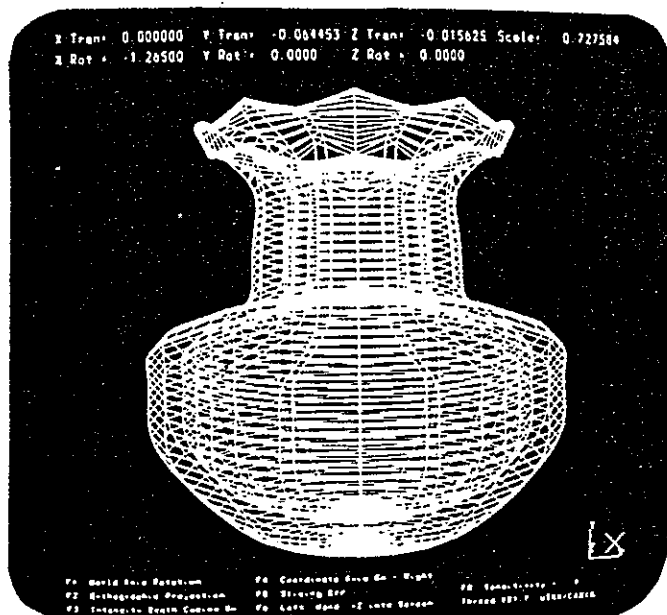


圖 5-8：陶坯口八片花瓣的向量顯示和掃描顯示

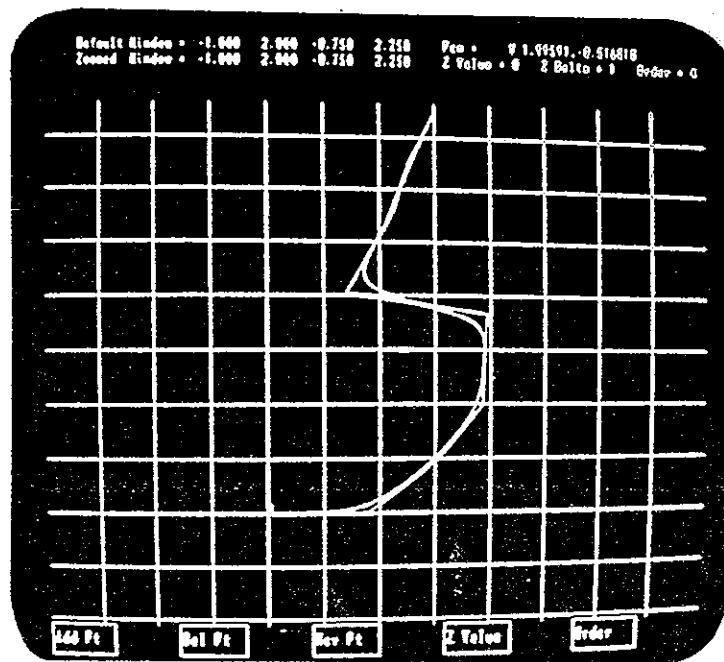


圖 5-9：變形陶坯半面輪廓修改圖

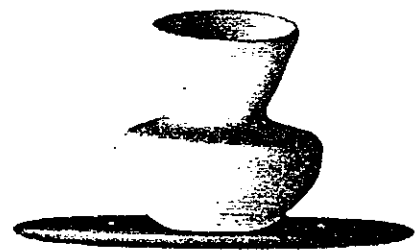
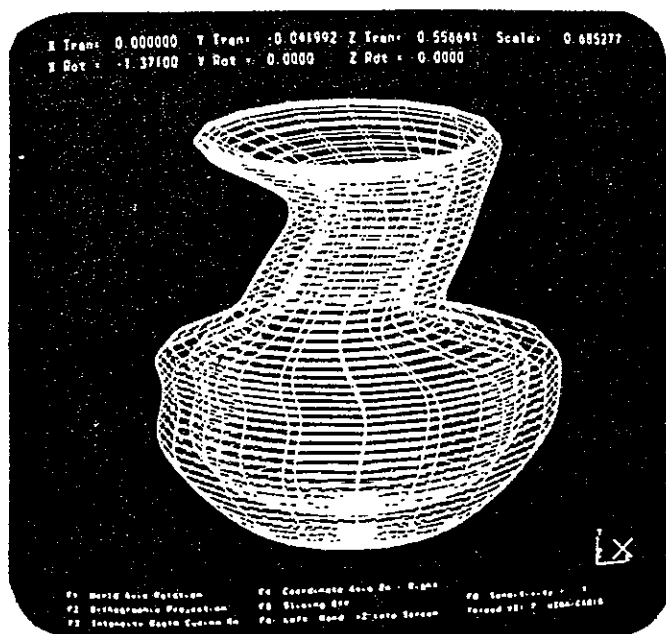


圖 5-10：非對稱性變形陶坯向量顯示和掃描顯示



圖 5-11：施釉後的陶器



(a) 變形前成品



(b) 變形後成品

圖 5-12：各種陶器成品一

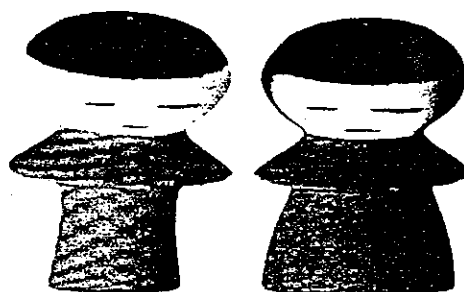
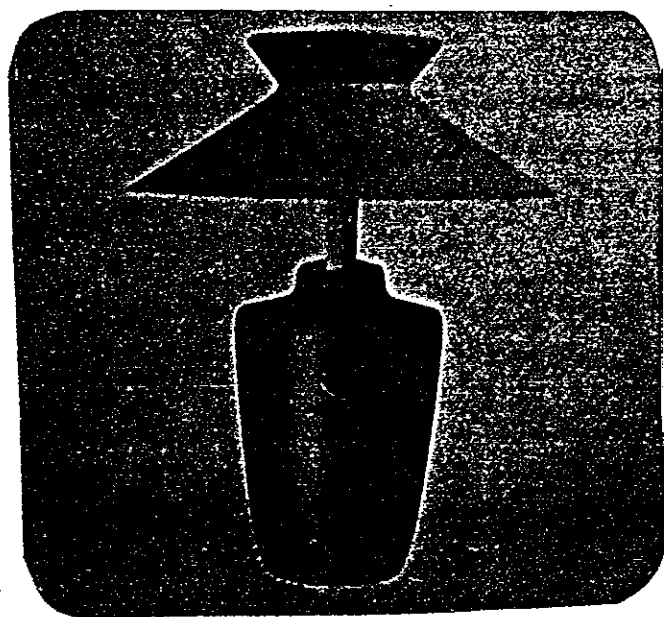


圖 5-13：各種陶器成品二

第六章 結論

架構一個使用者操作親切便利的電腦繪圖應用系統環境，專門塑造輪廓不規則形狀的圓形對稱物體，是本論文的研究重點；使用者只要點出一組物體半邊輪廓的概略形狀控制點，就可以產生立體造型影像，再加上變形處理，得到多邊形體和非對稱性彎曲體之變化；由於 Animator 處理影像的時間長以及 PS300繪圖工作站顯示影像的掃描速度慢，無法達到立即回應的效果，因此，使用者介面的設計並不是很完善，但是，掌握了下列二點基本精神原則不變，則介面問題將會隨系統設備的加強和改進而獲得解決：

- 1.使用者視覺導向(Visual-Oriented) 的系統；以使用者對構想圖形模型的認知與感覺為出發點來設想。
- 2.電腦繪圖理論與使用者的關係是獨立的；藉著實體圖形模型的引導，使用者不用理會採用於系統中的數學模型及其特性就可操縱系統運轉。

藝術創作本身是無公式可言，要以電腦繪圖來表現實非容易；由第五章實例與結果中知道，本系統以陶器製作為應用對象，揣摩陶器藝品製造成形的過程，目前已經完

成陶器品主體部份的塑形，包括器身、器口之形狀變形，和器體平滑表面的紋理構圖，都能讓陶藝家使用者依照製陶步驟一一展現其想法。為了系統的完整性，連接二件以上的坯體組合處理，比如茶壺和把手之接合，和器體表面釉彩圖案的搭配，例如立體紋理或模擬施釉者在器體面上的局部地方一筆一筆直接刻畫，以使陶器造形更具千變萬化，是後續值得發展的方向。

参考文献

- [1] M. Berger, Computer Graphics with Pascal, The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc. 1986, pp.3-29.
- [2] A.A.G. Requick and H.B. Voelcker, "Solid Modeling : A Historical Summary and Contemporary Assessment", IEEE Computer Graphics and Image Processing, November, 1982, pp.9-24.
- [3] T. L. Kunii (Eds.), Image Synthesis Theory and Practice, Springer-Verlay Tokyo 1987.
- [4] N. M. Thalmann and D. Thalmann, (Eds.) Special issue on Computer Animation, The Visual Computer, Springer-Verlay, Vol.1, No.4, 1985, pp.43-64.
- [5] J. L. Sibert et al., "An Object-Oriented User Interface Management System", Computer Graphics, 20, 4, 1986, pp.259-267.

- [6] P. Wisskirchen, "Toward Object-Oriented Graphics Standards", Computer & Graphics , 10, 2, 1986, pp.183-187.
- [7] F. Crow, "The Origins of the Teapot", IEEE CG&A, January 1987, pp.8-19.
- [8] 貝蘇章, 繆振威, 繪影打光與紋理對應之原理及其在電腦繪圖上之應用, 中華民國 78 年電腦視覺、圖學及影像處理研討會論文集, pp.214-222.
- [9] F. Yamaguchi, Curves and Surfaces in Computer Aided Geometric Design, Springer-Verlay Berlin Heidelberg 1988, pp.233-336.
- [10] B. A. Barsky, Computer Graphics and Geometric Modeling Using Beta-splines, Springer-Verlay Berlin Heidelberg 1988.
- [11] R. N. Goldman, "Urn Models and Beta-splines" IEEE CG&A February 1986, pp.57-64.

- [12] B. A. Barsky and J. C. Beatty, "Local Control of Bias and Tension in Beta-Splines", Computer Graphics, Vol.17, No.3, July 1983 pp.193-218.
- [13] A. Watt, Fundamentals of Three-Dimensional Computer Graphics, Addison-Wesley Publishing Company 1989, pp.45-96.
- [14] P. S. Heckbert, "Survey of Texture Mapping" IEEE CG&A, November, 1986, pp.56-67.
- [15] 王興華, 產生動態紋理方法之研究, 中央研究院資訊科學研究所, 1989.
- [16] T. W. Sederberg, "Free-Form Deformation of Solid Geometric Models", SIGGRAPH, Vol.20, No.4, 1986, pp.151-160.
- [17] 陶青山, 陶器的製作, 武陵出版社, 1987.
- [18] 何啟民, 陶瓷成坯作業, 台灣商務印書館, 1977.