

國立交通大學建築研究所

碩 士 論 文

3D 反光球在 VR CAVE 中的互動

The Interaction of 3D Mark in the VR CAVE



研 究 生 吳彥良

指 導 教 授 劉育東

中華民國九十三年七月

3D 反光球在 VR CAVE 中的互動

The Interaction of 3D Mark in the VR CAVE

研究生	吳 彥 良	Student	Yen-Liang Wu
指導教授	劉 育 東	Advisor	Yu-Tung Liu

國 立 交 通 大 學
建 築 研 究 所
碩 士 論 文



Submitted to Graduate Institute of Architecture
College of Humanities and Social Sciences
National Chiao Tung University
in partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master
In
Architecture

July 2004

Hsinchu, Taiwan, Republic of China
中華民國九十三年七月

目錄

第一章 概論	01
Introduction	
第二章 媒材回顧	02
Media Review	
2.1 傳統媒材	02
2.2 輸出科技	03
2.3 輸入科技	07
2.4 3DVR 軟體	08
2.5 相關研究	09
第三章 研究重點	10
Exploration	
第四章 研究過程	11
Research Processes	
4.1 案例研究	11
4.2 數位模型環境	12
4.3 成果展示	19
第五章 對設計的可能應用與影響	21
Possible Application and Impacts to Design	
第六章 結論與後續建議	22
Conclusion and Suggestion	
參考資料	24
References	
附錄	26
Appendix	



中文摘要

設計媒材從古埃時代的平面圖，到文藝復興時期，開始使用實體模型來解決較複雜的建築設計問題，再到近十幾年來的數位媒材，幫助建築設計師解決了一些傳統媒材所無法解決的問題，如數位媒材中的數位模型被用來大量輔助建築之尺寸、形式、顏色、材質、光影等問題。然而，在現今大多的專業建築設計者還是認為數位模型的模擬的確很逼真，但他們仍然無法在設計的過程中，放棄使用實體模型。所以傳統的實體模型是否有一些必需且根本的特質尚未被賦予在數位模型中？而本研究的主要目的除了希望能夠找出實體模型的基本特質外，更進一步的將這些特質結合在數位模型中，藉此在 VR CAVE 中，以 Director 做為開發工具，解決及時 3D 立體視覺顯示與畫面同步，並利用空間定位器做為主要的互動裝置，突破以往使用鍵盤與滑鼠的互動方式，依人的認知模型以較自然的方式與數位模型互動，最後開發出一個如實體模型有視覺特質的數位模型環境。

關鍵字：數位媒材、實體模型、數位模型、互動、VR CAVE



Abstract

Design media from the plan in ancient Egypt, to the physical models in Renaissance, which is used to solve complex problems of architectural design, then to digital media in recent decade, helps architect solve some problems which cannot be solved with traditional media. For example, in digital media, digital models are used to help design the size, form, color, material and shadow of the architecture. Although most professional architectural designers think that the simulation of digital models is very close to the real, they still don't give up using physical models in designing. Therefore, this research is to find out whether there are still some essential and basic characteristics of traditional physical models which are not yet given to digital models. The purpose of this research is to find out the basic characteristics of physical models, and furthermore, to combine these characteristics with those of digital models in order to develop a digital modeling environment which has characteristics of a physical modeling environment. We used Director as a tool for developing in VR CAVE to solve the problem of 3D stereographic and synchronization in real-time. And we utilize a space-positioning device as an interactive device, which is a breakthrough in the traditional interaction of people with keyboards and mouse. The interaction between digital models and designers is based on the cognitive model of human in a more natural way. Finally, we developed a digital modeling environment which has characteristics of a visual model.

Keywords: digital media, physical model, digital model, interaction, VR CAVE.

謝誌

感謝 Aleppo 老師在論文寫作過程中的指導與教誨，
以及登文、家和、君昊老師口試時的不吝指教；
另外也感謝建築所的同学與所胞們，
謝謝你們這過程中的指教與協助。



第一章概論

Introduction

媒材(Media)的使用一直是設計過程中不可或缺的一環，藉由適當的媒材呈現，設計者不僅可以將自己模糊的構想明確化，更可進一步的與他人進行溝通(Liu, 1996; Porter and Neale, 2000)。綜觀設計媒材的發展過程，從古埃及時期的 2D 圖面，一直到文藝復興時期的 3D 實體模型的使用，我們可以發現建築媒材從原本只是紀錄與祭祀的功用，逐漸轉變成為設計思考呈現與溝通不可或缺的工具(Millon 1994; Liu, 1996; Porter and Neale, 2000)。藉由 2D 精準尺寸的圖面繪製，以及 3D 等比例縮小模型的製作，使得設計者想像中的建築物，在尚未被實際建造前，能夠有機會被呈現(Liu, 1996)。然而，從文藝復興時期後一直到近代的建築設計，傳統媒材持續的進行嚐試，希望能夠比以往更真實的呈現設計的結果(Liu, 1996)，也就是以更逼真的表現法來繪製透視圖以及製作更大尺度的模型，除了表達正確的尺寸與形式外，也希望呈現顏色、材料、質感甚至是光影，因而藉此能夠拉近設計想像與實體建築之間的距離(Liu, 1996; Bai and Liu, 1998)。

然而對於傳統媒材的這種期望，一直到了數位媒材的出現才開始有機會被實現。因為藉由電腦運算的能力，研究者開發出許多數位模型的建構軟體，我們可以在電腦虛擬的環境中自由的建構三度空間的數位模型(Mitchell and McCullough, 1997)。數位模型的精密程度，在尺寸與形式上，可以如同真實的建築物一般；而數位模型在顏色、材質與光影上，從 Sasada (2000), Liu (2001)以等大量的研究中，我們更是可以發現模擬的幾可亂真。這樣不僅可以使設計者在設計過程中得到更多的回饋，也使得非專業者可以完全的了解設計內容。

另外，除了利用電腦運算出如真實般的數位影像的同時，透過新的數位媒材嘗試新的設計方法，也一直是研究者們所努力的一個方向，如在設計早期階段，設計者利用黏土做概念發展，並將在桌面上的黏土草模透過即時的 3D 掃瞄器轉換成數位模型，設計者可經由黏土的操作，即時的感受到數位模型的變化性 (Piper et al, 2002)。或者透過傳統的 2D 繪圖、3D 實體模型同時的存在一個可以顯示數位模型的大型顯示桌面，經由數位模擬的輔助，擴增了傳統媒材的思考局限性，提供建築都市的新設計方法 (Ishii et al, 2002)。另外，更有設計者直接捨棄筆紙的繪畫，以全新的方式直接在空間中從事 3D 空間的概念創作 (Schkolne, 2002)。

第二章 媒材回顧

Media Review

在這章裡，我們主要回顧了過去在設計過程中，設計媒材的應用與發展，從最早古埃時用的平面圖，到文藝復興的實體模型，再到現今數位科技時代，電腦等相關的數位科技大量的被應用在設計的過程中，而底下的小節裡，我們將針對設計的“傳統媒材”，數位媒材的“輸出科技”、“輸入科技”及 3D 顯示科技的“相關研究”做更詳盡的回顧與探討。

2.1 傳統媒材

古埃時代發現最早的陵廟設計平面圖，知道建築師透過平面圖表示建築物本身及其地形間的關係，其當時的平面立面表示方式和現今的表示方式已十分相近了(Millon 1994; Liu, 1996)。另外在古希臘時代也已出現了縮小比例的陶土模型，但這些模型都非常的抽象，不是用來做建築設計表現的，而僅是用來做祭祀用。直到文藝復興，模型才真正的大量使用在建築設計上，如 Filippo Brunelleschi 爲了要解決各類圖集無法描述清楚的型式及無法明確計算的構造問題，利用立體模型做更精確的說明和驗證(Liu, 1996)。到米開朗基羅時，實體模型的使用更爲大量，在每個設計過程中使用不同的模型來解決不同的設計問題，如光影的考慮、比例關係、材料的使用及裝飾等，因而業主與建築工匠有機會更精確的了解到建築師內心的建築意念(圖 2.1)。模型在文藝復興時期被大量的應用在建築設計上，也使得文藝復興時期的建築形式與過去的建築形式更爲豐富且具變化。



圖 2.1、米開朗基羅以實體模型向教宗說明他的設計

然而到二十世紀初，有幾位建築師開使打破傳統的幾何造形，開始朝向較爲自由的量體

空間發展，如西班牙的 Antoni Gaudi, 法國的 Le Corbusier 等，但他們所使用的設計媒材仍是傳統的實體模型及平面圖，在建造這些自由量體的建築空間時，產生更多的設計問題同時也增加了施工的困難度。然而到了 90 年代，電腦已擺脫 2D 平面的繪圖功能，能有較為成熟的空間模擬能力，利用電腦模型製作成動畫及虛擬實境，更精確的模擬出空間形式與光線的變化，以及材質上的使用，同時也拉近了實體建築與建築師腦中意內的距離 (Liu, 1996) (圖 2.2)。電腦媒材的使用，彌補了實體模型及平面圖集對於設計自由量體空間的不足，如 Frank Gehry 可以將天馬行空的實體模型利用數位化工具，轉成數位模型，並進行電腦的空間分析、結構分析、光線與細部的模擬等，最後再將數位模型轉成各類以利工人施工的圖集。

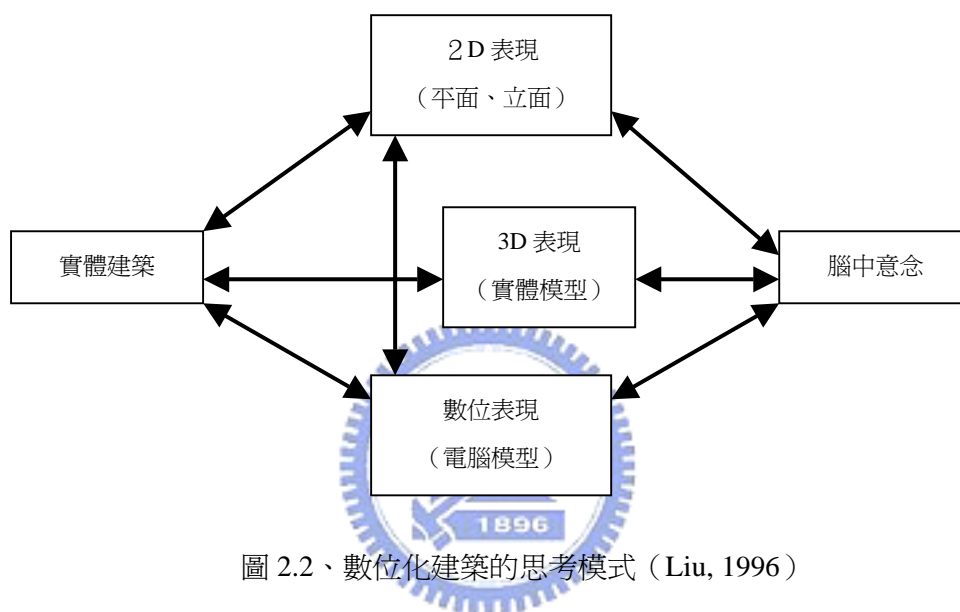


圖 2.2、數位化建築的思考模式 (Liu, 1996)

2.2 輸出科技

2.2.1 顯示科技

陰極射線管顯示器(Cathode Ray Tube, CRT)起源於 1897 年德國科學家發明了映像管 (Aperture grille CRT)。一開始的應用大都在軍事上的雷達訊號顯示上，而真正的被開始在商業化使用是在 1951 年電晶體發明取代真空管後；CRT 顯示器的使用，改變了人類傳統只有透過實體的紙張接受訊息的方式，開啓了電子化的視覺世代。

CRT 的呈像原理係利用電子槍在真空管中打出 2 萬 5 千伏特高壓，迫使電子在真空管中產生遊離，即為電子光束，再利用陰屏遮罩 (shadow mask) 精準的導引電子光束撞擊在紅，綠，藍三色螢光點使映像管發光。同時控制電子光束的強度，即可產生不同的顏色與亮度 (Hearn and Baker, 1997)。

當顯示器接收到電腦所送出來的影像訊號時，電子槍會從螢幕的左上角開始向右

方掃瞄，然後由上至下依序掃射下來，如此反覆的掃瞄即構成我們看到的影像。而這反覆的速度就以赫茲（Hz）為單位，一般電腦螢幕要能讓人看起不會感覺到閃爍，最低的掃瞄頻率要為 60Hz 以上，而要在一般電腦螢幕中看到 3D 立體影像，即是要讓雙眼看到各自不同視差的影像，因此要讓兩眼看到非閃爍的影像，其畫面顯示更新率要超過 120Hz，另外再搭配一副 LCD(Liquid Crystal Display) 交錯式立體眼鏡，其利用螢幕快速的更新率，以一秒鐘超過 60 張的影格數，以一左一右的序列方式，配合 LCD 交錯式眼鏡的兩面鏡片，各自的以一關一開的方式，讓眼睛看到螢幕裡一左一右的影像，因如兩眼的視差，而讓螢幕裡的物體具有 3D 的立體感（圖 2.3）(Mazuryk and Gervautz, 1996)。



圖 2.3、交錯式立體呈像(Mazuryk and Gervautz, 1996)

由於利用 CRT 的呈像方式的螢幕，發展到最大的尺寸為 40 吋，且其重量要超過 100 公斤，因此為了能突破 40 吋的畫面限制，其改善的方式之一就是改以投影方式，透過光學技術，將 CRT 影像直接打到白色的螢幕上，而這種投影設備如早期常應用在家庭影音組合裡的三槍投影機，現今的主動式的 VR CAVE 即是立用三槍投影機的 CRT 掃瞄特性所形成的交錯式立體呈像。而現今另一種形式的投影機，如 LCD，DLP，LCOS 等因投影原理不同，沒有所謂的掃瞄頻率，故只能應用在背動式的立體呈現上。

2.2.2 立體呈像技術

早在文藝復興時期，達文西在繪圖時便發現了左右眼在看一個物件時，左右的影像是不同的 (Wade, 2001)，直到 1905 年 Heine 利用了這樣的雙眼視差原理，透過身體的移動研究視覺深度問題 (Wade, 2001)，而立體影像原理是系由兩眼從不同角度觀測同一場景，即左右兩眼必須分別接受不同視點的影像 (如圖 2.4)，然後不同視點的影像在大腦中重疊後的對空間深度的一種認知能力 (Goldstein, 1999)，物體愈接近眼睛，產生的視差愈大 ($\theta_1 > \theta_2$)。

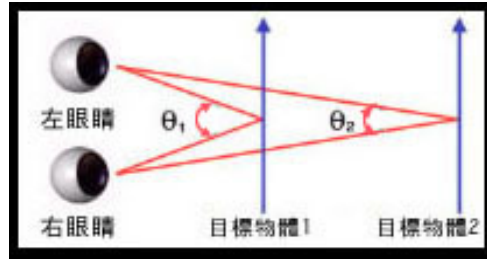


圖 2.4、雙眼對物體視差的形成(I-Art, 2003)

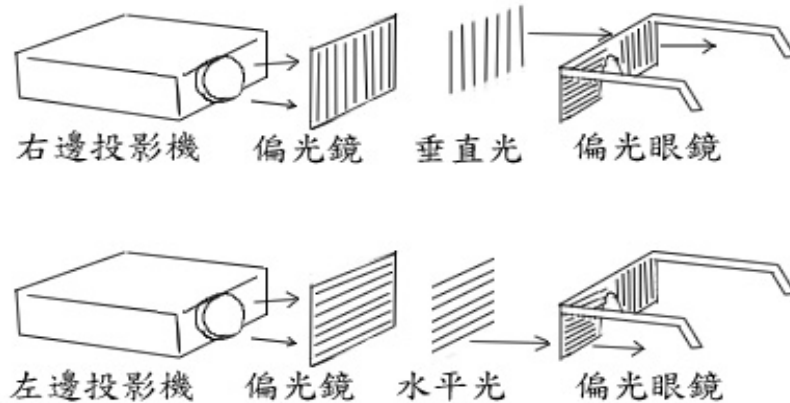


圖 2.5、偏光過濾法

在以同樣的原理開發的立體成像技術上目前有下列四種(Robinett and Holloway, 1995):

--偏光過濾法(Polarizing Filter)：(圖 2.5) 左右畫面的原始影像經由偏光處理將影像轉換為垂直光或水平光，再經由可接收水平光及垂直光的鏡片接收。

--遮蔽法(Shelter)：(圖 2.3)利用眼鏡與顯示螢幕作同步快速的左右畫面切換，達成左右眼看到不同影像投射。

--雙顯示器 (two displays)：兩眼分別經由兩個 LCD 或 CRT 的螢幕直接對左右眼睛做不同影像的投射，最常見的如頭盔顯示器(Head Mounted Display, HMD) (圖 2.6)。

--分色過濾法：(圖 2.7) 螢幕裡的同一物體以紅藍兩種顏色呈現，再經由有左右兩邊分別為紅色及藍色的鏡片將相同顏色濾掉，即兩種不同影像投射到眼睛中。



圖 2.6、頭盔顯示器(5DT, 2002)

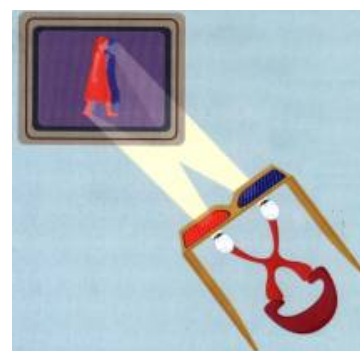


圖 2.7、分色過濾的立體眼鏡 (I-Art, 2003)

2.2.3 VR CAVE

所謂的 VR CAVE(CAVE Automatic Visual Environment)是由多個投影螢幕所構成，CAVE 最早出現於 1992 年的芝加哥伊利諾大學 (University of Illinois at Chicago) 電子視覺化實驗室(Electronic Visualization Laboratory)，主要是由前方、地下、左方、右方等四片平面投影螢幕所組成 (圖 2.8)，透過四台三槍投影機將電腦裡所運算出的畫面投攝到四片平面投影螢幕上，然而三槍投影機體於單槍投影機其積龐大且重，亮度不夠等因素，因而也有發展以單槍所組成的被動式 VR CAVE 系統 (圖 2.9, 圖 4.2)，如日本松下公司的 CyberDome 8500 (Shibano et al, 2003)，是一個以 19 台 PC 群所串成的一套系統，再由 18 台單槍投影機將畫面投攝到半球形上的螢幕，因其投攝螢幕為圓弧形，會有變形問題，畫面在投攝出去前，需要再將影像做即時形變調整。

現今 VR CAVE 被應用的主要領域有如軍事訓練的戰場模擬，醫學上的手術訓練，將大量不易被解讀的數字，透過資訊視覺化所完成的 3D 立體圖表，以及在娛樂上的 3D 遊戲，及透過一些影像治療精神疾病患者等應用(Stanney, 2003)。

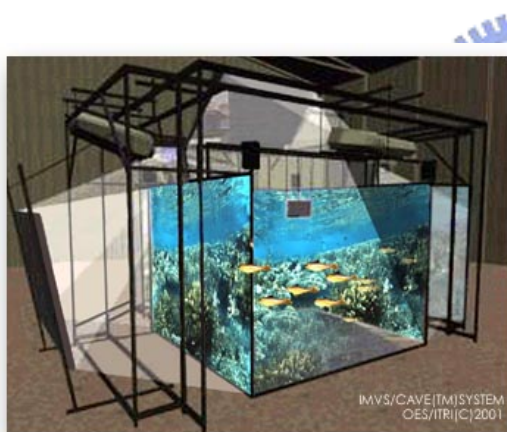


圖 2.8、主動式多人沉浸式虛擬空間(工研院, 2002)

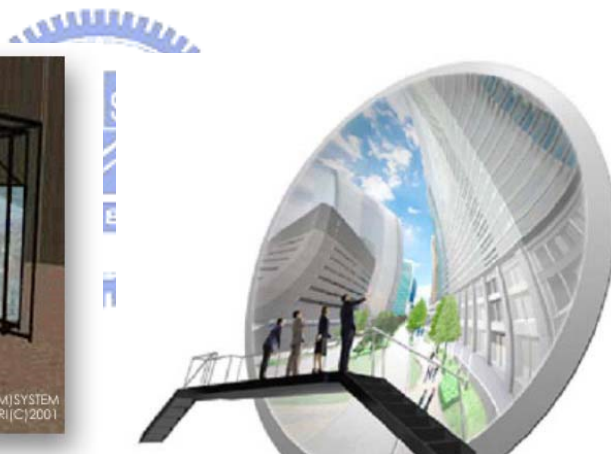


圖 2.9、CyberDome 8500(Shibano et al, 2003)

2.3 輸入科技

電腦從最早的真空管時代，到現今的晶片組(chip sets)時代，電腦的體積也從如車庫般的縮小到一本書的大小，執行速度則也不斷的創新高，電腦與人的互動關係，也從最早的卡片，到有螢幕的出現，圖形化介面、由手透過鍵盤、光筆及滑鼠輸入訊息的操作行為，到現今的除了以手的互動外，更有雙手雙腳的身體互動裝置，同時更加上力量的回饋裝置，讓實體的世界有機會可以感受到虛擬世界的知覺感知(Sturman, 1994)。如圖 2.10 的力回饋數據手套 (data glove)，其具有的地心引力、碰觸、抓取等功能，有如人的在真實界抓取一物體一樣，有重量，厚度等感覺。

另一個互動裝置為現今最易安裝且最經濟，即是透過一般具 CCD 的 Webcam 攝影機，將人的手勢、身體動作即時的 (real-time) 將人的影像傳到電腦的影像辨識軟體裡，判斷其與電腦裡的虛擬物件之 2D 位置關係，即與產生互動 (圖 2.11) (Marks, 2002)。



圖 2.10、力回饋手套(Immersion, 2002)



圖 2.11、真實影像與虛擬影像的互動(Marks, 2002)

最後一個為可以產生三軸向 (x, y, z) 的互動裝置，即是使用者身上帶有感應器，透過另一個收發器，電腦可以知道感應器在虛擬空間中的相對位置，而一般這樣的感應方式可分為四種：

- 機械式--利用一支如機械手臂的裝置，透過手臂的彎曲、旋轉計算出位置，其精確度也最高。
- 超音波式--由使用者身上的感應器發出超音波，經由數個如麥克風的裝置接收，測出其時間差來計算出感應器的位置。
- 磁場式--由使用者身上的感應器發出磁場，經由三組接收器接收信號變化，取得空間座標值 (x, y, z)。
- 光學式-- (圖 2.12) 將紅外光線投射到操作者身上的反光球 (marker)，並由安放於四周的接收器 (攝影機) 接收，以光學式 3D 人機介面即時追蹤技術計算其位置(工研院, 2002)。



圖 2.12、光學式即時定位器裝置(工研院, 2002)

2.4 3D VR 軟體

現在可以在系統軟體裡直接對數位模型做即時互動及編輯行為，大部份是直接選擇已開發好的應用軟體或者直接用 C/C++ 以 OpenGL/Direct X 去開發一個即時的互動環境，前者可能會因應用軟體所提供的功能而招受到許多限制，而後者可能要由一個有程式能力的工作團隊去開發才能達成，因此現行的除了遊戲公司有自己的開發團隊外，一般的使用者只能選擇一些商業化的 3D VR 軟體，如在 94 年較早出現可以在網路上瀏覽的 VRML(Stuart, 1996)，及現行有較完整易使用的軟體，Virtools、EON、Muse、Director 3D 等商業軟體，每個商業軟體各自有自己的優缺點，如 EON 雖然較後面兩項易操作，但在網路上的操作行式只能以單機版來操作，不能和其它客戶端做溝通，而 Muse 雖可解決這樣的缺點，但其在網路瀏覽方式，卻需要再下載特殊的瀏覽軟體才能看的到 3D 網站的內容，而最後一項 Director 3D，雖有前面所述所缺的優點(Macromedia Inc., 2003)，但其內建的物件互動操作函數 (library) 較沒前面這些軟體來的完整，需要有較好的程式能力者去寫所需的互動函數，對一般的使用者會較難入門使用。

2.5 相關研究

在真實的空間裡，呈現有如真實般的虛擬物件，一直是人類對科技的一種夢想，承如 007 電影”縱橫天下(The world is not enough)”，即由一種裝置，將虛擬影像，以 3D 立體投影方式，呈現在一個真實空間，觀看者就圍繞在這虛擬物件的周圍，討論關於這虛擬物件的事情，同樣的形況，也時常發生在建築設計的過程中，設計師們圍繞在一個實體模型間，討論這個建築設計；因此如何在真實空間中，顯示 3D 虛擬影像，目前一直是眾多研究者努力的目標，底下是我們針對目前研究研究 3D 影像及在無介質中呈像的一些研究：

--Heliodisplay(io2technology, 2003)：(圖 2.13)是一種不需要任何介質，就能將影像投影在空氣中的一種顯示器，主要的原理是利用一種可以擾動空氣分子的裝置，讓投射出來的可見光可以反射，造成影像可以呈現在空氣中，其投影的尺寸最小為 5 吋，最大的 42 吋。

--Perspecta Spatial 3D System(Favalora et al, 2000)：(圖 2.14)半圓球底下有一部馬達及高更新率的投影機，投影機利用折射方式，將影像投影到半圓球裡的投影面，利用馬達轉動投影面與折射鏡面，投影機快速的依投影面轉動的方向投上不同角度的影像，造成立體的影像。

--All-around 3-D Display System(Hitachi Ltd, 2004)：(圖 2.15)呈像原理類似上例 Perspecta Spatial 3D System，同樣以一台投影機、折射鏡面加投影面，但這主要不同的地方在於投影的影像及折射鏡面，投影機一次所投射的影像為 24 個不同角度的環物影像，經由圍繞在投影面的 24 面折射面，同時間打到投影面上，透過影面的旋轉，造成立體影像的呈現。



圖 2.13、Heliodyisplay
(IO2technology, 2003)



圖 2.14、Persperta
Spatial 3D System
(Favalora et al, 2000)

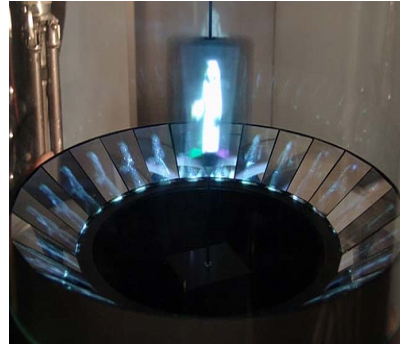


圖 2.15、All-around 3-D Display
System(Hitachi Ltd, 2004)



第三章 研究重點

Exploration

數位模型既然有了在尺寸、形式、顏色、材質、光影等強大功能可以來彌補傳統實體模型的不足，那麼實體模型的消失應該是可以被預期的。然而，在現今大多的專業建築設計者還是認為數位模型的模擬的確很逼真，而他們仍然無法在設計的過程中，放棄使用實體模型 (Liu,1996)。所以本研究的问题是傳統的實體模型是否有一些必需且根本的特質尚未被賦予在數位模型中？而本研究的主要目的除了希望能夠找出實體模型的基本特質外，更進一步的將這些特質結合在數位模型中，藉此開發出一個具有實體特質的數位模型環境。

在次要目標上，為突破現今在個人電腦前透過滑鼠與鍵盤的互動行為，如在 Maya，3D MAX 為基礎的數位環境，其互動方式為設計者的必需藉由一手按住鍵盤的某一鍵，另一手操作滑鼠，方能自由的操作數位模型，因此，在這數位模型環境裡，我們利用空間定位裝置做為與數位模型互動的主要互動裝置，即是設計者手持的反光球與數位模型互動。




第四章 研究過程

Research Processes

爲了瞭解實體模型異於數位模型的特質有那些，在本研究過程中的 4.1 節，我們以案例研究(case study)的方式，透過受測者訪問中的資料，分析實體模型的特質，並希望將這些特質賦予到 4.2 節我們所要建立的數位模型環境中。在這數位模型環境中，在 4.2.1 我們首先簡介了我們所要發展的 VR CAVE 硬體設備及互動控制裝的光學式定位系統，在 4.2.2 後則爲主本研究的重點，經由第二章媒材回顧，有關於 3D VR 軟體的討論，我們選擇了 Director 做爲本環境開發的主要軟體工具；基於本硬體環境爲 PC 群所主成，在 CAVE 中的每個影像爲各自 PC 所負責，因此在此環境的立體視覺呈現，需要以這個硬體環境爲主要考量；另一個問題爲伺服器傳送資料到客戶端的同步問題，在這我們主要在每個時間格裡，同時對六部客戶端傳送相同的資料，讓每個攝影機所投射出的場景資料能同時更新；再來的部份是關於定位器的互動控制，經由 Director 外部即時輸入進來的 3D 位址，與 director 裡的 3D 介面設計，設計者由手上的反光球與 CAVE 裡的虛擬物件互動。最後是在 4.3 的成果展示中呈現其顯示與互動狀態。

4.1 案例研究



在實體模型與數位模型的特質差異中，Lin(1999)已提出實體模型在“尺度感”與“量體感”有較大的優勢。基於這樣的研究，我們選定台北市立美術館(Taipei Fine Arts Museum, TFAM) (圖 4.1) 爲一個已被建好的建築物(constructed architecture)，做爲實體模型與數位模型比較的基礎，再挑選了四位建築系畢業生且習慣在設計中使用實體模型與數位模型的受測者，而我們同時準備了以紙板做成的 1/200 實體模型，及以在 Maya 裡的數位模型。首先，請測受者對於在設計過程中，使用實體模型時會使用到的知覺感知之百分比(表一)，因而得到在視覺及觸覺方面的最大比例，然而在觸覺的部份，在這我們把它解釋成爲對實體模型的互動感知，因此在第二部的實驗，我們請受測者就視覺感知與互動感知方面，做實體模型異於數位模型的特質比較，進而從受測者的訪談文字中，歸納出實體模型的特質。

最後歸納結果，我們可從視覺感知方面知道，除了“尺度感”與“量體感”外，受測者對於一個在電腦螢幕裡的數位模型及眼前真實存在的實體模型有個很容易發現的是有“視覺深度感”，即可透過雙眼判斷附近物體與物體之距離的能力；而當受測者移動旋轉實體模型時，可以即時感受到光線打到實體模型上，陰影在空間裡的變化關係，即爲“即時陰影”的特質；另外對互動感知方面，除了實體物質都會有的“質量感”外，第二個爲“可觸性”，受測者都會提到的是實體模型可以經由手直接去碰觸到實體材質，進而會影響到其對建築物之結構及可被施工之可行性。

表一、操作實體模型在知覺感知中的比例

知覺感知	視覺	觸覺	聽覺	嗅覺	味覺
百分比	80%	20%	0%	0%	0%



圖 4.1、台北市立美術館之實際建築(左)、實體模型(中)及數位模型(右)。

4.2 數位模型環境

4.2.1 硬體架構

數位模型環境是架構在圖 4.2 由工研院所開發的被動式 VR CAVE 上，其主要由三面平面的投影螢幕(screen)所構成，之間的投影螢幕為 120 度，每面螢幕的影像再由負責左右眼的投影機(projector)以背投影方式投射，然而以投影機直接投射在螢幕上會需較長的投射距離，相對，這樣所組成的 VR CAVE 會占較大的空間，爲了要解決空間上的問題，在此 VR CAVE 上，利用了無折射的反射鏡解決。

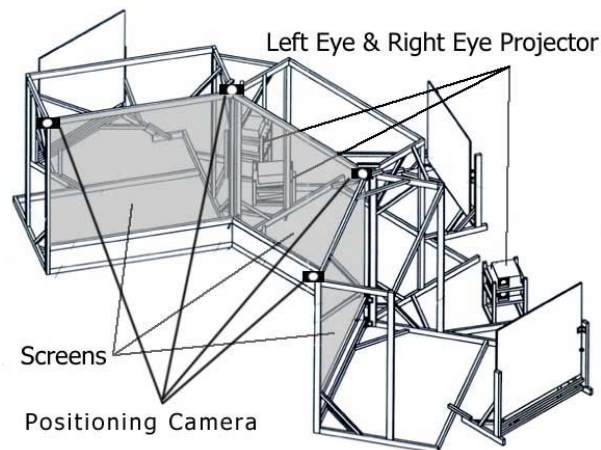


圖 4.2、VR CAVE 硬體架構

立體數位模型環境之影像係由六部投影機所投射，而這六部投影機之影像來源分別爲六部客戶端(client)電腦所傳送，另外，這六部客戶端電腦透過網路 TCP/IP 連接到一部伺服器端(server)電腦，做爲整個 VR CAVE 電腦群(PC clusters)的中央樞紐，負責接收輸入訊號，經過其處理後，再將資料傳送給六部客戶端電腦，將影像內容投射到三面的投影螢幕上。

在互動的輸入端上，我們選擇了一個以影像基礎式(image-based)3D 定位系統，即使用者手持反光球（圖 4.3），能被即時轉換成 3D 位置，並透過 RS-232 傳輸介面，將位置傳輸到伺服端電腦，而其硬體（圖 4.4）主要是由一部個人電腦，一張能同時接收四個影像訊號的影像截取卡，若干反光球所構成，四部鏡頭貼有紅外光濾光片(IR pass filter)的攝影機（positioning camera）（圖 4.2），每部攝影機再搭配左右兩個紅外光投射器，其主要是功能是要讓紅外光投射到反光球的紅光能順利進入到攝影機的影像感測晶片 (CCD)裡，避免可見光之影像雜訊過度的干擾。



圖 4.3、手持反光球



圖 4.4、定位伺服器之主機、紅外光投射器與攝影機

4.2.2 軟體架構

本研究以 Macromedia 公司的 Director 8.5 及其網路伺服功能的 Multiuser 做為主要開發工具，Director 最主要的特色是能整合現大部份的數位媒體檔案，從點陣圖檔，向量檔，音效檔，3D VR 檔等，透過內建的行為函數庫(behavior library)可以有效的整合這些各種不同的媒體檔案，另外，在進階的整合上，透過在 Director 上所發展出來的一套程式語言 Lingo，使用者可以跳出行為函數庫的限制，自行設計符合自己需求的函數庫。Lingo 語言和其它如 C，Java 等正規程式語言最大不同在於它是在時間軸的方運作，即是畫面程式(frame script)一執行時，畫面迴圈(frame loop)會在既有的時間軸上不斷的重覆跑動，如同影片播放時，以每秒播放至少 24 張方式，讓在顯示區(stage)的物件移動時有連續感。

圖 4.5 為數位模型環境的主要軟體架構，在圖的左邊虛線矩形為一般的建模軟體，如 Maya、3D MAX 等，將製作好的 3D 數位模型輸出(export)成可以被 Director 所接受的 W3D 格式，並將輸入到中間實線矩形的伺服端(server)電腦裡，即由 Director 輸入，Director 再將 W3D 數位模型資料，透過 Multiuser 傳送到六部的客戶端(client)電腦，每部客戶端電腦裡的 Director，再將其所接收到的 W3D 資料，繪製成 3D 影像，並投影到螢幕上去，另外，在圖下方實線矩形為定位器伺服端(positioning server)電腦，負責將四部攝影機所截取的反光球影像，由工研院所開發的轉換軟體 origin.exe，即時的將其轉換成 3D 位

址，並將位址傳送到伺服端電腦，由 Director 的 FileIO Xtra 讀入 3D 位址。

經由在數位模型環境的互動介面設計，反光球的 3D 位址透過 FileIO Xtra 讀入，判斷其位置與介面關係後，將反光球的位置及環境裡的其它物件（如數位模型）位置，旋轉角度等資料透過 Multiuser 傳送給六部客戶端電腦裡的 Director 接收，並改變其影像內容。

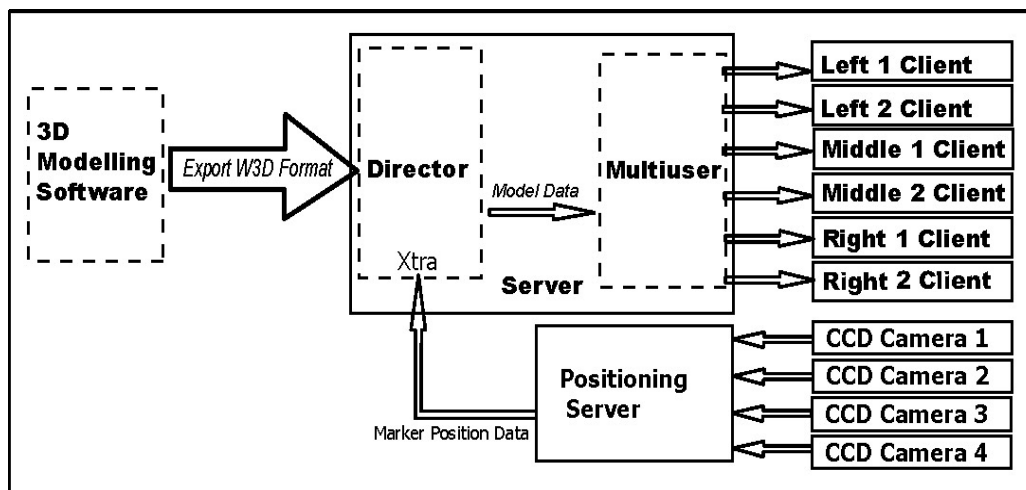


圖 4.5、VR CAVE 軟體架構

4.2.3 攝影機架設

由於人雙眼的可視角為 120 度，雙眼間距離大約為 8 公分(Goldstein, 1999)，因此在數位模型環境裡，我們以（圖 4.6）左方（LL 和 LR 攝影機）、中間（ML 和 MR 攝影機）、右方（RL 和 RR 攝影機）三組攝影機模擬人的可視角，左方組攝影機、中間組攝影機與右方組攝影機夾角各為 40 度，每組的攝影機間距離依人雙眼間距離 8 公分設定，向內角度為 0.2 度。

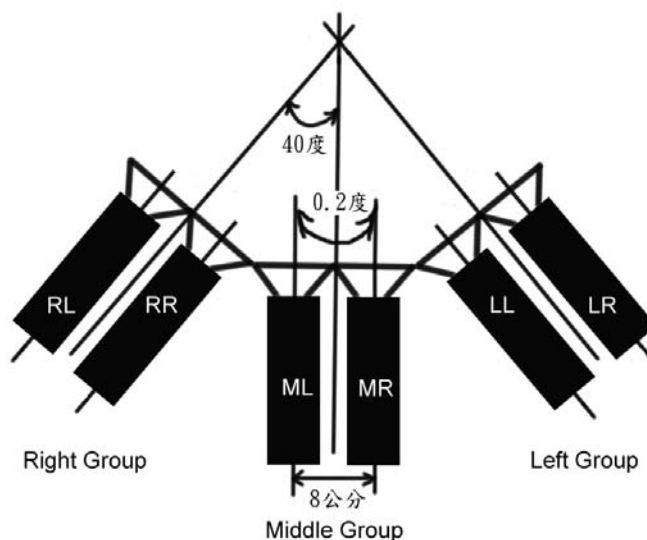


圖 4.6、攝影機設定

部份程式碼如下：

```
on CreateLeftGroupCameras --建立Left Group的攝影機
  scene.newCamera("LL")
  scene.newCamera("LR")
  scene.newCamera("LG") -- node camera of Left Group
  --攝影機依X軸向左右移開4公分
  scene.camera("LL").transform.position = vector( -4.0000, 0.0000, 0.0000 )
  scene.camera("LR").transform.position = vector( 4.0000, 0.0000, 0.0000 )
  --向內角轉.1度
  scene.camera("LL").transform.rotation = vector( 0, .1, 0)
  scene.camera("LR").transform.rotation = vector( 0, -.1, 0)
end
```

4.2.4 反光球位置輸入

從定位伺服端電腦算好的反光球位置，經由 RS-232 介面，以封包方式傳入伺服端電腦，以每秒 20 至 30 次的速度傳送新位址，由在伺服端電腦 testApp.exe 程式解封包後並寫到其目錄下的 ComOut.txt 文字檔，其內容為一字串(string)型態，如” 1(100.00023, 237.0003, 45.00012)”；另外，在 Director 裡的畫面程式，透過函數 get3d，不斷的讀入新的反光球位置，底下為函數 get3d 的程式碼：

```
on get3d me --從positioning server 取得反光球的位置的函數
  set pos = "" --從磁碟檔開啓的資料所要放的變數
  set myInstance = new(Xtra"fileIO") --打開FileIO Xtra
  setfiltermask(myInstance, ".txt (存文字形態),*.txt")
  fileN = " C:\ImvnsNew\ComOut.txt " --開啓後的資料檔名及路徑位置放到變數 fileN
  openFile(myInstance, fileN, 1) --依據fileN所提供的檔名及路徑位置開啓檔案
  set pos = readfile(myInstance) --讀檔
  leng = length(pos) --計算讀出的字串長度
  -----將字串形式轉成數值形式,並以向量3D座標回傳回-----
  if pos <> void then --預防pos 讀到的是空字串
    pos1 = chars(pos, 4, leng-2)
    chr = 1
    xx_switch = true
    yy_switch = false
    zz_switch = false
    end_leng = length(pos1)
    repeat with sta = 1 to end_leng
```

```

if xx_switch=true and chars(pos1, sta,sta)="," then
  xx = chars(pos1, chr, sta-1)
  xx_switch = false
  yy_switch = true
  chr = sta +1
else if yy_switch=true and chars(pos1, sta,sta) = "," then
  yy = chars(pos1, chr, sta-1)
  chr = sta+1
  yy_switch = false
  zz_switch = true
else if zz_switch = true then
  zz = chars(pos1, chr,end_leng)
  exit repeat
end if
end repeat
xx1=value(xx)
yy1=value(yy)
zz1=value(zz)
d_pos = vector(xx1,yy1,zz1)
return d_pos
end if
end

```



4.2.5 互動設計

設計師在觀看他自己手持的一個實體模型時，會對模型有上下左右旋轉及拿近拿遠的互動行為，而在以 Maya，3D Max 等個人電腦基礎下的 3D 虛擬環境，對於一個數位模型的互動行為，會先用滑鼠移動遊標(cursor)到數位模型的地方，以點 (click) 一下左鍵的動作做選取，或者一手按住鍵盤的某個鍵，另一手按住滑鼠左鍵拖曳，做數位模型的移動或旋轉，然而在以 VR CAVE 呈現的數位模型環境，

其 3D 互動介面的設計，我們以較接近人的認知模型為設計的考量，如設計者站在 VR CAVE 的中央，當手持的反光球往前移時，數位模型會以類似被推的方式移遠，而手向右時則使模型向右旋轉等。設計的方式是在數位模型環境裡設計了六個感應區 (圖 4.7)，如反光球往前移動時，數位模型環境裡的紅球也會往前移動，碰觸到感應區時，數位模型會依那感應區的設定，做相對的互動回饋，而在這我們所設定的功能有移近、移遠、轉左、轉右，轉上，轉下六個功能。而感應區的設計主要是利用 Director 裡碰撞偵測(collision detection)的功能，當物件與物件有所碰觸時，會知道那裡物件發生碰撞，如我們這裡所設計的是紅色的反光球如碰到名字為 rotate left 的物件，程次即會呼叫旋

轉函數旋轉數位模型向左旋轉。

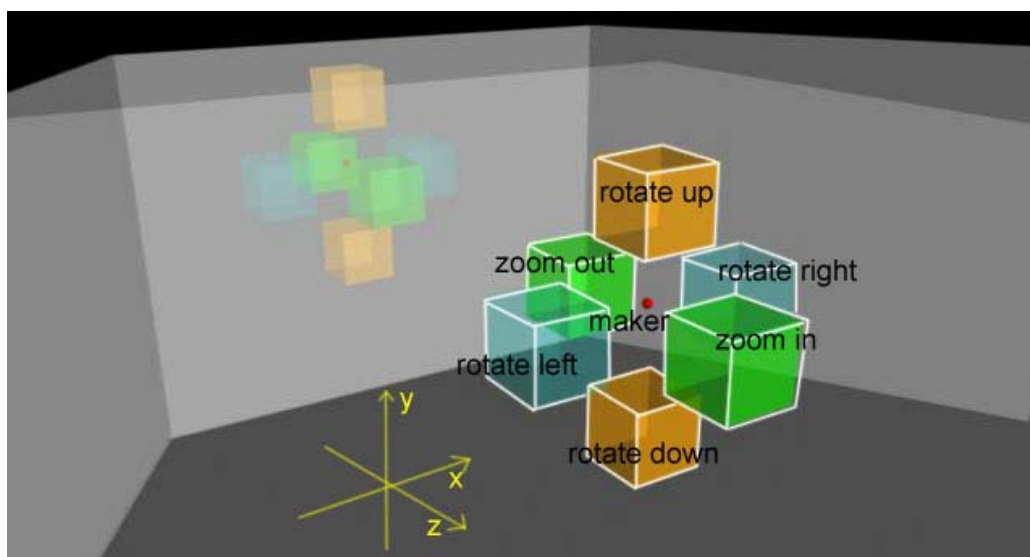


圖 4.7、3D 界面

部份程式碼：

```
on collision_model nums
  --增加model的屬性，在這裡的#collision為碰撞偵測屬性
  scene.model(nums).addModifier(#collision)
  --打開 碰撞偵功能，而這宣告之前，必須先打開model的碰撞屬性
  scene.model(nums).collision.enabled = 1
  scene.model(nums).collision.resolve = 1 --打開碰撞辨識
  scene.model("ball").collision.immovable = 1 -- 讓碰撞物間可以相互穿透
  scene.model(nums).collision.mode = #box
  -- 碰撞偵測模式分為#box, #mesh,#sphere, 而這裡所要偵測的範圍為整個模型,固設為#box模
  式,#mesh只能偵測有無碰撞到model的polygon, 即只能偵測到model的表皮,偵測方式較為精確,相
  對較耗電腦運算
end

on setCollCalBakc me
  --偵測紅球所碰撞的model
  scene.model(62).collision.setCollisionCallBack(#collision,me)
end

--偵測紅球碰到那個互動方塊，並做出移進移遠，上下左右的旋轉
on collision me, colData
  if coldata.modelb.name = "Zoom_Out" then
    scene.model("point").translate(vector(0,0 ,-100))
  end if
end
```

```

if coldata.modelb.name = "Zoom_In" then
    scene.model("point").translate(vector(0,0 ,100))
end if
if coldata.modelb.name = "Rotate_L" then
    scene.model("point").rotate(vector(0,1,0))
end if
if coldata.modelb.name = "Rotate_R" then
    scene.model("obj").rotate(vector(0,-1,0))
end if
if coldata.modelb.name = "Rotate_U" then
    scene.model("obj").rotate(vector(.1,0,0))
end if
if coldata.modelb.name = "Rotate_D" then
    scene.model("obj").rotate(vector(-.1,0,0))
end if
end

```

4.2.6 資料傳送

當使用者手持的反光球被定位伺服器轉化為 3D 位置，並傳送到伺服端電腦的 Director，Lingo 程式偵測到傳送進來的位置後，即在傳送的伺服端與接收的六部客戶端之 Director 建立一顆與反光球對應的紅球，以每秒至少十次之方式，同步更新反光球位置及紅球與互動感應區碰撞時，數位模型所產生的位置與旋轉角度的變化。

建立Director伺服端的Multiuser連線：

```

on ConnectMuServer() --連線multiuser Server
    global muobj
    the idlehandlerperiod = 0
    myserver = "192.168.0.7" --設定連線的Server 主機
    muobj = new(xtra "multiuser") --建立網路連線的multiuser Xtra 物件
    errCode = muobj.setNetBufferLimits(1*1024,1*1024,1) --設定在記憶體裡的佇列緩衝區大小
    muobj.setNetMessageHandler(#defaultcallback, "global handler", 1)
    muobj.connectToNetServer([#remoteAddress:myserver, #loginInfo:[#userID: "gaudi",
    #password:"123", #movieID: "coolgame"],#localUDPPort:1627])
end

```

底下為畫面程式裡的傳送程式碼，這裡所傳送的是反光球位置及數位模型位置及旋轉角度：

```

if nnloc <> void then

```



```

obj_pos = scene.model("obj").transform.rotation --取得數位模型的旋轉角度
main_pos = scene.model("main_obj").transform.position --取得數位模型的位置
scene.model("ball").transform.position = nnloc --取得反光球位置
msg = [nnloc, obj_pos,main_pos] -- 以陣列方式放到msg的變數裡
muobj.sendNetMessage([#recipients: "@AllUsers" , #subject:"short message", #content:msg,
#udp: TRUE]) -- 將msg的資料傳送給所在連到Multiuser的客戶端
end if

```

4.3 成果展示

經由定位伺服器將反光球 3D 位址連結到伺服端的 Director，再經與互動感應處理，將反光球與數位模型之位置變化的資料傳到六部客戶端的 Director，最後投影到投影螢幕，這樣的程序完成後，設計者在 VR CAVE 前面揮動反光球，即能自然地控制眼前的 3D 立體數位模型；而底下圖為最後設計者在數位模型環境中操作數位模型移近、移遠、轉下、轉上、轉右、轉左最後的呈現結果：

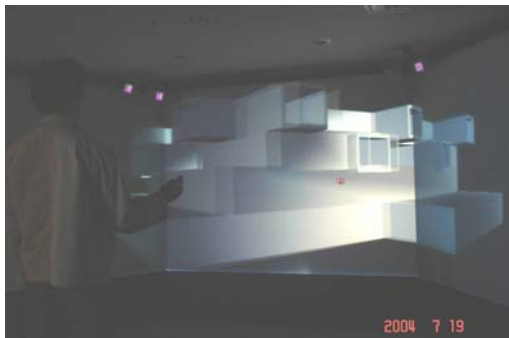


圖 4.8、數位模型移近

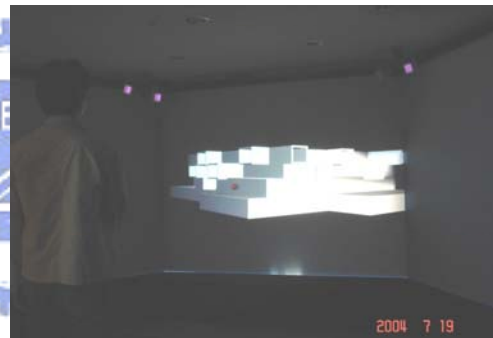


圖 4.9、數位模型移遠



圖 4.10、數位模型轉下

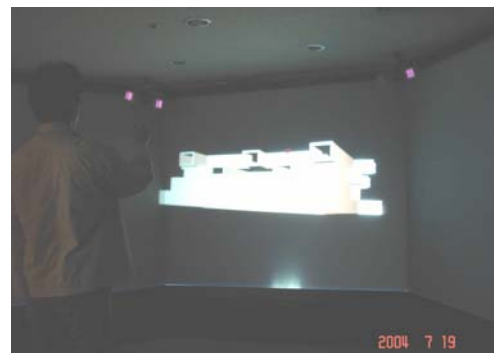


圖 4.11、數位模型轉上

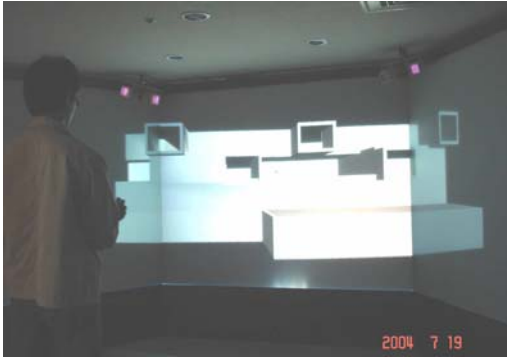


圖 4.12、數位模型轉左



圖 4.13、數位模型轉右



第五章 對設計的可能應用與影響

Possible Applications and Impacts to Design

設計者在觀看一個實體模型時，視覺感知的觀察遠大於其它的知覺感知，而同樣以視覺呈現占主要部份的 VR CAVE，可以滿足設計者對於模型在視覺上的需求。因此在本數位模型環境提供數位模型在“尺度感”、“量體感”及“視覺深度感”等實體模型的視覺特質，讓建築設計者有機會將在建模軟體裡的數位模型，經由格式的轉換輸出，即可輕易的將數位模型呈現在此環境裡，並能提供設計者對於實體模型即有的視覺感受與思考模式，亦能減少在設計的每個過程中，對實體模型製作的需求程度與時間的浪費。

在互動的介面上，本環境以是空間定位器做為主要與數位模型互動的工具，設計師摒除了傳統鍵盤和滑鼠的互動方式，以較接近人認知模型的互動方式，用手上的反光球對數位模型做移動、旋轉的互動行為，即能改變數位模型的觀看角度及觀看的遠近。

另外，由於在數位環境裡的數位模型，可以任意調整數位模型大小的特性，因此只要設計者調整數位模型到與真實建築物大小時，即能以立體的虛擬實境方式瀏覽，設計師能即時的掌握到設計過程中建築物的外部與內部空間，因此這樣的特性，同時也突破了即有的實體模型只能在外部觀看的限制。

在其它的應用上，數位模型環境不只可以展示設計上的模型，更可以做為一個即時互動的展示空間，如展示在博物館中的雕塑品，在以往的參觀經驗，參觀者只能隔著一層玻璃或在一定的距離及角度參觀雕塑品，更不可以碰觸到雕塑品本身，然而在有如真實般的虛擬立體展示空間中，參觀者除了可以用手持的反光球任意調整雕塑品的觀看角度，更可調整雕塑品觀看的遠近。

第六章 結論與後續建議

Conclusion and Suggestion

結論

本研究基於一般性的案例研究，我們可以得知設計師對於實體模型的知覺感知，視覺感知遠大於觸覺感知，另外，實體模型異於數位模型在視覺感知中的一些特質，除了已有的“尺度感”與“量體感”外，另外為“視覺深度感”、“即時陰影”兩種視覺特質，而在觸覺感知中的特質則為“質量感”及“可觸性”。而本數位模型環境基於本研究所應用的 VR CAVE 設備，因其呈現立體視覺的特性，在此環境裡可以呈現具“尺度感”，“量體感”與“視覺深度感”等實體模型在視覺上的特質，而“即時陰影”的視覺特質基於在即時的 3D 環境中，對於陰影的呈現，有賴於客戶端電腦的顯示卡效能，因此本環境在此項特質是無法提供的。另外，在觸覺的特質方面，牽涉到物理回饋裝置的應用，在此列為本環境的未來研究。

後續建議

由於本研究屬於媒材初探性質，專注於數位模型在 VR CAVE 裡的立體視呈現、六面不同視角影像的同步顯示與空間定位器之點的互動，而不是對環境效能表現的改善，所以本環境會有幾項限制，做為未來研究之改善與解決目標。

由於 Director 和其它如 C/C++ 語言比較起，尚屬於較高階語言，雖然其製作 3D VR 容易讓非程式背景人使用，且有了 Lingo 程式的輔助，讓 Director 在 3D VR 有了更高的靈活性(flexible)，但在本研中，我們發現 Director 在即時接收來自 Multiuser 所傳來的資料，無法有效的消化在佇列裡的資料，以致造成畫面更新率的降低而連帶影響影像表現的流暢性。

在互動設計上，是以光學影像截取方式計算反光球的位置，因此為了讓至少二部攝影機可以照攝到反光球位置，設計者需要站在一定的位置，如本環境是設置在立體呈現效果最好的中間點位置，方能得到較正確且順暢的定位；另外，在以反光球的互動上，對應到虛擬環境裡的是一個點，和滑鼠遊標最大不同的是它是一個有三維座標的一個點，而遊標是二維，但沒有滑鼠上的左右鍵可以下確認的動作，因此在本研究利用了點的三維特性，將 Director 裡的碰撞功能轉化成一個可以互動的 3D 介面，然而這裡主要限制在於為了讓反光球易於碰到所設定的介面方塊裡，需將方塊設大，但又礙於反光球只能在一定的範圍內移動，介面的功能只提供基本的上下左右旋轉與移近和移遠六個功能。

未來研究上，基於反光球在 3D 虛擬空間移動時，其連續且可被紀錄的 3D 位置資料點，點再轉成面，可以將數位模型環境增進為一個不只觀看數位模型的地方，尚可成為一個可創作 3D 造形的一個虛擬環境。另外，亦可以將本數位模型環境回去與實體模型再做

更進一步的認知差異。



參考資料

References

- 5DT: 2002, Fifth Dimension Technologies, <http://www2.dcs.hull.ac.uk/simmod/Technology/HMD.htm>
- Bai, R. Y., Liu Y. T.: 1998, *Toward a computerized procedure for visual analysis and assessment*, Proceedings of the CAADRIA '98, pp. 67-76
- Favalora, G., Hall, M., Giovinco, M., Napoli, J., Dorval, R. K.: 2000, *A Multi-Megavoxel Volumetric 3-D Display System for Distributed Collaboration*, IEEE Globecom 2000 Conference
- Goldstein, E. B.: 1999, *Sensation and perception*, Brooks/Cole Publishing Company, pp. 215-244
- Hearn, D., Baker, M. P.: 1997, *Computer Graphic, C Version*, 2nd ed., Prentice Hall Inc.
- Hitachi Ltd.: 2004, <http://www.hitachi.com/New/cnews/040224.html>
- i-Art: 2003, http://www.i-art.com.tw/Products_TC/3D%20Glasses/3D%20Glasses_TC.htm
- Immersion: 2002, http://www.immersion.com/3d/products/haptic_workstation.php
- IO2technology: 2003, <http://www.io2technology.com/dojo/168/v.jsp>
- Ishii, H., Underkoffler, J., Chak, D., Piper, B., Ben-Joseph, E., Yeung, L., Kanji, Z., 2002, *Augmented Urban Planning Workbench: Overlaying Drawings, Physical Models and Digital Simulation*, Proceedings of Conference on IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality.
- Lastra, A.: 1995, *Technology for Virtual Reality*, SIGGRAPH'95 Course, No. 8, pp. 3.1-3.27
- Lin, C. Y.: 1999, *The representing Capacity of Physical Models and digital Models*, Proceedings of the CAADRIA 1999, pp.53-62.
- Liu, Y.T., Lee, Y. Z., Wang, C. J.: 2002, *Oriental Digital: Physical-Virtual Space Dialogue of Taiwan*, Taiwan
- Liu, Y. T., Eisenman, P.: 2001, *Emergence of digital architecture*, Hu's, Taipei
- Liu, Y. T.: 1996, *Understanding of Architecture in the computer Era*, Hu's, Taipei
- Macromedia, Inc.: 2003, <http://www.macromedia.com/software/director/>
- Marks, R.: 2002, *Video Interfaces for Entertainment*, http://murl.microsoft.com/videos/stanford/cs547d/020927_OnDemand_100_100K_320x240.htm
- Mazuryk, T., Gervautz, M.: 1996, *Virtual Reality: History, Application, Technology and Future*, <http://www.cg.tuwien.ac.at/TR/96/TR-186-2-96-06Paper.pdf>
- Millon, H. A.: 1994, *The Renaissance from Brvnelleschi to Michelango* Rizzoli, New York
- Mitchell, W., McCullough, M.: 1997, *Digital design media*, New York
- Porter, T., Neale, J.: 2000, *Architectural supermodels: physical design simulation*, Architecture Press
- Piper, B., Ratti, C., Ishii, H.: 2002, *Illuminating Clay: A Tangible Interface with Potential GRASS Applications*, Proceedings of the Open Source GIS - GRASS User's Conference
- Robinett, W., Holloway, R.: 1995, *The Visual Display Transformation for Virtual Reality*. Presence, Vol. 4, No. 1, pp. 1-2
- Rohling, R., Hollerbach, J.: 1993, *Calibrating the Human Hand for Haptic Interfaces*, Presence:

- Teleoperators and Virtual Environments, Vol. 2, No. 4, pp. 281-298
- Sasada, T.: 2000, *Computer Graphics and design*, Presentation, Taiwan
- Schkolne, S.: 2002, *Drawing with the Hand in Free Space*, Leonardo, vol.35, no. 4, pp. 371-375
- Shibano, N., Hareesh, P. V., Hoshino, H., Kawamura, R., Yamamoto, A., Kahiwagi, M., Sawada, K.:
2003, *CyberDome: PC Clustered Hemi Spherical Immersive Projection Display*, International
Conference on Artificial Reality and Telexistence
- Stanney, K. M.: 2003, *Ch31 Virtual Environments, The Human-Computer Interaction Handbook*,
Lawrence Erlbaum Associates Inc. Mahwah, New Jersey
- Stuart, R.: 1996, *The design of virtual environments*, McGraw-Hill, New York
- Sturman, D., Zeltzer D.: 1994, *A Survey of Glove-based Input*, Computer Graphics and Applications,
Vol. 14, No. 1, pp. 30-39
- Wade, J. N.: 2001, *Leonardo da Vinci's Struggles with Representations of Reality*, Leonardo, vol. 34,
no. 3, pp. 231-235
- 工研院: 2002, 光電所, http://www.oes.itri.org.tw/coretech/imaging/img_vrr_adv_001.html



附錄

訪問前：

準備一個1/200的台北市立美術館的實體模型與在電腦螢幕裡的一段台北市立美術館之動畫及在Maya中的台北市立美術館之數位模型，由受訪者觀察這兩種媒材所呈現的建築模型。

訪問題目：

1. 請問您觀察實體模型時，您會用到您視覺、觸覺、聽覺、味覺、嗅覺五大知覺感知所站的比例為何？

2. 請您依第1題您所認為的會使用的知覺感知，對這兩種媒材所呈現的模型做比較，您認為實體模型異於數位模型的特質是什麼？

訪問後之資料整理：

受測者一：

視覺:80% 觸覺:20%

--除非軟硬體真能進步到能完全模擬真實光影材質，且速度上能完全active，這樣也許就可取代實體模型了因為現在最強大的軟體在光影材質上害是很容易就看出式電腦的就是那種即時視角光影，比較易於去思考設計的問題，雖然maya的openGL也不錯，但他光影材質的表現還是必須RENDER後才能感受（即時陰影）

--實體模型再比例深度上易於理解(尺度感)

--實體模型當然是在實際觸感、即時互動(可觸性)、

受測者二：

視覺:90% 觸覺:10%

--模型或是觀察對象因為與所存在空間其他物件而存在關係，可藉由與週邊物體的相對關係，判斷出觀察對象的尺度比例。(尺度感)

--數位模型的認知來自於平面圖像的閱讀，憑藉著經驗判斷為立體物件的表徵，因此較於法藉由東西的相對位置，認知到三度空間中的深度關係。(視覺深度感)

--實體模型受照的光源比較複雜，而數位模型受照光源比較固定，除非設定轉換觀察角度時光源能有動態的變化，使模型達到最佳的受照狀態，以利觀察。(即時陰影)

受測者三：

視覺:80% 觸覺:20%

--實體模型提供實體可以即時的光影變化，空間角度變換快速，優於非平面上的顯示

三度空間，比例的感覺較明顯，提供一般數位模型更大的視野觀賞等(即時陰影)(尺度感)

--實體模型有提供觸摸的方式，可以提供翻轉，拿取，可感受到模型材料上的質感上的觸摸的方式，可以感受到硬度，溫度，質感，等然而電腦模型無法提供材料的味道

(質量感)(可觸性)

受測者四：

視覺： 70% 觸覺： 30%

--實體模型受當時自然光線(包含室內的照明)影響，有非人為控制的即時的光影表現(即時陰影)

--實體模型的尺度感，無法如數位模型一樣去模擬人的視點，調整出擬真的視角，但整體縮小的感覺卻可提供觀看者對實體建築的尺度不同的想像(尺度感)。

--實體模型具有可觸摸的特質，為模型本身提供了不同於數位模型的價值感。相對的因為其構成材料有明顯的觸感，所以觀賞者往往並不會直接以實體模型的材質當作實體建築的模擬，而多半當其為一獨立作品來看待(可觸性)

