

國立臺北科技大學
資訊工程研究所

碩士學位論文
編號：114598017

網頁三維數位資產建模使用可延伸三維圖
形標準

研究生：陳榆中





國立臺北科技大學

資訊工程研究所

碩士學位論文

網頁三維數位資產建模使用可延伸三維圖
形標準

Web3D Digital Heritage Modeling Using X3D



研究生：陳榆中

指導教授：謝東儒 博士

中華民國 一百一十五年 七月

中文摘要

關鍵詞: 可延伸三維圖形、網頁三維技術、三維數位模型、營造法式

本研究以網頁三維技術為核心，探討可延伸三維圖形於瀏覽器端三維展示之應用，並以建築模型之料拱構件作為展示題材，建置一套可直接於瀏覽器中執行之三維數位資產建模。可延伸三維圖形以場景圖與節點結構描述三維內容，具備開放標準、標籤語言與網頁繪圖整合能力，適合作為網頁三維建模展示之基礎。本研究利用可延伸三維圖形標準之場景節點、群組階層與節點命名機制，將構件幾何、名稱、尺度資訊與組裝關係整合，並結合網頁文件結構與網頁腳本語言技術，實作三維瀏覽、構件選取、資訊顯示、尺度標示、剖面觀察與組裝過程動態展示等互動功能，使三維模型可於一般瀏覽器中直接操作與查詢。本研究包含一座以可延伸三維圖形建置之網頁三維數位資產建模、一組轉換為標準格式之料拱構件模型，及一個可供其他典藏內容套用之網頁三維展示實作流程。為評估此一展示方式之成效，本研究另以書頁組十五人、系統組十八人進行組間實驗：系統組於作答時間與媒材評價上顯著優於書頁組。結果顯示，可延伸三維圖形結合網頁互動技術，能以低門檻、跨平臺之方式呈現具階層結構與資訊標註之三維內容，於資訊查找效率與使用者接受度上具有優勢，可作為網頁三維繪圖展示、數位典藏與互動式三維知識視覺化參考。

英文摘要

Keywords: Extensible 3D (X3D), Web3D Technology, 3D Digital Model, Yingzao Fashi

This study focuses on Web3D technology, exploring the application of Extensible 3D (X3D) to browser-based 3D presentation, and adopts the *dougong* (bracket set) components of an architectural model as the subject of demonstration to build a 3D digital asset presentation system that runs directly in a web browser. X3D describes 3D content through a scene graph and node structure, and its open standard, markup-based language, and integration with web graphics rendering make it a suitable foundation for Web-based 3D modeling and presentation. Using the scene nodes, grouping hierarchy, and node-naming mechanisms of the X3D standard, this study integrates component geometry, names, dimensional information, and assembly relationships into a single scene description; combined with HTML document structure and JavaScript techniques, the system implements interactive functions including 3D navigation, component selection, information display, dimensional annotation, cross-sectional viewing, and dynamic presentation of the assembly process, allowing 3D models to be operated and queried directly in a standard browser. The outcomes of this study include a Web-based 3D digital asset presentation system built with X3D, a set of *dougong* component models converted into the standard format, and a Web3D presentation workflow that can be applied to other digital archive content. To evaluate the effectiveness of this presentation method, a

between-subjects experiment was conducted with a printed-material group of 15 participants and a system group of 18 participants; the system group performed significantly better in task completion time and in ratings of the medium. The results show that X3D, combined with web interaction techniques, can present hierarchically structured and information-annotated 3D content in a low-barrier, cross-platform manner, offering advantages in information-retrieval efficiency and user acceptance, and can serve as a reference for Web-based 3D graphics presentation, digital archives, and interactive 3D knowledge visualization.



致謝

感謝指導教授在研究過程中的指導與協助，使本論文得以順利完成。從研究題目的形成、數位資產構件資料的整理，到三維模型展示系統的設計與論文內容的修正，老師皆給予許多具體建議，使本研究能逐步確立方向並完成。同時，感謝實驗室同學在模型建置、系統開發與論文撰寫過程中提供討論與協助，讓研究過程中遇到許多技術與表達上的問題，能透過與他們的交流，改善研究方法。也感謝參與實驗的同學，提供問題回報與問卷回饋，使本研究進一步分析展示與操作中的成效、限制與可改進之處，作為後續改良與開發的依據。此外，感謝開源軟體與相關技術社群所提供的工具與資源。研究在三維模型整理、格式轉換、網頁互動展示與論文排版過程中，受惠於多項軟體工具與技術文件，使研究工作得以順利推進。最後，感謝父母在碩士班期間給予支持與包容，使我能專心完成學業與研究。謹以此論文獻給所有曾經協助、鼓勵、指正與陪伴作者的人。

目 錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
致謝.....	iv
目 錄.....	v
圖 目 錄.....	vi
表 目 錄.....	vii
第一章 導論.....	1
1.1 研究動機與目的.....	1
1.2 問題描述.....	1
1.3 研究貢獻.....	2
第二章 文獻討論.....	3
2.1 網頁三維技術與可延伸三維圖形.....	3
2.2 三維數位資產與線上展示.....	4
2.3 構件知識之結構化與數位模型.....	5
第三章 網頁三維展示之設計與實作.....	6
3.1 三維模型構件與尺度資料整理.....	6
3.2 數位資產模型資料處理與格式轉換.....	8
3.3 可延伸三維圖形之場景節點對應與互動.....	9
3.4 尺寸標註與立面構成輔助視覺化.....	11
第四章 網頁三維展示結果.....	13
4.1 數位資產料拱構件展廳.....	13
4.2 宮殿大樣數位典藏展廳.....	16
4.3 宮殿之方圓圓方秩序.....	16
第五章 實驗結果與討論.....	19
5.1 實驗設計.....	19
5.2 測驗結果.....	19
5.3 綜合討論.....	21
第六章 結論.....	22
附錄 A.....	24
A.1 知識測驗題目.....	24
A.2 系統評價問卷題目.....	24
A.3 逐題答對率.....	25
A.4 系統評價問卷統計.....	26
參 考 文 獻.....	27

圖 目 錄

3.1	四鋪作科拱構件與分制尺寸標註示例 [1]	7
3.2	三維模型資料處理與格式轉換流程	8
3.3	三維模型場景資料與互動展示控制關係	10
3.4	數位資產木構建築七間殿身立面構成方圓圓方圖	12
4.1	科拱構件拆分與組裝展示畫面	13
4.2	科拱展示工具列檢視輔助功能示意	14
4.3	不同鋪作科拱模型切換展示	14
4.4	科拱構件標註與資訊顯示畫面	15
4.5	科拱構件分制標註展示畫面	15
4.6	宮殿整體模型展示畫面	16
4.7	數位典藏三維模型展示內容	17
4.8	宮殿立面構成輔助線展示畫面	17
5.1	兩組媒材評價量表評分之四分位距分布 (書頁組 $n = 15$, 系統組 $n = 18$)	20
5.2	對此方式有助於了解科拱結構與資訊之回答分布	20
A.1	書頁組與系統組之知識測驗逐題答對率 (書頁組 $n = 15$, 系統組 $n = 18$)	25
A.2	系統評價量表題之回答分布 ($N = 33$)	26
A.3	對認識科拱結構比例最有幫助之檢視功能勾選分布 (複選, $N = 33$)	26

表 目 錄

3.1	三維模型節點與構件資料之對應內容	10
3.2	料拱展示狀態與操作目的	11
3.3	宮殿立面構成輔助線類型	12
5.1	兩組評價量表與作答時間之檢定（書頁組 $n = 15$ ，系統組 $n = 18$ ） . . .	19
A.1	知識測驗題目內容	24
A.2	系統評價問卷題目內容	25



第一章 導論

1.1 研究動機與目的

隨著網頁三維（Web3D）技術逐漸廣泛應用於產品展示、線上模型分享與數位典藏瀏覽，使用者能方便地透過瀏覽器觀看三維模型並調整視角。然而，多數網頁三維展示將模型視為單一的幾何整體：模型雖可旋轉、縮放與平移，其內部卻缺乏可供操作的結構，例如部件無法個別選取，物件不具名稱與語意等問題，模型所承載的組成關係與尺度資訊亦無從查詢。現行展示多停留於外觀觀看的層級，三維內容僅是繪製的結果，而非可供檢索與互動的結構化資料。當展示對象由單一物件擴展為多部件、具階層與組合關係的內容時，此種展示形式便難以呈現部件之間的關係，也無法支援資訊查詢與導覽等進一步的互動需求。

可延伸三維圖形（X3D）為開放式的三維場景描述標準，提供了回應上述問題的技術途徑。其以場景圖組織三維內容，透過節點與階層結構描述幾何、外觀、變換與互動行為，並以文字化格式保存場景；三維場景因此不僅是繪製結果，亦是一份結構明確、並可與之相互對應的資料。節點命名對應物件語意，群組階層反映部件的組成關係，變換節點描述部件的空間配置，場景結構並可與網頁介面及腳本技術連結，實現部件選取、資訊顯示與動態展示等互動功能。此特性使三維展示得以由瀏覽延伸至結構與知識的層級，也為數位典藏內容的網頁提供了適合的技術基礎。

1.2 問題描述

將多部件的三維模型轉為網頁繪圖展示內容，涉及數個技術層面的問題。首先是格式與場景組織：建模軟體輸出的網格檔案多僅保存幾何資訊，不具部件語意與階層結構，須轉換為適合瀏覽器載入的場景描述格式，並於轉換過程中建立部件的命名、階

層與空間變換，使各部件可被獨立選取與操作，同時維持整體組合關係。其次是場景與介面的對應：互動展示需在瀏覽器端處理視角控制、部件拾取與事件回應，並使場景節點與網頁介面相互連結，使用者點選部件時，介面應即時顯示其名稱與尺度資訊；介面上的操作亦應能驅動場景的顯示狀態與動態展示。此種雙向對應是靜態模型檢視器與互動式展示系統的主要差異，也是現行多數網頁三維展示所欠缺的部分。

1.3 研究貢獻

本研究聚焦於如何以 X3D 場景結構為核心，建立自模型轉換、場景階層規劃、節點命名與資料對應至網頁介面與事件處理的實作方法，使多構件三維內容能於瀏覽器中被觀看、查詢與操作，本研究以營造法式之料拱構件作為展示內容，檢驗上述方法。料拱由多層構件依明確階層與組合順序疊置而成，各構件具名稱與尺度制度等文獻依據，展示系統須同時處理模型轉換、階層組織、構件資訊對應與組裝過程的動態呈現，足以完整涵蓋前述各項技術問題。

本研究之主要貢獻如下：

- 建立一套以 X3D 為基礎的多部件三維模型網頁展示方法，涵蓋模型格式轉換、場景階層規劃、節點命名與構件資料對應，使具組成關係的三維內容能以結構化形式描述，並發揮 X3D 開放標準與場景圖架構之特性，作為網頁三維內容發布之基礎。
- 以 Web3D 技術實作場景節點與網頁介面之間的雙向對應機制，包含部件選取與標示、資訊查詢、尺度標注與剖面觀察等互動功能，使使用者無須安裝外掛程式，即可於一般瀏覽器中透過階層圖瀏覽、選取與互動場景中的部件，使網頁三維展示由外觀觀看延伸至結構層級。
- 建置一座可於瀏覽器中直接執行的三維展示系統，並以營造法式之料拱構件作為典藏內容，將其構件階層、尺度制度與組裝關係轉換為互動展示，驗證本方法於數位文化資產典藏之適用性。

第二章 文獻討論

2.1 網頁三維技術與可延伸三維圖形

網頁式三維視覺化已成為透過互動式數位環境呈現複雜空間資訊的重要方法。相較於靜態影像或預先算繪動畫，網頁三維（Web3D）技術允許使用者直接在網頁平台中檢視、操作並理解三維內容。Chittaro 與 Ranon 討論 Web3D 技術應用於學習、教育與訓練的動機、議題與機會，強調其支援空間理解與主動參與的潛力 [2]。John 進一步檢視 Web3D 技術對醫學教育與訓練的影響，說明互動式三維環境如何支援複雜解剖與程序知識的說明 [3]。Ieronutti 與 Chittaro 於 X3D/VRML 世界中運用虛擬人進行教育與訓練，展示 Web3D 環境能夠支援情境式學習與互動模擬 [4]。Birr 等人則開發以 WebGL 為基礎的外科教學工具 LiverAnatomyExplorer，說明瀏覽器端三維視覺化在特定領域說明與訓練中的可行性 [5]。這些研究顯示，Web3D 環境在互動式知識傳遞與教育視覺化方面具有廣泛適用性。

在技術基礎方面，Evans 等人對網頁三維圖形進行系統性綜述，涵蓋瀏覽器端算繪技術、場景描述方法與三維資料傳輸，指出宣告式場景描述與 WebGL 硬體加速的結合是網頁三維發展的重要方向 [6]。Potenziani 等人則針對網路三維內容的發布與使用進行全面性調查，討論線上三維視覺化中的表徵格式、傳輸方法與互動機制，為三維內容如何透過網路環境散布與體驗提供了一般性的技術背景 [7]。可延伸三維圖形（X3D）為國際標準組織制定的開放式三維場景描述標準 [8,9]，以節點與階層結構組織場景中的幾何、外觀、變換與互動行為，並以文字化格式保存，使三維場景本身即為結構明確、可查詢的資料。Behr 等人提出 X3DOM 整合模型，將 X3D 節點直接映射為 HTML 文件中的 DOM 元素並保持同步，使網頁腳本得以如操作一般網頁元素般查詢與更新三維場景節點，X3D 場景因此無須安裝外掛即可直接在瀏覽器中呈現與操作 [10]。在三

維內容的語義組織方面，Liu、Su 與 Sun 提出一種基於 X3D 場景的三維模型自動語義標註方法，說明 X3D 不僅能支援幾何表徵，也能支援三維內容的語義組織 [11]。

綜合上述，Web3D 技術已被證實適用於互動式知識傳遞與教育視覺化，X3D 提供了開放標準的場景描述基礎，X3DOM 則使 X3D 場景無須外掛即可直接在瀏覽器中操作。本研究即以此技術組合為核心：以 X3D 節點階層承載構件幾何與語意資訊，並透過 X3DOM 的 DOM 整合機制，實作網頁介面與場景節點的雙向互動，將上述研究所示的教育視覺化潛力，落實於結構化構件內容的網頁展示。

2.2 三維數位資產與線上展示

數位典藏內容的線上展示是 Web3D 技術的重要應用領域。Schweibenz 指出，虛擬博物館的核心並非單純將展品影像搬移至網路，而是以數位物件與其脈絡資訊建構可供瀏覽與查詢的知識空間 [12]。Sylaiou 等人針對虛擬博物館進行綜述，歸納其常見型態包含網頁式展示、三維虛擬展廳與互動導覽等，並指出互動性與資訊深度是此類展示有別於靜態數位典藏的重要特徵 [13]。這些討論說明，三維數位典藏的線上展示除了展品數位化之外，亦涉及展示內容的組織方式與使用者的參觀經驗設計。

在展示工具方面，Potenziani 等人開發 3DHOP 展示框架，使博物館與研究機構能以較低的技術門檻於網頁中發布高解析度三維文物模型，成為文化資產線上展示的常用工具之一 [14]。在以 X3D 與 Web3D 技術建置展示系統的實際案例方面，Chai 提出以 X3D 為基礎的三峽大壩數位展示與水博物館展覽經驗，顯示 X3D 能夠用於建構大型工程或展覽空間的互動式表徵 [15,16]。Baglivo 等人則將 X3D/X3DOM、Blender Game Engine 與 OSG4WEB 應用於文化資產環境的開源視覺化，展示 Web3D 技術在透過互動式平台呈現文化資產空間內容方面的實用性 [17]。這些展示多以單件文物或整體場景的外觀瀏覽為主要形式，展品內部的部件結構、命名與組成關係較少成為展示與互動的對象。

2.3 構件知識之結構化與數位模型

本研究以料拱構件作為展示題材，其知識來源為宋代建築典籍營造法式，該典籍系統性記錄了木構建築的術語、尺度制度、比例關係與營造規則 [18]，梁思成之註釋 [19]、陳明達對大木作制度的探討 [20]，以及潘谷西與何建中之詮釋研究 [21]，均為理解其術語與構件組成邏輯提供了基礎。在尺度制度方面，朱永春與林源指出其建築形制透過構件與整體空間秩序之間的模數關係加以組織 [22]；Yu 與 Hui 探討面闊與柱高的比例數值 [23]，Wu 等人則探討大木作制度中「縫」的構造語義 [24,25]。這些研究顯示，料拱構件具有明確的名稱系統、材分尺度與階層組合關係，屬於結構化程度高的構件知識，適合作為驗證結構化三維展示方法的題材。

此類構件知識亦已被證實可轉化為可計算的形式模型，如以形狀文法描述其建築風格與料拱系統之生成規則，以及基於圖樣的程序化建模方法 [26-29]。在資訊模型方面，建築資訊模型（Building Information Modeling, BIM）為表徵、管理與交換建築資訊的數位框架 [30]；Murphy 等人結合測繪幾何資料與參數化構件物件，提出歷史建築資訊模型（Historic Building Information Modeling, HBIM）[31]，後續研究並將其擴展至語義增強與資訊管理等面向 [32,33]。Wen 進一步將空間語義規則應用於料拱系統的 BIM 參數化自動建模，顯示此類構件不僅能被表徵為幾何物件，也能被視為具有規則性與語義意義的建築元素 [34]。

第三章 網頁三維展示之設計與實作

本章說明本研究之網頁三維展示方法的建置流程，包含展示資料之整理、三維模型至 X3D 格式之轉換、X3D 場景節點與構件資料之對應，以及互動展示與標註視覺化之實作。整體流程以 X3D 場景結構為核心：模型於轉換階段建立物件階層與節點命名，網頁端則以節點識別名稱連結場景節點與資料表，據以實現構件選取、資訊查詢、尺度標註與組裝展示等功能。展示內容以營造法式中的料拱構件為主，並加入宮殿整體模型作為展示場景，使多構件模型之階層組織、資料對應與動態展示得以完整呈現；料拱既能作為獨立構件被觀察，也能置於建築整體脈絡中理解其位置與比例關係。

3.1 三維模型構件與尺度資料整理

為建立構件標註、尺度呈現與組裝展示所需之資料，本文首先整理梁思成注釋中與料拱相關之圖樣、構件名稱與尺寸說明，將文獻中的構件描述轉換為系統可使用的資料內容，使三維模型中的幾何物件能對應至明確的構件名稱、尺度資訊與展示階段。整理範圍以四鋪作、五鋪作與六鋪作料拱模型為對象，三者之構件數量分別為 25、53 與 68 個；由於構件數量較多，本文以構件性質為主要整理方式，將其歸納為料、拱、昂、耍頭與枋類構件等類型。整理流程分為三個步驟：構件辨識依據圖樣標註、構件形體與所在位置，確認各構件的名稱與類型；尺度整理依據文獻圖樣中標示之分制尺寸，整理構件長度、出跳距離與相關尺度關係，作為尺度換算與標註之依據；展示階段整理則依據構件在模型中的組裝順序與空間位置，建立組裝展示所需之階段資料。

尺度單位方面，本文採用分°作為規格化標註單位。營造法式以材分制度描述構件規格：以材作為斷面基準單位，材高之十五分之一為分°[19]，各類構件之尺寸與相互關係皆可以分數表述，不同尺度之建築因而可在同一相對基準下比較構件比例。梁思成注釋之料拱圖樣中，部分構件與出跳距離已標示明確之分制尺寸；如圖 3.1 所

示，「下昂出跳分數」圖樣同時標示構件名稱、相對位置與分制尺寸，例如裏跳與外跳之 25 分、30 分等出跳距離。本文以此類尺寸標示明確、且可於模型中辨識邊界之距離作為換算基準：以樑枋底部中心作為基準點，量測模型中對應之座標長度，計算「模型單位對分」之換算係數，並於網頁端套用，將模型中的局部尺寸轉換為以分表示之標註內容。由於換算係數直接取自文獻標示尺寸與模型對應長度之比值，標註數值與文獻圖樣具有直接對應關係，本文未再對換算結果進行額外之量化誤差分析；圖樣中尺寸標註較少、或模型中較難對應至單一構件邊界之部分，則作為輔助說明資料使用。

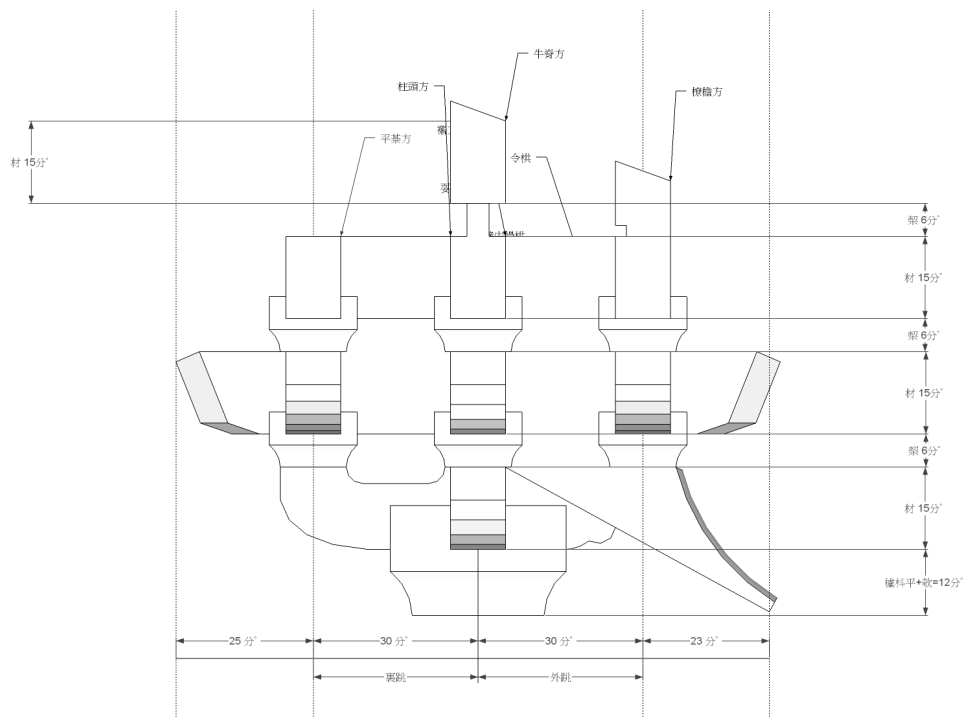


圖 3.1: 四鋪作料拱構件與分制尺寸標註示例 [1]

在資料結構上，由於不同鋪作形式之料拱在構件數量、配置與展示階段上有所差異，本文將構件資料區分為構件類型與構件實例兩個層面：構件類型指構件本身的名稱與分類，例如樑枋、散料、交互枋等；構件實例則指某一構件類型在特定鋪作模型、特定模型節點與特定展示階段中的實際出現情形。此區分可支援同一構件類型於不同鋪作模型中重複出現、或同一階段包含多個構件的情形。資料內容相應分為兩類：構件類型資料記錄構件名稱、分類、尺度說明與功能說明；構件實例資料記錄鋪作形式、X3D 節點名稱、模型位置與展示階段。兩類資料均以 JavaScript 資料表形式保存於網頁程式中，與 X3D 場景資料分層管理。其中展示階段係指組裝展示所使用的階段順序，依構件之實際安裝順序由下而上逐層設定：以樑枋所在層為起點，依構件上下承接關

係向上排列，並將位於相近高度層之構件盡量歸入同一階段，使組裝過程對應料拱逐層疊合之組裝邏輯。本節產出之構件類型資料與構件實例資料，將作為後續三維模型命名、X3D 節點對應、尺度標註與組裝展示控制之基礎。

3.2 數位資產模型資料處理與格式轉換

本文採用 X3D 作為網頁端場景格式，X3D 為 ISO 標準之網頁三維圖形格式，以節點階層描述場景結構，並可為節點賦予識別名稱，適合作為數位典藏之長期保存與展示格式；X3D 場景並可經由 X3DOM 框架直接嵌入網頁文件，於瀏覽器中載入與操作，無需額外安裝外掛程式。模型資料來源為實驗室既有之三維模型，包含四鋪作、五鋪作與六鋪作料拱模型及宮殿整體模型，原始檔案為 SketchUp 之 SKP 格式，無法直接於網頁端使用，且其物件組織方式未必符合互動展示所需之構件單元劃分。因此，本文之轉換流程為：先以 SketchUp 將原始檔案輸出為 DAE 格式，再匯入建模軟體 Blender 進行構件位置微調、物件階層整理與構件命名，最後輸出為 X3D 格式，整體流程如圖 3.2 所示。此流程的目的在於使原始模型保留可獨立操作的構件單元，並轉換為適合網頁載入的三維場景資料。

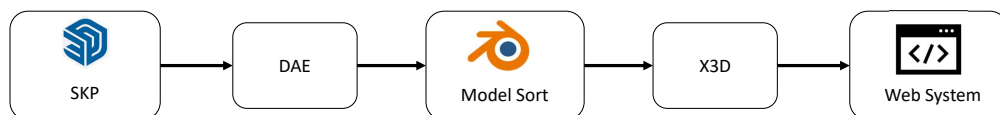


圖 3.2: 三維模型資料處理與格式轉換流程

中介格式依實際轉換測試結果而定，由於料拱組裝展示需要控制單一構件或同一階段中的多個構件共同移動，若模型匯入後合併為不可分離的單一物件，系統僅能展示整體外觀，難以支援構件資訊查詢、構件散置與逐階段組裝展示。本文曾以 OBJ 與 FBX 作為中介格式進行測試：以 OBJ 格式轉換時，無論經由何種軟體匯出與匯入，原始模型中的多個構件均被合併為單一網格物件，無法再行拆分；以 FBX 格式轉換時，SketchUp 匯出之檔案發生 ASCII 格式錯誤，無法正確匯入。相較之下，DAE 格式在轉換過程中可保留原始模型之物件階層，使各構件於匯入後仍為可獨立選取之物件，故本文採用 DAE 作為中介格式，並以保留物件層級作為轉換過程之主要處理原則。

在整理階段，本文針對匯入後之模型進行構件位置微調、物件階層檢查與構件命名：位置微調用於修正轉換過程中可能產生的位置偏移或方向差異；階層檢查用於確認各構件能否作為獨立物件被選取；構件命名則依第 3.1 節之構件實例資料，為各構件賦予可供程式辨識之名稱，此名稱於輸出後保留為 X3D 節點識別名稱，作為模型物件與構件資料之間的對應基礎。模型之尺度換算不在建模軟體 Blender 中進行，而是保留原始模型座標，由網頁程式建立之換算係數處理縮放與分制標註；模型檔案與標註邏輯可分開維護，換算方式調整時無需重新輸出模型。兩類模型之整理重點不同：料拱模型重點在於保留構件分離狀態與建立物件名稱，各構件之座標即為組裝完成狀態下的位置，作為組裝展示之目標位置保存於場景中，散置位置則由網頁程式於執行時計算；宮殿大樣模型作為整體展示場景，重點在於維持建築外觀、整體比例與主要立面方向。模型輸出為 X3D 後，本文於網頁端檢查載入狀態，確認外觀、比例、材質與構件節點是否符合展示需求，若出現物件遺失、比例異常或節點層級混亂等情形，則回到 Blender 修正後重新輸出，形成建模端與網頁端之間的迭代修正流程。

3.3 可延伸三維圖形之場景節點對應與互動

本文將展示資料分為兩層管理：X3D 檔案保存模型幾何、材質、空間位置與節點階層；構件名稱、構件分類、尺度說明、位置資料與展示階段則由網頁程式中的 JavaScript 資料表管理，兩層資料以 X3D 節點識別名稱建立對應，可分別維護與更新。X3D 場景以節點階層描述三維物件，料拱構件在輸出後由空間變換節點、形體節點、材質節點與幾何節點組成：空間變換節點記錄構件的位置、旋轉與縮放，作為定位與展示控制的基礎；形體節點組織構件外觀；材質節點保存顏色與表面屬性；幾何節點記錄頂點與面片結構。各構件於 Blender 中之命名於輸出後保留為節點識別名稱，實作上，各構件之空間變換節點以節點識別名稱加上固定後綴之 DEF 名稱標示，網頁程式即依此命名慣例於場景文件中查詢對應節點。資料對應以構件實例為基本單位：每一個構件實例對應至一個節點識別名稱，並記錄其所屬鋪作形式、構件類型、中文顯示名稱、完成位置與展示階段；構件類型用於分類、介面顯示與散置規則設定，構件實例用於對應模型節點與控制展示狀態，同一構件類型因而可依不同模型與不同位置對應至多個構件實例。構件資料之主要內容如表 3.1 所示。

表 3.1: 三維模型節點與構件資料之對應內容

資料項目	內容說明	用途
節點識別名稱	X3D 場景中構件節點之名稱	連結模型物件與構件資料
構件名稱	構件之中文名稱與細部分類	介面顯示與構件查詢
構件類型	料、拱、昂、耍頭與枋等分類	構件分類與散置規則設定
完成位置	構件於組裝完成狀態下的位置	組裝展示之目標位置
展示階段	構件於組裝展示中所屬階段	控制組裝展示之階段順序
尺度資料	分制尺寸與標註基準資料	尺度標註與比例觀察

系統執行時，先依所選鋪作形式載入對應之構件資料表，再讀取 X3D 檔案並注入 X3DOM 場景，依設定套用縮放比例、初始位置與預設視角，最後取得各構件節點，依節點識別名稱與資料表建立對應，整體關係如圖 3.3 所示。料拱模型提供構件查詢、尺度標註、構件散置與組裝展示；宮殿大樣模型提供建築整體觀察與立面構成輔助線展示，透過模型切換與視角設定，使用者可在局部構件與整體場景之間轉換觀察尺度。場景支援旋轉、平移與縮放等基本視角操作，使構件之上下疊合、前後出跳與左右配置能自不同方向被檢視。構件資訊顯示以節點識別名稱與構件資料之對應關係為基礎：當使用者選取特定構件時，系統依該構件之節點識別名稱查詢資料表，於介面中顯示構件名稱、構件類型、尺度說明與文字說明，使場景中的幾何物件對應至具體的構件資訊。

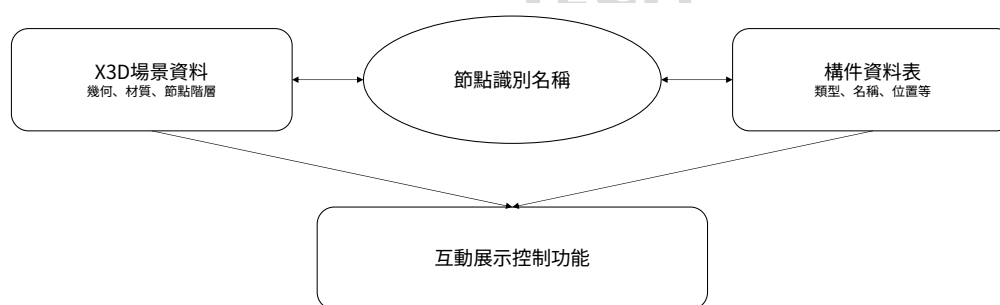


圖 3.3: 三維模型場景資料與互動展示控制關係

構件散置與組裝展示以空間變換節點之位置控制為基礎。完成位置以座標形式記錄於資料表中，與場景中構件之組裝完成位置一致；散置位置則不逐一預先指定，而由網頁程式於執行時依規則計算：系統以完成位置為基準，依構件類型套用水平方向之偏移量，並將構件統一移至模型下方之基準高度，使同類型構件集中配置、不同類型構件彼此分開且不與模型本體重疊，少數需特別安排之構件則以個別設定之偏移量與高度覆寫類型規則，散置配置因而可隨模型與展示需求調整，無需修改模型檔案。散

置時，系統將各構件之空間變換節點自完成位置以動畫移動至散置位置，使原本疊合於結構中、容易受遮蔽的構件能被單獨觀察；組裝展示採逐階段控制，使用者每前進一個階段，該階段所含之構件實例即由散置位置移動回完成位置，後退時則移回散置位置，每一階段可包含一個或多個構件實例，料拱由散置狀態逐層疊合為完整結構的過程可被反覆檢視。被選取之構件並可由使用者沿三軸移動與旋轉，作為個別構件形體與樁卯關係之自由觀察方式。整體而言，系統之展示狀態分為完整狀態、散置狀態與組裝展示狀態三種，可互相切換，使使用者能在整體觀察、局部觀察與過程觀察之間轉換，其呈現方式與操作目的如表 3.2 所示。

表 3.2: 料拱展示狀態與操作目的

展示狀態	呈現方式	操作目的
完整狀態	顯示料拱完成後之組合形態	觀察整體構成與構件位置
散置狀態	將構件移至模型周圍	觀察單一構件形體
組裝展示狀態	依階段控制構件回到完成位置	呈現料拱組成過程

3.4 尺寸標註與立面構成輔助視覺化

構件標註以分°作為呈現基準。若僅以模型座標單位呈現，使用者較難理解構件尺寸與傳統營造單位之間的關聯，系統因此依第 3.1 節建立之換算係數，將構件資料中的分制資訊轉換為標註文字與輔助線段，配置於對應構件附近，使模型外觀與尺度說明共同呈現。分制標註以一組可獨立開關的量測輔助元素實作，其空間配置以樁料底部中心作為基準點，並依文獻圖樣所示之出跳分數（如圖 3.1 中裏跳與外跳之 25 分、30 分等距離）設定各方向之刻度間距，使量測基準與文獻圖樣之標示方式相互對應。量測輔助元素包含四類：其一為分制格線，以分為間距之三維格線呈現空間尺度，並以每十五分（一材）為單位加粗顯示主格線；其二為三軸標尺，沿模型三軸方向標示以分表示之距離刻度與數值標籤；其三為地面量測尺，於模型下方依出跳分數配置刻度，呈現裏跳與外跳之水平距離；其四為水平量測切面，為可由使用者拖曳升降之半透明平面，即時顯示其所在高度相對於基準點之分值，用於量測構件之高度層位。

上述量測元素均由網頁程式於執行時依基準點位置與換算係數動態產生，以線段、文字與平面等 X3D 節點形式加入場景，作為獨立的顯示元素，使用者可在不改動原始模型的情況下開關；換算方式或基準點調整時，亦僅需更新資料與程式，無需重新輸

出模型。除構件標註外，宮殿整體模型加入立面構成輔助線，以呈現建築立面中之構成關係。輔助平面以切面形式配置於場景中，與大樣疊合顯示，作為獨立於模型幾何之外的顯示元素，使用者可自由開關。

立面構成輔助線依其用途分為四類，如表 3.3 所示：中軸線呈現立面的左右對稱關係；水平基準線標示台基、柱身、鋪作層與屋頂下緣等高度位置；柱列線顯示柱位與開間配置；屋頂輪廓線呈現屋面坡度與屋頂外形。圖 3.4 呈現輔助線之配置方式，圖中以建築中軸、主要水平分層、柱列與屋頂輪廓為基準，將立面中的對稱性、垂直分層與構件排列關係轉換為可視化內容。在場景呈現上，構件標註與立面構成輔助線均獨立於模型幾何之外，使原始模型、構件資料與輔助標示可分開管理：使用者觀察模型外觀時可關閉輔助標示，需要理解分制數值、建築分層或構件對齊關係時再開啟相應標示，並可藉此從整體建築角度觀察料拱所在位置及其與立面分層、柱列之空間關係。

表 3.3: 宮殿立面構成輔助線類型

輔助線類型	標示內容	視覺化目的
中軸線	建築立面中心位置	呈現左右對稱關係
水平基準線	臺基、柱身、鋪作層與屋頂下緣	呈現垂直方向分層
柱列線	柱位與開間位置	呈現柱列配置與間距關係
屋頂輪廓線	屋面邊界與坡度方向	呈現屋頂外形與斜向關係

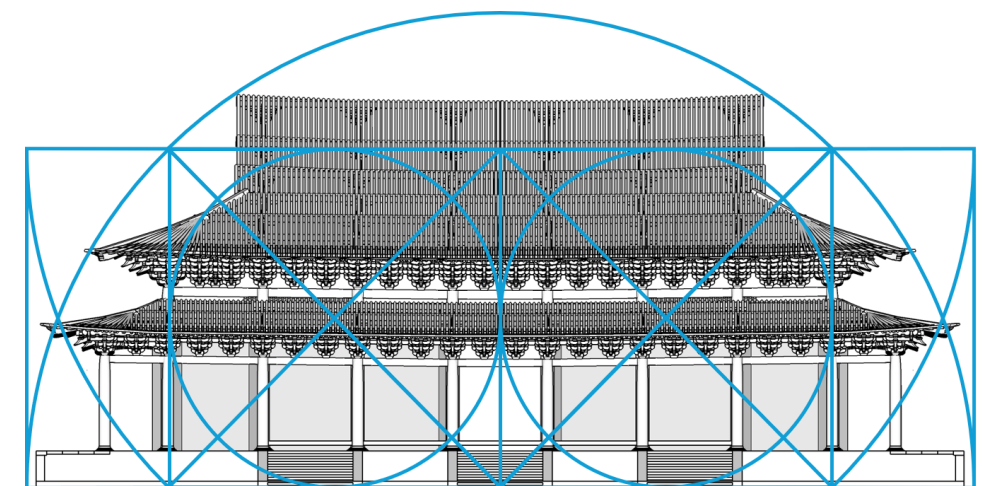


圖 3.4: 數位資產木構建築七間殿身立面構成方圓圖方圖

第四章 網頁三維展示結果

本章呈現依第三章方法建置之網頁展示成果。系統包含三個展示頁面：料拱構件展示頁提供構件拆分、組裝、資訊查詢與尺度標註；宮殿模型展示頁提供建築整體觀察與立面構成輔助線；數位典藏頁則整合多項三維模型於同一瀏覽環境。以下依序說明各頁面之展示內容，並以構件組成、尺度制度與建築構成等知識之呈現作為說明重點。

4.1 數位資產料拱構件展廳

圖 4.1 為料拱構件拆分與組裝展示畫面。系統依第 3.3 節之散置規則，將原本疊合於結構中的構件移至模型周圍，使各構件能以獨立狀態被觀察；啟動組裝展示後，構件依展示階段逐步回到完成位置。透過拆分與逐階段組裝的往復操作，料拱由下而上逐層疊合的組裝邏輯、構件之間的上下承接與前後出跳關係，得以由使用者自行操作並反覆檢視，而非僅以完成後的整體外觀被理解。

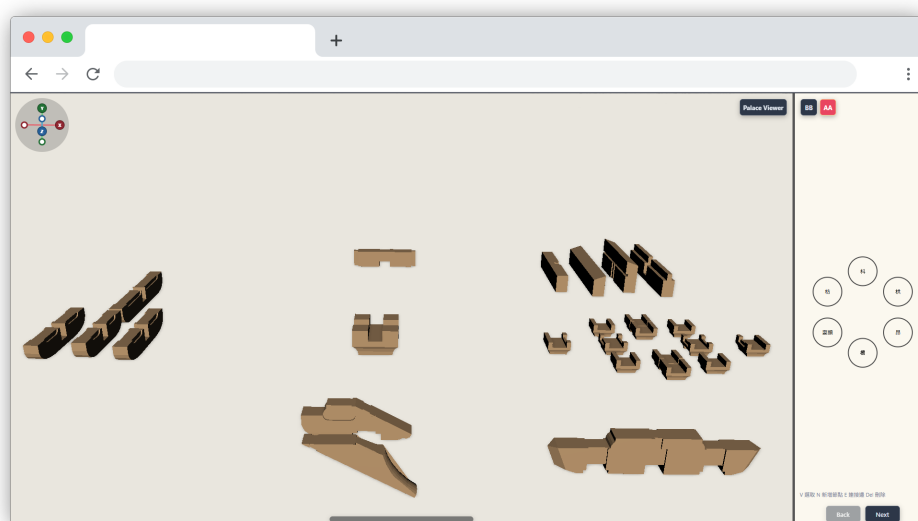


圖 4.1: 料拱構件拆分與組裝展示畫面

圖 4.2 為操作工具列之檢視輔助功能。工具列提供三維格線、座標三軸與切面顯示等選項：三維格線提供空間位置與尺度的視覺參照；座標三軸標示模型的方向基準；切面可沿軸向移動，將特定高度或深度上的構件對應關係獨立呈現，輔助使用者觀察被外側構件遮蔽的內部層位。模型切換、構件散置、組裝展示與尺度標註等操作整合於同一工具列，使完整狀態、散置狀態與組裝展示狀態三種觀察方式能相互對照。而系統亦可載入四鋪作、五鋪作與六鋪作三種料拱模型，圖 4.3 呈現其切換結果。三種鋪作形式在構件數量、出跳層次與上部承托構件配置上有所差異，於同一展示環境中切換與比較，可使鋪作數與構件組成之間的對應關係，以並列觀察的方式被理解。

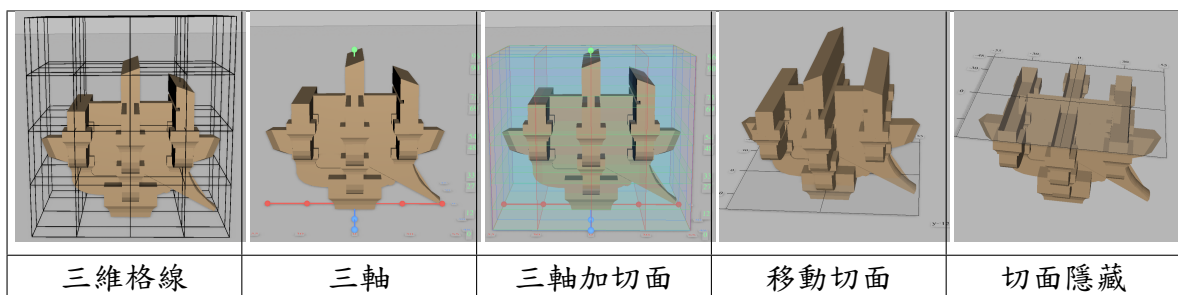


圖 4.2: 料拱展示工具列檢視輔助功能示意

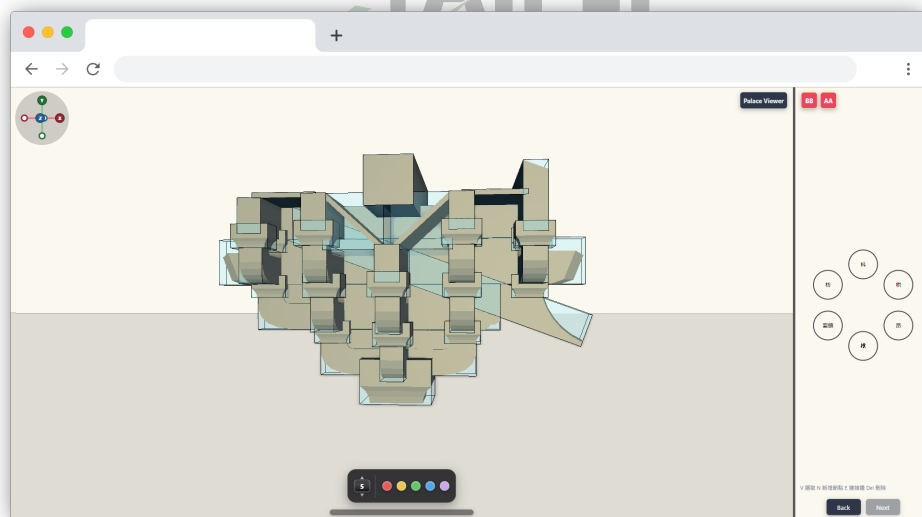


圖 4.3: 不同鋪作料拱模型切換展示

構件資訊顯示功能以 X3D 節點識別名稱與構件資料之對應為基礎。使用者點選構件或將滑鼠移至構件上方時，介面即顯示該構件之名稱、類型與文字說明，如圖 4.4 所示。場景中的幾何物件因而與樑料、散料、華拱等具體構件名稱建立連結，使用者在觀察形體的同時習得構件的名稱系統與分類。尺度標註功能依第 3.1 節之換算係數，將

模型局部尺寸以分制數值呈現。圖 4.5 為分制標註開啟後之畫面，尺寸線、端點記號與文字標籤配置於構件外側，呈現出跳距離等分制刻度，其排列方式與文獻圖樣（圖 3.1）相互對應。使用者可將模型上的量測結果與營造法式之材分制度直接連結，理解構件尺寸並非任意數值，而是依分制規範所定之比例關係，並預期使用者可藉此達到教學作用。

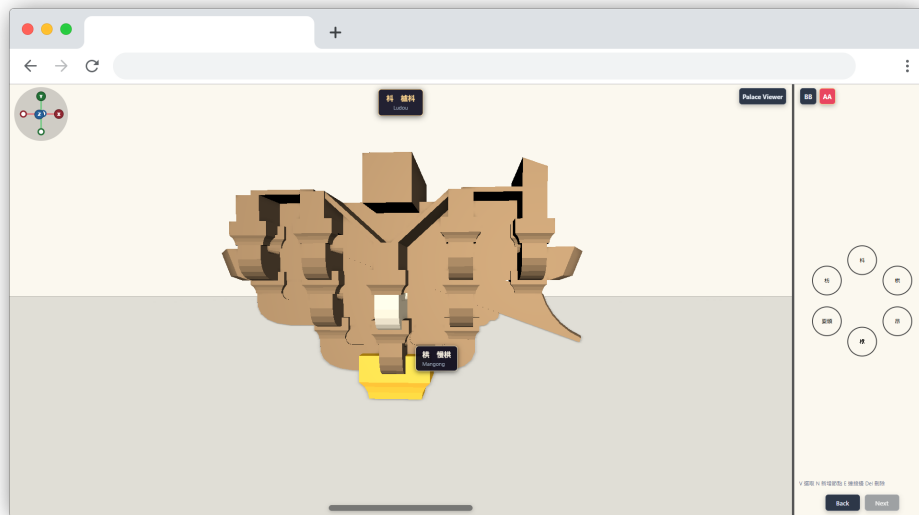


圖 4.4: 料拱構件標註與資訊顯示畫面

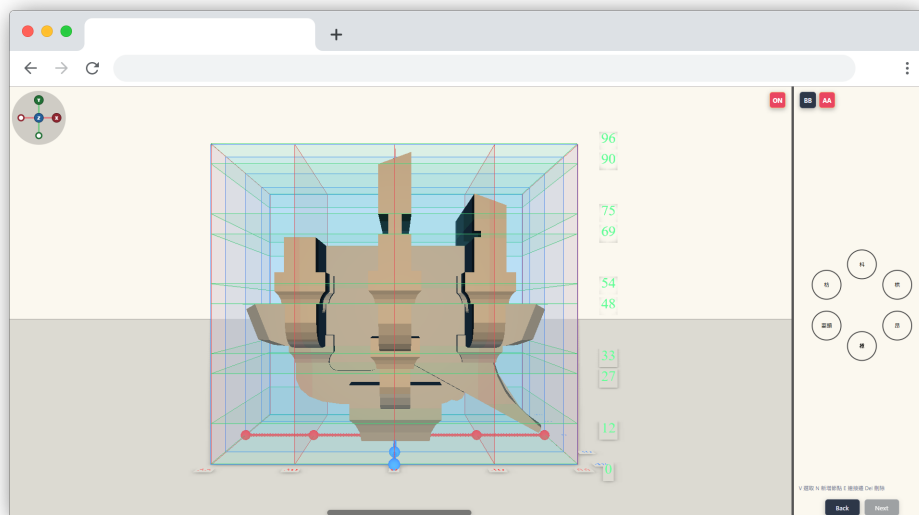


圖 4.5: 料拱構件分制標註展示畫面

4.2 宮殿大樣數位典藏展廳

宮殿整體模型用於呈現建築外觀、屋身比例與枋拱所在位置，使枋拱構件可被放回建築整體脈絡中觀察。圖 4.6 為宮殿模型展示畫面，使用者可透過視角操作觀察建築立面、屋頂形體與構件排列方式，將前節所觀察之枋拱局部構件與其在建築中的實際位置及尺度層級建立對應，理解枋拱作為柱與屋頂之間承接構造的角色。

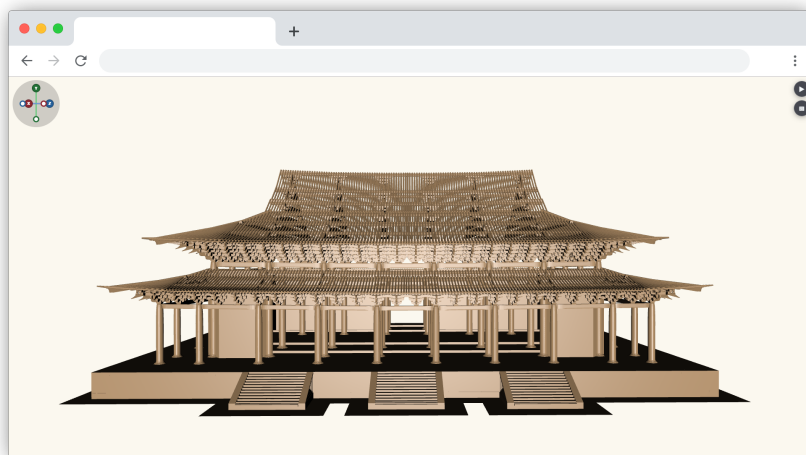


圖 4.6: 宮殿整體模型展示畫面

圖 4.7 為系統的數位典藏頁面。頁面左側為模型清單，目前收錄超過一百項三維模型，包含枋拱模型、宮殿模型與其他古建築構件，均以 X3D 格式整合於同一瀏覽環境。使用者選取清單項目即可載入對應模型進行操作觀看。清單的組織方式以構件類型為主要分類軸，並支援名稱關鍵字檢索；每一項目除模型檔案外，另記錄名稱、簡要說明與基本描述欄位。由於各模型沿用第 3.3 節的節點識別名稱慣例，典藏頁所收錄的模型可直接套用構件展廳的查詢與標註機制，無需另行建立資料。

4.3 宮殿之方圓圓方秩序

宮殿模型並提供立面構成輔助線，呈現建築立面中的中軸線、水平分層、柱列位置、屋頂輪廓與構件對齊關係，圖 4.8 為輔助線開啟後之畫面。輔助線將立面中不易直接察覺的構成關係轉為明確的視覺參照，使用者藉此觀察建築的左右對稱、台基至屋頂的垂直分層，以及枋拱層在立面中的位置，理解古建築立面構成的秩序與規則。

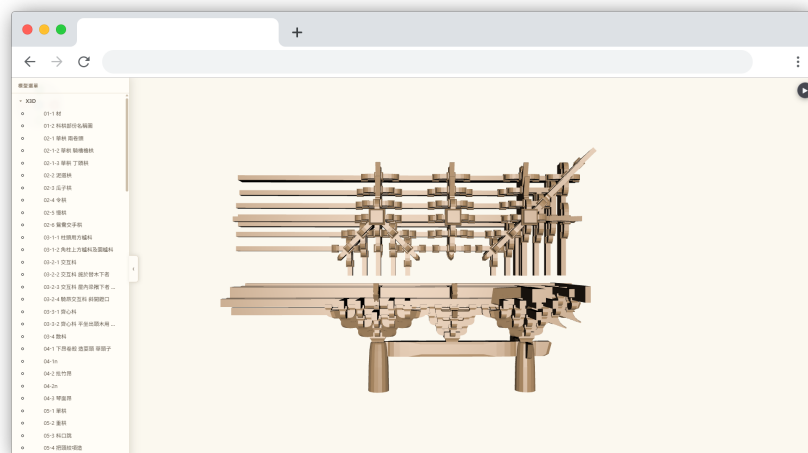


圖 4.7: 數位典藏三維模型展示內容

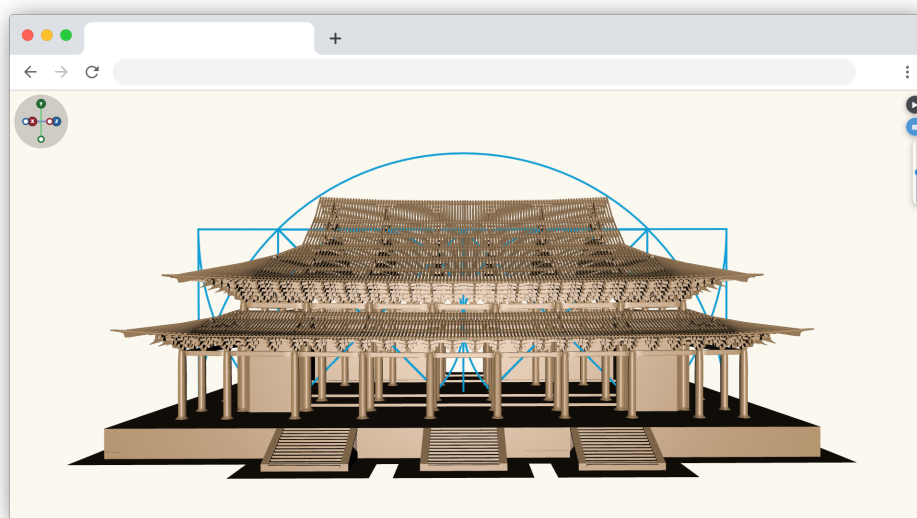


圖 4.8: 宮殿立面構成輔助線展示畫面

與料拱展示頁之量測元素相同，立面構成輔助線亦作為獨立於模型幾何之外的顯示元素，可由使用者自行開啟或關閉：觀察建築原始外觀時可將其隱藏，判讀立面構成時再行開啟，兩種觀察方式得以在同一場景中對照比較。整體而言，本章展示結果顯示，透過 X3D 場景結構、構件資料與網頁互動功能之整合，三維模型可由靜態外觀轉換為具備查詢、標註與階段控制的展示內容，使料拱之組裝邏輯、構件名稱與材分制度得以透過操作被觀察與理解。



第五章 實驗結果與討論

5.1 實驗設計

施測對象為 20 至 25 歲之大學生與碩士生共 33 人，受測者均未曾研讀營造法式，對其內容僅有名稱層面之認識，作答時需實際查閱所給媒介方能回答，適合用於比較兩種媒介之資訊查找與傳達成效。受測者依實驗方式分為兩組：書頁組查閱營造法式注釋中之料拱圖樣指定章節 ($n = 15$)，系統組操作本文建置之網頁展示系統 ($n = 18$)，兩組均先進行五分鐘之熟悉時間。實驗分為兩階段，第一階段為知識測驗，兩組受測者各自透過所屬媒介作答同一份測驗並記錄作答時間，測驗共七題，完整題目內容與逐題答對率詳見附錄 A.3；作答完畢後，受測者以李克特五點量表（1 分為不同意，5 分為同意）回答「此方式有助於了解料拱結構與資訊」，以評價其所使用之媒材。第二階段為系統評價問卷，書頁組於測驗結束後實際操作本系統五分鐘，使兩組受測者均具備系統操作經驗，再由全體受測者填答，完整問卷內容與統計詳見附錄 A.4。測驗水準為 $\alpha = .05$ ，所有檢定均為雙尾。

5.2 測驗結果

兩組對其所使用媒材有助於了解料拱結構與資訊之量表評價，其統計結果如表 5.1 所示。系統組之評價高於書頁組 ($U = 207.0, p = .007$)，顯示受測者認為網頁三維互動展示於料拱結構與資訊之傳達上，較書面圖樣更具幫助。

表 5.1: 兩組評價量表與作答時間之檢定 (書頁組 $n = 15$ ，系統組 $n = 18$)

指標	書頁組 Mdn	系統組 Mdn	U	$p \downarrow$
媒材評價量表	3.0	4.5	207.0	.007
作答時間 (分鐘)	5.80	2.71	34.0	< .001

兩組量表評分之四分位距分布如圖 5.1 所示。系統組之評分 ($M = 4.33, SD = 0.77$) 整體高於書頁組 ($M = 3.27, SD = 1.16$) 且分布較為集中，全數落於普通至非常同意之間；書頁組評分則自非常不同意至非常同意均有分布，離散程度較大。

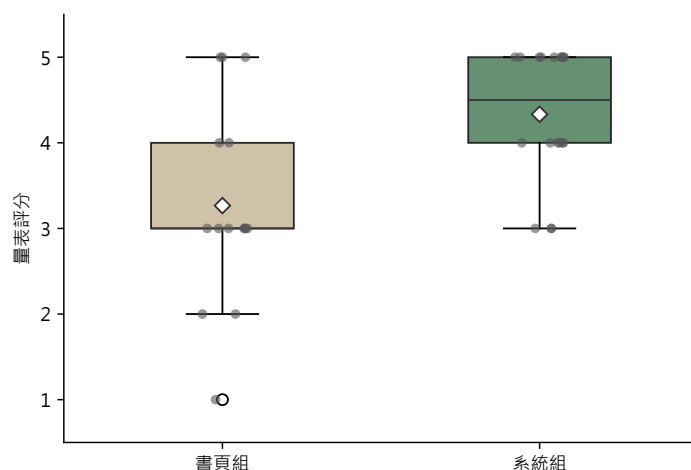


圖 5.1: 兩組媒材評價量表評分之四分位距分布 (書頁組 $n = 15$ ，系統組 $n = 18$)

兩組於各評分選項之回答分布如圖 5.2 所示，系統組之回答明顯集中於同意端，同意與非常同意合計逾八成，書頁組則以普通為眾數且分布分散。此結果與表 5.1 之檢定結果一致，顯示兩種媒材於受測者主觀評價上具有明顯差異。

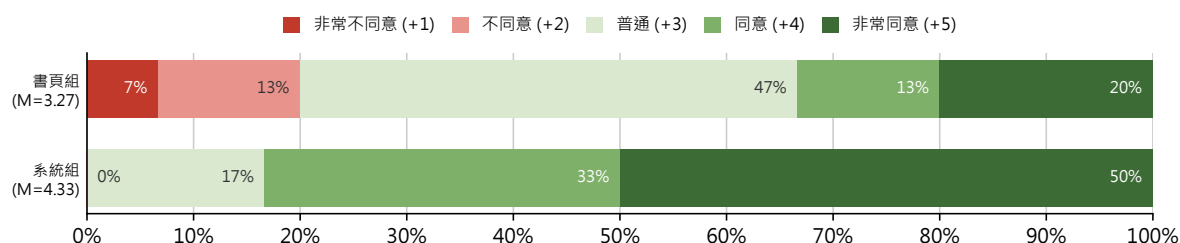


圖 5.2: 對此方式有助於了解料拱結構與資訊之回答分布

在作答時間方面，書頁組平均為 6.22 分鐘 ($SD = 2.11, Mdn = 5.80$)，系統組為 3.32 分鐘 ($SD = 1.70, Mdn = 2.71$)，組間差異統計顯著 ($U = 34.0, p < .001$)。此結果顯示系統之互動檢視與資訊查詢功能使受測者能較快定位作答所需之資訊，而書頁組須於篇幅中翻查對應圖樣與表格，耗時較長。客觀之作答效率與主觀之媒材評價呈現一致方向，均支持網頁三維互動展示較書面圖樣更利於料拱知識之查找與傳達。

5.3 綜合討論

綜合上述結果，系統組於媒材評價與作答時間兩項指標均優於書頁組，受測者認為網頁三維互動展示較書面圖樣更有助於了解料拱結構與資訊，且作答時間中位數不及書頁組之一半，顯示散置組裝功能與方圓圓方輔助線之疊加展示相較於靜態書面圖樣，能使構件組成關係與比例構圖更容易被觀察；全體受測者對網頁整合三維模型與構件資料作為數位典藏方式之評價亦屬正面，支持本文以構件資料化與網頁三維展示作為數位典藏發布形式之定位。惟知識測驗中材架尺度查找一題為書頁組表現較佳（87%對 67%），顯示書面表格於單純數值查找中仍具效率；系統評價問卷中輔助線量表評分為三題中最低，可能原因在於輔助線判讀需先理解方圓圓方之構圖概念，對不具相關背景之受測者而言，疊加之幾何線條未必能立即轉化為比例關係之理解；另開放式意見指出功能列可見性、檢視切換按鈕與移動切面點選等介面問題。上述限制顯示系統於數值查詢、構圖概念引導說明與操作介面設計上仍有改進空間。



第六章 結論

本文完成一套以 X3D 為基礎的網頁三維互動展示系統，並以料拱構件作為驗證案例，將數位典藏中的構件名稱、尺度概念、模型資料與組裝關係轉換為可於瀏覽器中觀看、查詢與操作的展示內容。系統建置後，使用者無需安裝額外軟體或外掛，即可透過瀏覽器直接檢視料拱模型與宮殿整體模型，並藉由構件資訊、尺度標註、立面輔助線與組裝播放等功能，觀察三維模型的形體、位置與組成關係。研究成果顯示，X3D 的節點式場景結構可作為三維模型網頁發布與構件資料連結的基礎；透過場景節點與外部資料的對應，三維模型不再只是單純的幾何外觀，而能連結至名稱、尺度說明與組裝階段等語意資訊，使網頁三維展示由靜態瀏覽提升為可查詢、可互動的知識呈現。在驗證案例中，四鋪作、五鋪作與六鋪作料拱模型可依各自的構件實例與組裝階段進行展示，使構件的重複出現、層級差異與組合順序能被系統呈現；宮殿模型與立面輔助線則將展示內容由單一構件延伸至整體比例與構件配置的觀察，顯示此展示架構可由局部構件擴展至完整場景。使用者回饋結果亦顯示，三維互動展示有助於觀察構件形體與組裝過程，構件資訊顯示與尺度標註能輔助使用者理解構件名稱與比例關係。整體而言，本系統可視為數位文化資產（digital heritage）網頁三維展示的一項實作案例，其貢獻在於整合 X3D 場景模型、構件語意資料與網頁互動功能，建立一套無需外掛、可於瀏覽器直接執行的三維展示流程；惟受限於模型資料完整度、構件標註仍需人工整理，以及比例輔助線主要作為視覺觀察工具，後續仍有擴充資料、自動化標註與智慧化識別的發展空間。

未來，研究可朝向構件資料擴充、自動化標註與智慧化輔助識別等方向延伸。現階段系統中的構件名稱、模型節點與組裝階段主要透過人工整理建立，未來可加入人工智慧輔助識別，協助判讀古建築圖樣、模型外形與構件位置，減少資料建置所需的人工作業。人工智慧輔助識別可先應用於構件分類與模型標註，例如利用影像辨識或三維模型特徵分析，協助判斷構件可能屬於樑料、散料、交互料、華拱、泥道拱或昂等

類型，再由研究者確認其名稱與位置；此流程可作為半自動標註工具，使古建築模型整理過程更有效率，也能降低不同模型之間命名不一致造成的整理負擔。此外，未來亦可擴充更多鋪作形式與建築構件資料，使展示系統由單一枋拱展示逐步發展為古建築構件數位資料庫；透過模型、構件名稱、尺度資料、組裝階段與說明文字的持續累積，系統可支援更多古建築案例之展示與比較，作為數位典藏的基礎。



附錄 A

A.1 知識測驗題目

知識測驗共七題，分為三類：料拱構件四題（Q1–Q4），分別測驗鋪作形式辨識、構件名稱辨識、構件接合關係判斷與材枋尺度查找，對應系統之鋪作切換、構件資訊顯示、散置組裝與尺度標註功能；宮殿大樣二題（Q5–Q6），分別測驗開間數量與開間尺寸之判讀，對應宮殿大樣模型；立面比例構圖一題（Q7），測驗宮殿大樣立面比例所符合之構圖關係，對應立面構成輔助線功能。

表 A.1: 知識測驗題目內容

編號	題目內容	對應展示模式
Q1	圖片中的料拱為幾鋪作	料拱構件
Q2	圖片中所指構件之正確名稱	料拱構件
Q3	與樑枋接合之構件，不可能為下列何者	料拱構件
Q4	一材枋和長為幾分	料拱構件
Q5	此宮殿大樣共有幾間	宮殿大樣
Q6	此宮殿大樣每間之長度為何	宮殿大樣
Q7	此宮殿大樣立面比例符合下列何種構圖關係	柱式尺度

A.2 系統評價問卷題目

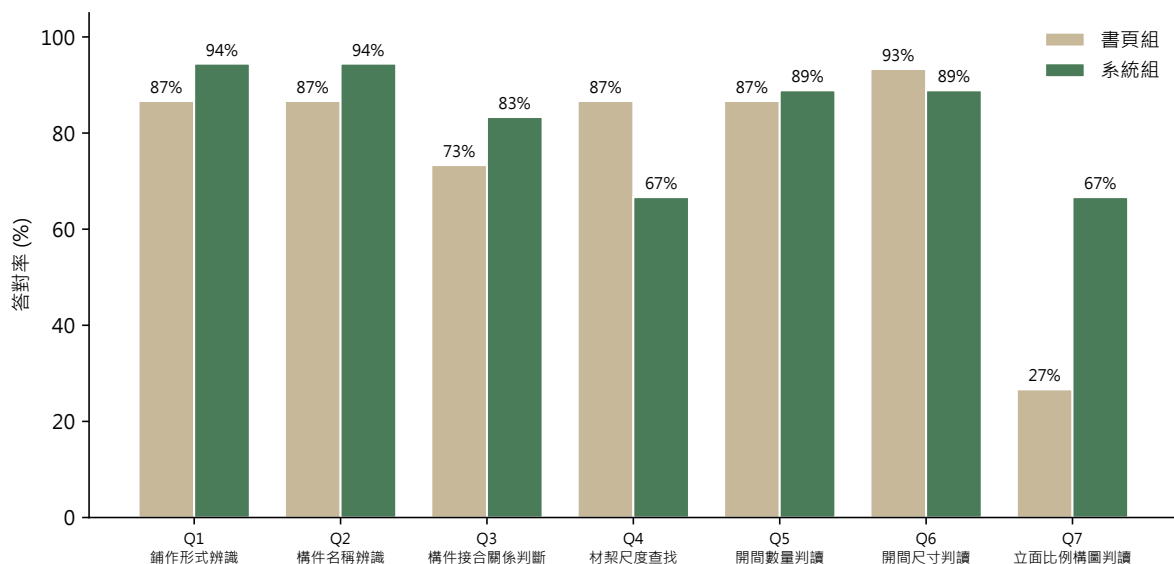
系統評價問卷共五題，量表題依序對應三種展示模式：組裝分解展示之理解幫助（料拱構件）、輔助線對立面比例理解之幫助（宮殿大樣），以及網頁整合三維模型與構件資料作為數位典藏方式之適切性。

表 A.2: 系統評價問卷題目內容

編號	題目內容	類型
Q1	組裝步驟的分解展示，有助於我理解料拱由各構件逐步組成的過程	五點量表
Q2	宮殿大樣中加入輔助線，能讓我更容易理解其立面比例的構成	五點量表
Q3	將料拱構件、構件名稱、尺度資訊與三維模型整合於網頁系統中，是一種適合保存、整理與展示構件資料的數位典藏方式	五點量表
Q4	功能列中，對認識料拱結構比例最有幫助的功能	複選題
Q5	對系統操作、展示內容或資料整理之改進建議	開放意見

A.3 逐題答對率

知識測驗之兩組逐題答對率如圖 A.1 所示。兩組答對題數之 Mann-Whitney U 檢定結果為書頁組 $Mdn = 6.0$ 、系統組 $Mdn = 6.5$ ， $U = 174.5$ ， $p = .140$ ，未達統計顯著。就個別題目而言，料拱構件題（Q1–Q4）中 Q3 之構件接合關係判斷為系統組較佳（書頁組 73%、系統組 83%），Q4 之材枋尺度查找則為書頁組較佳（書頁組 87%、系統組 67%），顯示書面表格於單純數值查找中仍具效率；宮殿大樣題（Q5–Q6）兩組表現相近（Q5 為 87% 與 89%、Q6 為 93% 與 89%），顯示此類自圖面直接計數與讀取之題型，兩種媒材皆可支援；立面比例構圖題（Q7）呈現最大差距（書頁組 27%、系統組 67%）。

圖 A.1: 書頁組與系統組之知識測驗逐題答對率（書頁組 $n = 15$ ，系統組 $n = 18$ ）

A.4 系統評價問卷統計

系統評價量表題之回答分布如圖 A.2 所示，三題均由全體受測者填答，平均皆達 3.8 分以上，其中組裝分解展示理解幫助評分最高（ $M = 4.27, SD = 1.01, \text{Mdn} = 5.0$ ），網頁整合數位典藏適切性次之（ $M = 4.03, SD = 0.95, \text{Mdn} = 4.0$ ），輔助線理解幫助評分相對較低且分布較為分散（ $M = 3.85, SD = 1.33, \text{Mdn} = 4.0$ ）。檢視功能複選題之勾選分布如圖 A.3 所示，受測者認為最有幫助之檢視功能為 XYZ 軸加切面（20 人，61%），其次為移動切面加隱藏（14 人，42%）。

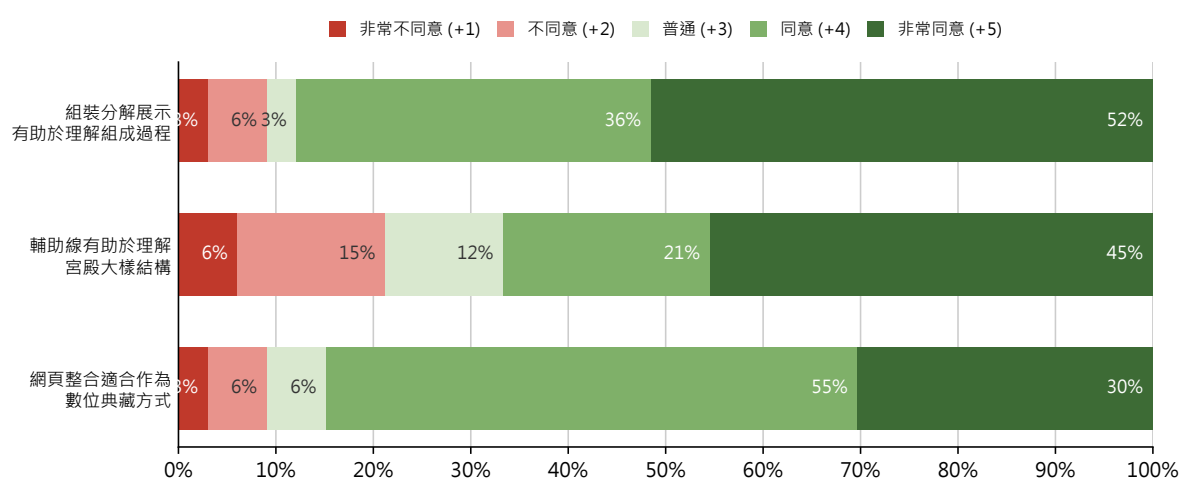


圖 A.2: 系統評價量表題之回答分布（ $N = 33$ ）

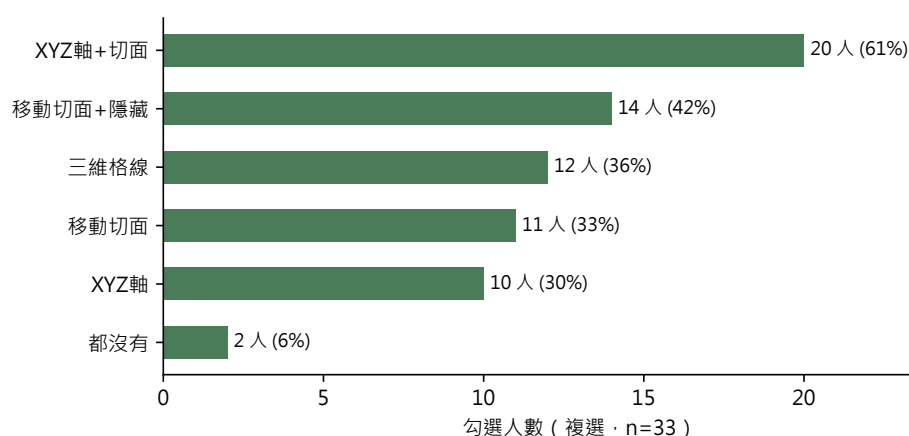


圖 A.3: 對認識料拱結構比例最有幫助之檢視功能勾選分布（複選， $N = 33$ ）

參 考 文 獻

- [1] T.J. Hsieh. 營造法式及營造法式註釋. <https://tjhsieh.github.io/yingzaofashi/>, 2015. 擷取日期：2026/7/1.
- [2] Luca Chittaro and Roberto Ranon. Web3D technologies in learning, education and training: Motivations, issues, opportunities. *Computers & Education*, 49(1):3–18, 2007.
- [3] Nigel W. John. The impact of Web3D technologies on medical education and training. *Computers & Education*, 49(1):19–31, 2007.
- [4] Lucio Ieronutti and Luca Chittaro. Employing virtual humans for education and training in X3D/VRML worlds. *Computers & Education*, 49(1):93–109, 2007.
- [5] Steven Birr, Jeanette Mönch, Dirk Sommerfeld, Uta Preim, and Bernhard Preim. The liveranatomyexplorer: A webgl-based surgical teaching tool. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 33(5):48–58, September 2013.
- [6] Alun Evans, Marco Romeo, Arash Bahrehmand, Javi Agenjo, and Josep Blat. 3D graphics on the web: A survey. *Computers & Graphics*, 41:43–61, 2014.
- [7] Marco Potenziani, Marco Callieri, Matteo Dellepiane, and Roberto Scopigno. Publishing and consuming 3D content on the web: A survey. *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, 10(4):244–333, 2018.
- [8] ISO/IEC. ISO/IEC 19775-1:2013 — extensible 3D (X3D) — part 1: Architecture and base components. International standard, International Organization for Standardization, 2013.

- [9] Don Brutzman and Leonard Daly. *X3D: Extensible 3D Graphics for Web Authors*. Morgan Kaufmann, San Francisco, CA, 2007.
- [10] Johannes Behr, Peter Eschler, Yvonne Jung, and Michael Zöllner. X3DOM: A DOM-based HTML5/X3D integration model. In *Proceedings of the 14th International Conference on 3D Web Technology (Web3D '09)*, pages 127–135, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [11] Jun Liu, Wenzhen Su, and Yu Sun. 3D model semantic automatic annotation based on X3D scene. In *2013 International Conference on Computational and Information Sciences*, pages 282–285. IEEE, 2013.
- [12] Werner Schweibenz. The “virtual museum”: New perspectives for museums to present objects and information using the internet as a knowledge base and communication system. In Harald H. Zimmermann and Volker Schramm, editors, *Knowledge Management und Kommunikationssysteme, Workflow Management, Multimedia, Knowledge Transfer: Proceedings of the 6th International Symposium for Information Science (ISI 1998)*, pages 185–200, Prague, Czech Republic, 1998. UVK Verlagsgesellschaft, Konstanz.
- [13] Styliani Sylaiou, Fotis Liarokapis, Kostas Kotsakis, and Petros Patias. Virtual museums, a survey and some issues for consideration. *Journal of Cultural Heritage*, 10(4):520–528, 2009.
- [14] Marco Potenziani, Marco Callieri, Matteo Corsini, Federico Ponchio, and Roberto Scopigno. 3DHOP: 3D heritage online presenter. *Computers & Graphics*, 52:129–141, 2015.
- [15] Chunlai Chai. X3D experiences on a hydro junction digital: A case study of Three Gorges Dam. In *2009 IEEE 10th International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design*, pages 1845–1849. IEEE, 2009.
- [16] Chunlai Chai. X3D-based virtual reality experiences in water museum exhibitions. In *2009 International Conference on Signal Processing Systems*, pages 606–609. IEEE, 2009.

- [17] Antonio Baglivo, Francesca Delli Ponti, Daniele De Luca, Antonella Guidazzoli, Maria Chiara Liguori, and Bruno Fanini. X3D/X3DOM, Blender game engine and OSG4WEB: Open source visualisation for cultural heritage environments. In *2013 Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*, pages 711–718. IEEE, 2013.
- [18] 李誠. 營造法式. 1103. 北宋官方建築典籍.
- [19] 梁思成. 營造法式註釋. 中國建築工業出版社, 北京, 1983.
- [20] 陳明達. 營造法式大木作制度研究. 文物出版社, 北京, 1993.
- [21] 潘谷西 and 何建中. 《營造法式》解讀. 東南大學出版社, 南京, 2005.
- [22] 朱永春 and 林琳. 《營造法式》模度體系及隱性模度. *建筑学报*, (4):35–37, 2015.
- [23] 喻夢哲 and 惠盛健. 論《營造法式》開間、柱高的取值比例及其形式關聯. *建筑史學刊*, 5(1):121–135, 2024.
- [24] 吳國源, 侯梅, and 李陸斌. 《營造法式》大木作“縫”內涵考釋(一): 綜述與文本. *建筑史學刊*, 5(2):18–27, 2024.
- [25] 吳國源, 侯梅, and 李陸斌. 《營造法式》大木作“縫”內涵考釋(二): 圖名與圖樣. *建筑史學刊*, 5(3):63–73, 2024.
- [26] Andrew I-Kang Li. *A Shape Grammar for Teaching the Architectural Style of the Yingzao Fashi*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 2001.
- [27] 黃瑞菘. 以形狀文法建構宋式科拱系統. Master’s thesis, 國立雲林科技大學空間設計研究所, 雲林, 2002.
- [28] 高小倩. 中國古代「宮室殿堂」空間文法建構之研究: 以宋代《營造法式》為例. Master’s thesis, 國立雲林科技大學空間設計研究所, 雲林, 2002.
- [29] Fei Hou, Yue Qi, and Hong Qin. Drawing-based procedural modeling of chinese architectures. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 18(1):30–42, 2012.

- [30] Bilal Succar. Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. *Automation in Construction*, 18(3):357–375, 2009.
- [31] Maurice Murphy, Eugene McGovern, and Sara Pavia. Historic building information modelling: Adding intelligence to laser and image based surveys of european classical architecture. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 76:89–102, 2013.
- [32] Facundo José López, Pedro M. Leronés, José Llamas, Jaime Gómez-García-Bermejo, and Eduardo Zalama. A review of heritage building information modeling (h-bim). *Multimodal Technologies and Interaction*, 2(2), 2018.
- [33] Sumeyye Sena Bastem and Asli Cekmis. Development of historic building information modelling: A systematic literature review. *Building Research & Information*, 50(5):527–558, 2022.
- [34] 溫國忠. 空間語意規則應用於宋營造法式科拱鋪作 BIM 參數化自動建模之研究. *建築學報*, (132):109–134, June 2025.

