

第三章 設計接頭和製造流程

在文獻所分析自由形體的實際案例和研究中，得知建築師如何運用 CAD/CAM 的輔助來使複雜的工程可以順利進行，其中最成功的案例為建築師 Frank Gehry 充份的應用 CAD/CAM 技術，並且成功的建立一套數位設計的流程來提升建造的效率和節省工程費用。本研究從案例中歸納出 CAD/CAM 技術影響自由形體在結構系統、細部接頭和工程材料的因子，並且統整這些因子初步建立數位製造流程的架構(圖 27)。

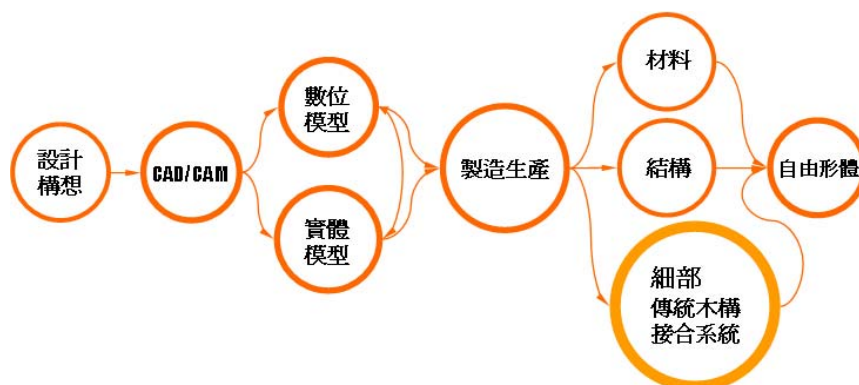


圖 27. 數位製造流程的架構

本章專注在接頭設計和設計與原型流程的探究，在 CAD/CAM 技術的輔助下結合傳統木構接合系統發展適用於自由形體組裝的接頭。接頭設計主要有三個關鍵步驟為分析木構接合系統、設計組裝以及測試組裝，從這過程中建立設計接頭原型的流程，使這接頭設計的過程系統化，並且在 RP 技術的輔助下可以反覆的製造生產實體模型來檢視和修改接頭設計，提高接頭應用在自由形體組裝的可行性。

3.1 分析木構接合系統

傳統木構接合規則在結合 CAD/CAM 系統的輔助下，突破了傳統木構造礙於在工具上的限制，而可能發展別於水平垂直向度的建造。數位技術的輔助下傳統木構的限制不再是問題，組裝時不需要再考慮角度上的限制，我們可以透過 CAD/CAM 精確輸出實體模型，並且開始思考新的組裝方式，到更具挑戰性的自由形體組構。在開始設計接頭前，我們提出三個傳統木構接頭原有的特點，作為接頭設計的宗旨，特點如下：

- (a) 組裝時，不使用任何的五金鐵件以及膠合物。
- (b) 組裝後，形體的外觀保持完整無突出的異物。
- (c) 組裝後接合處即可固定。

在特點的設定下，使設計接頭的過程可以有著清楚的方向，並排除部分傳統接頭的類型。因此，本研究決定發展傳統木構接頭中的卯榫、楔形榫頭、搭接和對接，主要這四類接頭深具

木構接合的純粹特質，且簡易的接合法卻各具獨特的功能性。在 3D CAD 環境採用工業設計軟體 Maya 作為平台，Maya 在曲線及曲面的建模已具備完善的功能，可適用於自由形體及細部接頭的設計。RP 裝置將提供數位模型轉換成實體模型的媒介，並將實體模型進行組裝測試(圖 28)。

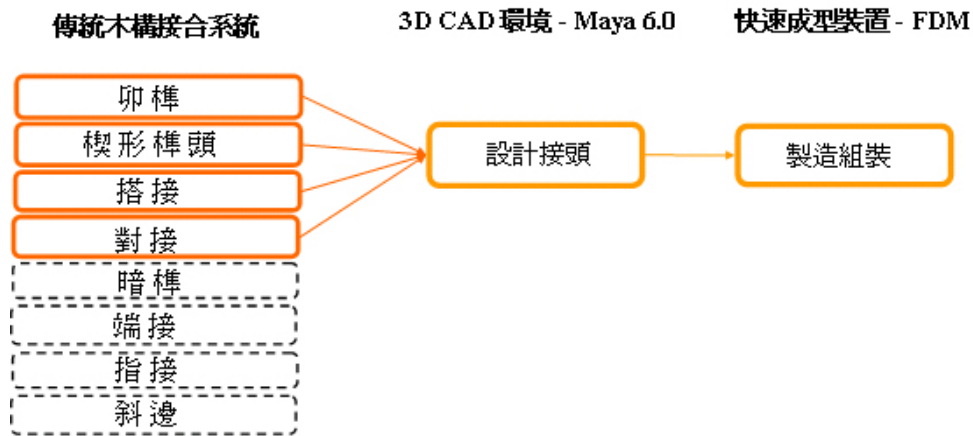


圖 28. 設計接頭組裝架構

本章在接頭上的發展目的在提供給自由型體建造時所需要的組裝方法，接合的形式可以分成為接點接頭(Point Joint)和接縫接頭(Edge Joint)兩個基本的原型(圖 29)。

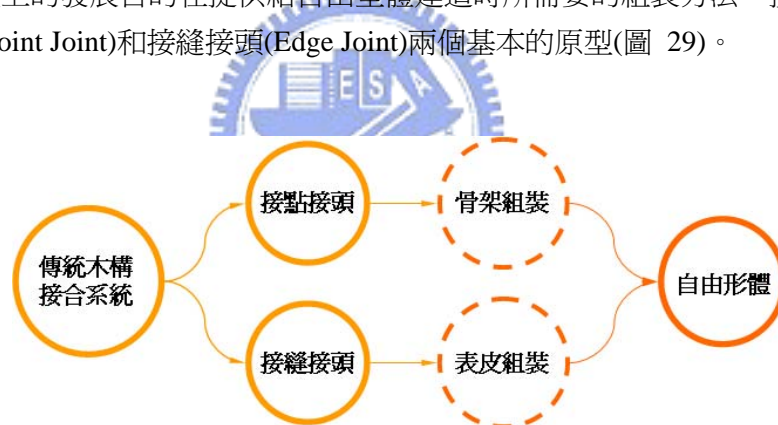


圖 29. 接頭後續發展流程圖

3.2 接頭設計與原型流程

此流程闡明如何在數位化環境下，接頭從設計構想直到原型(prototyping)之間所應具備的條件，逐步的探討 CAD 和 CAM 媒材轉換的過程，以及在細節應注意事項，使得研究所發展的接頭可以順利生產來進行組裝的測試(圖 30)。透過流程的操作來檢驗發展出的接頭和討論接頭在組裝上的優、缺點，此外，從記錄實做的過程來說明 CAD/CAM 媒材如何應用於流程中，且列出實做過程所遭遇的問題和提供可能解決的方法，給於後續研究可以有個參考的依據。

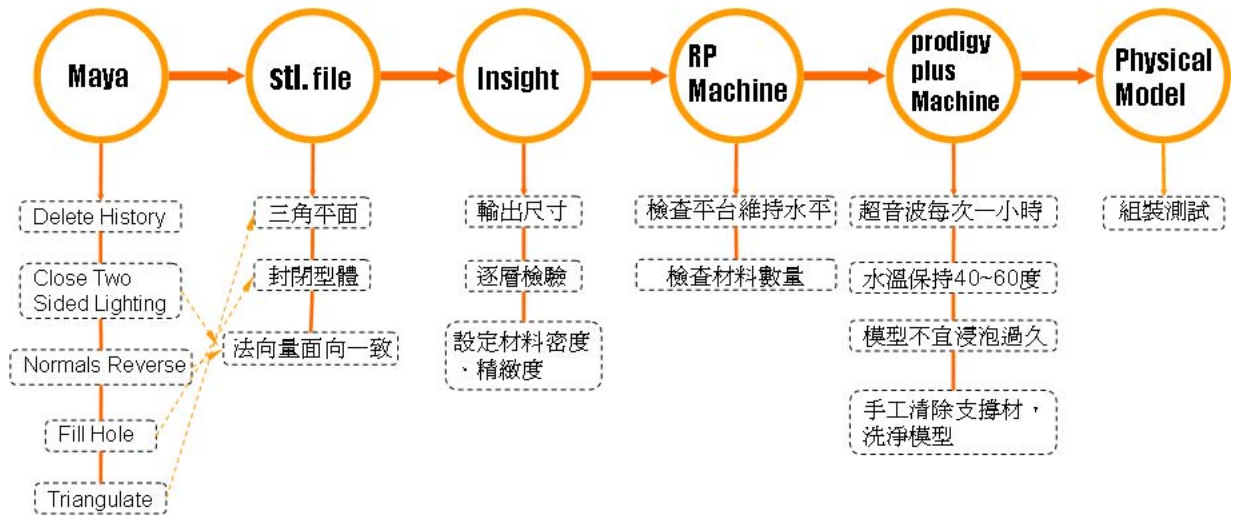


圖 30. 接頭設計製作流程

CAD :

Maya - 本篇以 3D 軟體 Maya6.0 作為在 CAD 環境的主要平台，在 Maya 提供了虛擬建造模型的操作形式，設計者可以隨意的在 Maya 內進行旋轉、位移、縮放等功能以及即時的修改、調整模型的形體。模型設計完成後，需將數位模型輸出 stl 檔案格式至 Insight 軟體，Insight 將提供 3D 資料於 RP 裝置來製作實體模型，但在輸出 stl 檔案前，Maya 需操作幾個重要的程序使得 stl 檔案可以精確的輸出，避免模型破面的錯誤產生，程序如下：

- (a) 關閉雙面光源(Close Two Sided Lighting) – 此功能位置是在視窗內 Lighting/ Two Sided Lighting，取消預設的勾選即可執行，其目的是在使模型的法向量可以因為預設光源的關閉使其與法向量相同的面會顯示為亮面，而逆向法向量的面則會顯示成暗面。
- (b) 反轉法向量(Normals Reverse) – 此功能的位置是在 Edit Polygons/ Normals/ Reverse，將預設的模式改為 Reverse，此功能將逆向的法向面反轉為正向的法向量，其目的在使 Maya 在輸出 stl 檔案時不會因模型法向量的不同而造成運算錯誤，產生模型破損。
- (c) 封閉缺口(Fill Hole) – 此功能位置是在 Edit Polygons/ Fill Hole，封閉的形體是 stl 檔案格式必要的條件之一，如何預先檢查模型是為封閉可以透過開啓 Display/ Polygon Components/ Border Edges，執行此功能後若是模型有未封閉的缺口其邊緣線將會顯示較為粗，封閉缺口的的方法可以選取該線條上兩端的點，分別針對該點執行 Edit Polygons/ Merge Vertex，執行完成後該線條會恢復成預設的厚度，為了避免還是有未封閉的曲面可以執行 Fill Hole 此功能將會直接封閉所選取的模型，但是要注意模型的分佈線，基本上多邊體的模型(Polygon Model)是由基本的三角形或者是四邊形所形成，所以模型上若是有多出四邊體的面會造成形體不完整，Maya 計算上會產生錯誤造成形體破裂。

- (d) 三角化(Triangulate) - 此功能位置是在 Polygons/ Triangulate，執行此功能使模型的分佈線以三角形所構成，目的因 stl 檔案的模型面是以三角形為基本單元，所以在模型輸出 stl 檔案前須將模型三角化。
- (e) 刪除歷史紀錄>Delete History) -此功能位置是在 Edit/ Delete by Type/ History，執行此功能主要在減少模型輸出 stl 檔案時，減少模型所夾帶的資料量，讓模型在不受其它的功能所遺留的紀錄影響下順利輸出。

Insight – Insight 軟體是在提供 CAD 和 CAM 之間資料轉換的平台，從讀入 Maya 所輸出的 stl 檔案，經過計算模型的尺寸、材料和輸出的精密度再交由 RP 裝置輸出成實體模型。本研究將透過 Insight 軟體的使用程序如下：

- (a) 單位和大小(Units and scale) – 首先開啓 stl 檔案，在 STL/ Units and scale 設定模型的單位，Insight 主要提供兩種單位，各為英吋(Inches)和公釐(Millimeters)在製做實體模型前，必須在此將數位模型調整為使用者所設定的單位，就以 Maya 而言其預設的單位為英吋，所以設計接頭同時必須針對本身設定的單位有所認知，並且在 Insight 調整為相同的單位，才能輸出正確比例的實體模型 Insight 也提供大小的修改，可以不用透過 Maya 就可以輸出不同比例的實體模型。
- (b) 模型設定(Modelers Setup) – 這步驟主要有幾重要的設定，選定輸出的模式為實體(Solid)或者是空心(Sparse)，在此都採用空心模式，因實體或者是空心模型皆不影響本研究所探討的細部接頭的議題；接著設定模型輸出的精密度，Insight 提供一般(Normal rasters)和較佳(Fine rasters)兩種設定模式，因接頭接合需要相當的精確度所以在此皆選用較佳模式來輸出實體模型；斷面分割高度(Slice height)此數值的設定是用於決定 RP 裝置的噴頭在噴射材料描繪每個斷面的輪廓，以此斷面分割高度來設定描繪的次數，本研究採用斷面高度在 0.01mm 的數值就描繪輪廓一次來提高模型的強度和精密度。
- (c) 工作路徑(Toolpaths) – 此步驟可以設定模型輪廓線的寬度和依模型的厚度來設定噴頭的工作路徑，在此為了補強模型採用空心模式讓實體模型可以更堅固。在 Insight 設定模型的輪廓線較為寬和搭配增加噴射材料描繪形體輪廓次數，即可增加模型的強度，假如設定模型輪廓線的厚度為 2mm 和厚度在每 0.02mm 時就會噴頭就會描繪模型輪廓一次，因此噴頭就會描繪模型一百次。
- (d) 計算材料 – 在完成上述三點的設定，接著就是進行材料的計算，過程可以分成計算模型邊緣的輪廓(圖 31)、計算支撐材的設置(圖 32)以及計算工作路徑的設置(圖 33)，而在計算模型邊緣輪廓時，若是 stl 的模型有破面時 Insight 會提出警告，並提供破損的面的位置，所以可以依其指示回到 Maya 內進行檢查和修正，再重新輸出 stl 到 Insight 進

行設定，計算過程無誤之後，可以使用鍵盤上的 PgUp 和 PgOn 逐層檢查斷面是否封口(圖 34)和輸出材料分佈的狀況(圖 35)，完成檢查後就可以將模型資料輸出到 RP 裝置來製作實體模型。

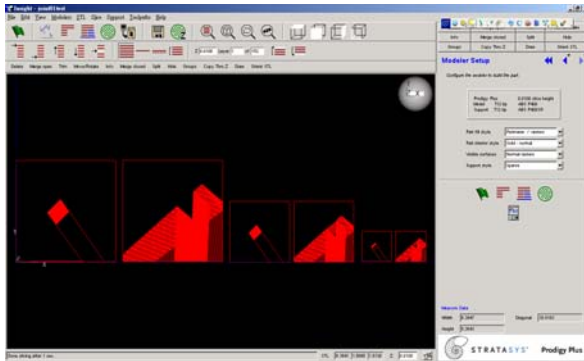


圖 31. 計算模型邊緣的輪廓

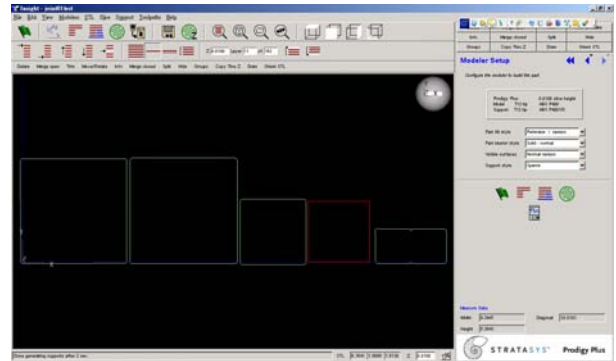


圖 32. 計算支撐材的設置

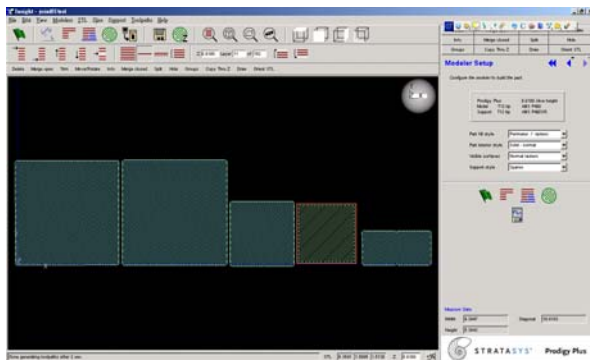


圖 33. 計算工作路徑的設置

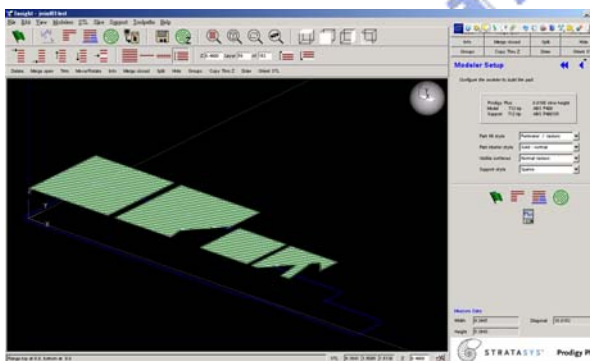


圖 34. 檢查逐層封口是否封閉

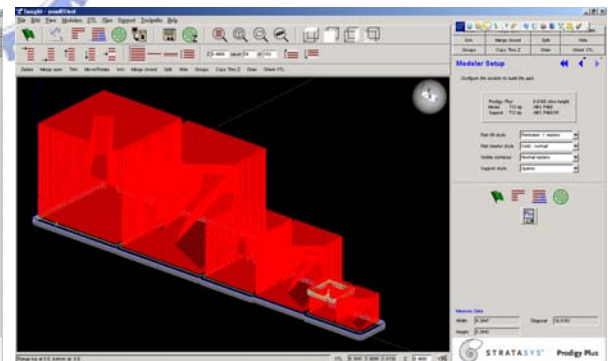


圖 35. 檢查支撐材分配狀況

CAM :

快速成型裝置 – 本研究所使用的 RP 裝置(圖 36)為熔解沈積法(Fused Deposition Modeling, FDM)，在接收完成 Insight 軟體計算出模型的每成層斷面後，以 2D 成形的方式，一層一層的堆疊模型斷面，堆積成實體的 3D 模型。



廠牌：STRATASYS
型號：Prodigy Plus
最大輸出尺寸：8 x 8 x 12 inch
(203 x 203 x 305 mm)
噴頭射出材料最薄厚度：0.5mm
模型材：ABS 塑膠
支撐材：WaterWorks 水溶性支撐材

圖 36. RP 裝置規格

當 RP 裝置準備進行製作模型前，需要置入平台使材料可以依此來堆疊模型，在放置的過程中必須確定平台是水平的擺設，若是有些微不準確可能造成 RP 裝置的噴頭校位錯誤，導致模型無法成形，另外在實體模型輸出的過程中可以透過 Insight 連結網路，查看模型輸出的進度以及材料的耗損，減少非必要的人力和時間，來增加工作的效率。

超音波清淨機 – 在 RP 裝置所輸出的實體模型會有兩種材質的存在，其為模型材和支撐材，模型材是主要的本體，而支撐材是在 RP 製作的過程用來穩固模型材的支架，超音波清淨機(圖 37)的功能就是運用超音波以每秒上萬次的在液體中傳導，其推動介質的作用使液體分子間產生無數細微的小真空氣泡，造成空穴效應(cavitation)，真空氣泡受壓後爆破時，會產生強大的衝擊力以及加入溶解劑製造化學溶解的原理清除支撐材，得到完整的模型本體。完成清潔之後，就可以將模型組裝成形。



廠牌：LEO
型號：LEO-1502 數位式
洗淨功率: 150W
時間控制: 1~99 MIN. (觸控控制)
溫度控制: 室溫~99 °C (觸控控制)
內槽尺寸: 295x150x100 mm
外槽尺寸: 320x175x240 mm

圖 37. 超音波清淨機規格

超音波清淨機在設定的過程中需注意以下所述，水槽內的液位保持在 7~8 分滿；施作超音波震動時以每次一小時，每次間隔 15 分鐘來維護機器使用壽命。溫度的設定上若是溫度過高或者浸泡時間過久會造成模型軟化變形，所以在設定上以 70°C 為上限，建議依模型浸泡的時間來調整水溫一般宜保持在 40~60°C 之間。

3.3 設計組裝

接頭設計是根據傳統木構接合系統中的卯榫、楔形榫頭、搭接和對接這四種接頭的功能下去發展，在 Maya 內進行接頭設計，以這四類接頭功能作為基本的設計元素，在符合自訂的規則下發展適用於自由形體骨架組裝和表皮組裝的接頭。依照上階段所設定的設計接頭的製作流程，從設計組裝到組裝測試以及最後的實體組裝，確實的落實該流程來檢驗接頭的可行性。

3.3.1 接點接頭

接點接頭在研究上主要的目的是應用在自由形體的骨架的接合組裝上，設計構想是當骨架在接合時兩者之間的角度呈現非垂直水平的構築，而是可以在三度空間中以不同角度和方向相互交接，相對的此接合的方式，可在構築複雜的自由形體時，提供更多彈性來組裝結構。接頭的設計上主要可以分成四個步驟如下所述：

- (1) 定義欲結合的接頭構法和進行草圖的設計。
- (2) 設定接頭組裝的角度和方向。
- (3) 製作接頭的接合方式。
- (4) 設計接頭的問題和解決的方法。



步驟一：

本研究初期的發展了兩個接點接頭的原型，類型一，接頭的設計主要結合傳統木構系統中的卯榫和對接，卯榫在傳統木構中扮演著相當重要的角色因其接合的形式非常的簡易，只要構造上有一端凸(榫)另一端就相對應製作一個凹(卯)槽，就可將構造緊密的接合，對接的接合形式與卯榫相近，較為不同之處為對接在凸處的製作上是使用長條狀的接頭來固定相接的表面，再透過結合這兩者的屬性來發展接頭的形式。類型二，此接頭主要是延續類型一的結合形式，類型一的接頭在接合時可以依接頭的兩個軸向進行組裝，類型二再增加楔形榫頭的功能其目的在強化接合後的強度，另一方面，在限制接合的軸向來防止接頭脫落來達到更穩固的接頭形式。在使用手繪草圖初步發想可能的接頭形式(圖 38)，但是本研究的接頭為三度空間的構造，2D 草圖對於本研究接頭設計輔助有限，因此設計接頭過程會以 Maya 為主。

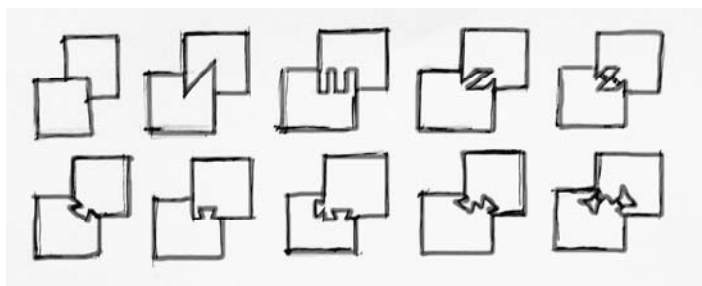


圖 38. 接點接頭設計草圖

步驟二：

在個步驟中主要在設定接頭的角度和方向，研究中發現接頭接合的角度和交會的深度會影響著接頭的形式(圖 39)。接頭以不同的角度接合時，相對的就會產生不同形狀的接合面，在設計接頭過程中必須考慮最佳的接合面來設置接頭，並且須注意到接頭設置後的軸向，使其另一端的接頭可以順應軸向來組裝；另一方面，在接頭的接合面深度若是較為充足時，在組裝後可以較為穩固，接合面如果比較淺時，接頭的設計就必需更改於適用此狀況接合構法，例如可以增加楔形樁頭來強化接頭的穩定度。

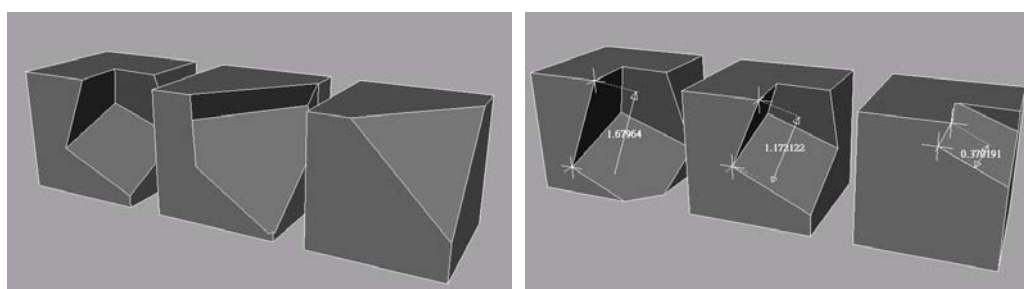


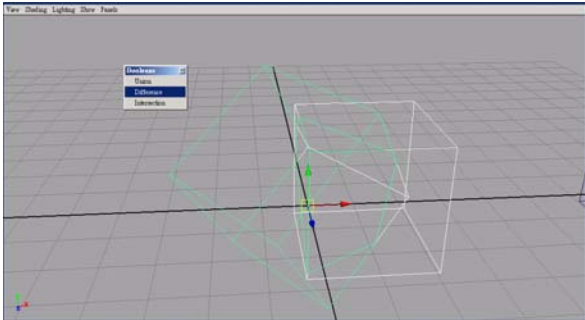
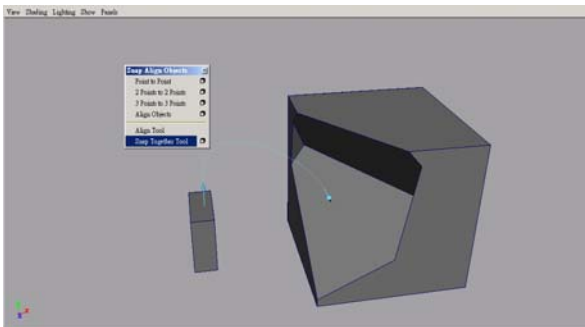
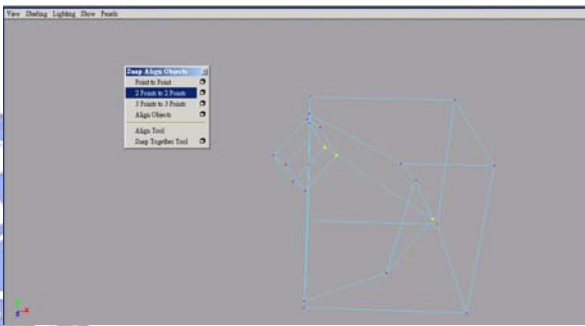
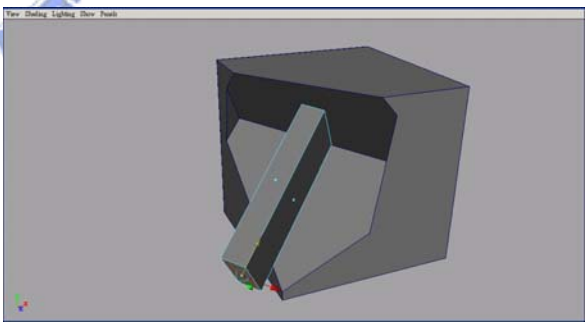
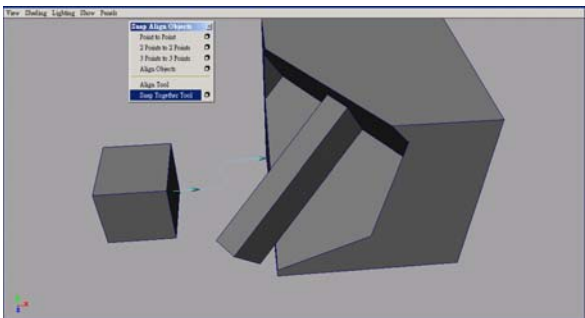
圖 39. 接點接頭 – 角度與深度

步驟三：

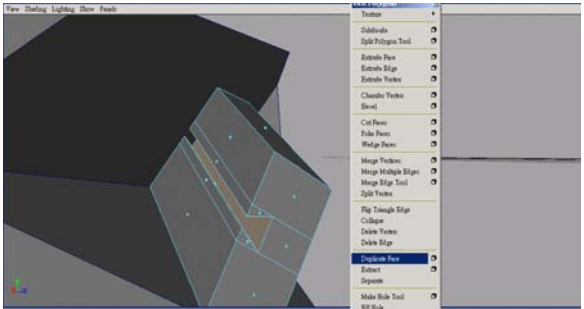
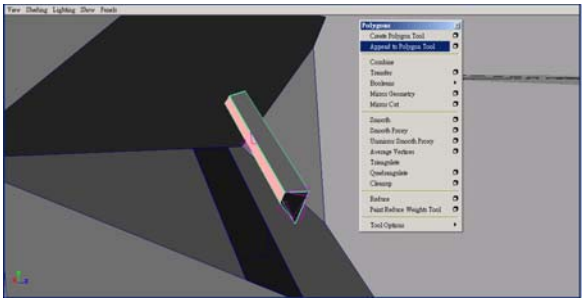
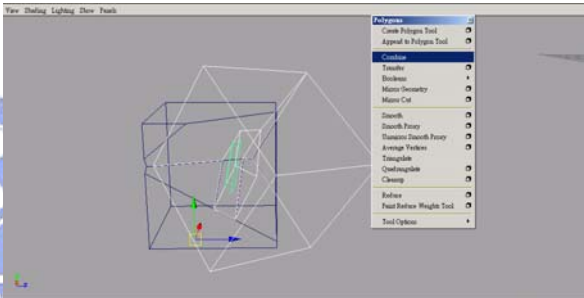
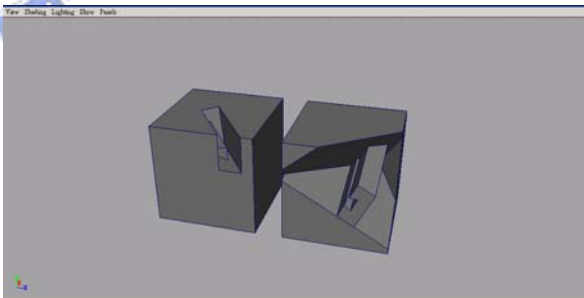
此步驟將以圖示來說明本研究在 Maya 上如何逐步進行接點接頭設計的過程，範例以簡單的立方體造型為單元，目的在使設計的過程可以專注在接頭的呈現，並且提供 Maya 製做接頭過程的操作指令，討論設計過程中指令功能上發生的問題，針對問題本研究如何運用其它指令來克服和解決問題的產生。

設計接點接頭的過程如下所述(表 2)：

類型一：接點接頭	
說明	圖示
<p>創造一個基本的立方體(a)單元，複製立方體 (b)移動至適當的接合位置，調整立方體(b)兩者之間接合的角度和深度。</p>	

<p>再複製一次立方體(b)，選取立方體(a)差集(Difference)立方體(b)，即產生立方體 a 與 b 的接合面，並且以指令 Ctrl + h 影藏立方體(b)，以便接續的作業。</p>	
<p>創造一個基本的接頭單元，使用 Maya 對齊指令 Snap Together Tool 將接頭單元對齊至接合面。</p>	
<p>選取接頭單元的兩個頂點(vertex)再加選接合面的兩個頂點，使用指令 2 Points to 2 Points 將接頭對齊至接合面的上端。</p>	
<p>調整接頭單元的位置和延伸接頭單元的長度使其超出接合面的範圍。</p>	
<p>創造一個立方體(c)使用指令 Snap Together Tool 使其對齊至立方體(a)的左側，並且利用立方體(c)布林多出的接合面的接頭單元。</p>	

<p>在 Outliner 下選取立方體(b)以快速鍵 H 取消影藏，選取接頭單元複製(Duplicate)該單元。</p>	
<p>選取立方體(b)以布林指令差集(Difference)接頭單元。</p>	
<p>分離立方體(a)和立方體(b)，完成接頭設計類型一。</p>	
<p>類型二：接點接頭</p>	
<p>使用指令 Split Polygon Tool 劃分接頭單元，分割出楔形樺頭的輪廓。</p>	
<p>接頭單元完成楔形樺頭分割後將其面刪除，在使用指令 Append to Polygon Tool 填補挖空的面。</p>	

<p>選取接頭單元將其楔形樁頭的面使用指令 Duplicate Face 複製楔形樁頭。</p>	
<p>隱藏接頭單元(Ctrl + h)，選取楔形樁頭使用指令 Reverse 反轉其法向量(Normals)，再使用指令 Append to Polygon Tool 填補楔形樁頭的面。</p>	
<p>開啓隱藏的立方體(b)，使用指令 Combine 將立方體(b)與楔形樁頭結合為一體。</p>	
<p>分離立方體(a)和立方體(b)，開啓隱藏的接頭單元，完成接頭設計類型二。</p>	

本研究透過 Maya 進行接頭設計過程，初期完成了兩個接點接頭的原型(圖 40)。類型一，接頭的設計主要結合卯樁和對接；類型二，接頭的設計主要結合卯樁和楔形樁頭。

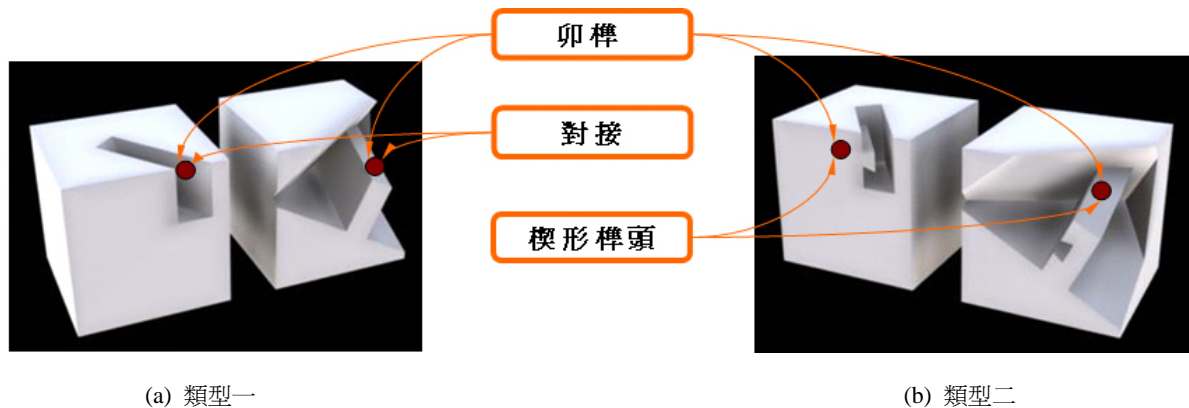


圖 40. 接點接頭

步驟四：

本階段進行接點接頭的設計，從概念的思考直到操作 Maya 測試可能發展接點接頭的建模過程，從不斷的嘗試中來解決 Maya 軟體上的不足，直到發展出可以準確的建造接點接頭的數位模型，並以逐步的方式配合圖說來描述設計接頭的方法。下列兩點說明 Maya 在設計接點接頭時常見的問題以及本研究使用解決的方法：

- (a) 布林(Booleans) – Maya 在進行布林運算若是在處理複雜形體時，常會有錯誤的發生，常見的現象例如為當兩個模型要進行布林時，按下指令後模型立即消失，而無法使用該指令，可能造成的原因在於複雜的模型被設計者多次的編輯形體後，產生大量的模型參數數值和電腦自動保留模型的歷史紀錄檔，造成 Maya 的布林在計算上無法負擔產生錯誤，當無法進行布林時，本研究採取指令 Duplicate Face 將模型所需要布林的面複製再進行調整，但是所需的時間就相對的增加。另外還有一種常見在布林上問題，則是當兩個模型要進行布林時其兩者的法向量方向不同，此時可能會造成原本是使用差集卻是變成聯集而聯集變成差集的指令錯誤發生，面臨此狀況時可以使用 Reverse 指令將法向量朝模型內側的反轉成朝向外側，此時布林功能就會正常。
- (b) Local Tool – 在 Maya 設計相交接頭的數位模型時，為了調整接頭的形體和設計接合的方法需要不斷的編修數位模型的點、線、面，因此模型的座標(X,Y,Z)方向在反覆的調整模型下造成方向錯亂，本研究採用 Maya 外掛程式 LocalTool 來解決此問題，LocalTool 提供依照所選取的點、線、面的法向量重新設定座標的方向，使數位模型在製作時得以依接頭軸向調整座標的位置和朝向。

3.3.2 接縫接頭

現今的自由形體在造形上的表現日趨的複雜，曲度複雜的自由形體甚至是每個曲面的角度皆不相同，接縫接頭在研究上主要的目的是應用在自由形體的表皮接合組裝上，設計構想是

當表皮在接合時兩者之間可以在不同在曲度的狀態下依舊可以接合，因此接縫接頭構築的方式提供給自由形體在面臨大幅變化的曲面時建造組裝的方法。本階段在接頭的設計上主要可以分成三個步驟如下所述：

- (1) 定義欲結合的接頭構法和進行草圖的設計。
- (2) 製作接頭的接合方式。
- (3) 設計接頭的問題和解決的方法。

步驟一：

本研究初期的發展了兩個接縫接頭的原型，類型一，接頭的設計主要結合傳統木構系統中的楔形榫頭和卯榫，楔形榫頭在此扮演著主要的腳色，連續不斷的楔形榫頭依附在接合表面上強化了整個構造系統，再加上卯榫技法隱藏在接合處，有如無形的力量將構造緊密的接合。類型二，接頭的設計主要結合傳統木構系統中的搭接和對接，將接合面附貼上連續的搭接技法，搭接的技法即是將接合面分割成兩體，並在搭接技法的尾端加入對接技法，使其被分成兩體的接合面尾端一邊朝上一邊朝下相互嵌入兩體內部，穩固了整體的構造使其緊密的結合整體表面的結構。以下為設計初期的發想草圖(圖 41)：

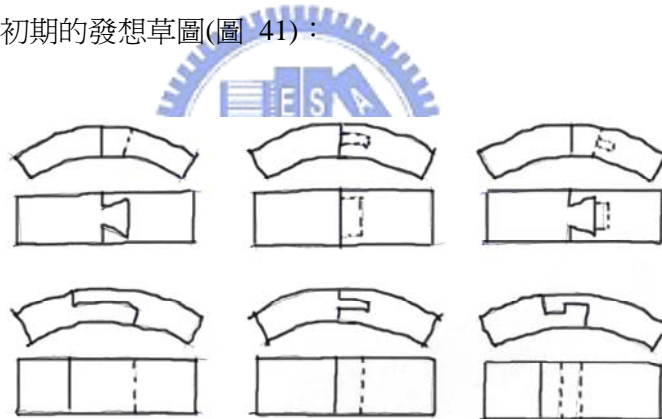
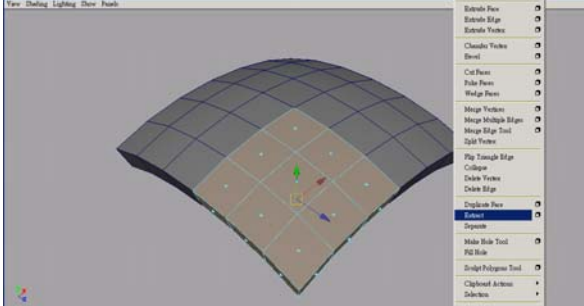
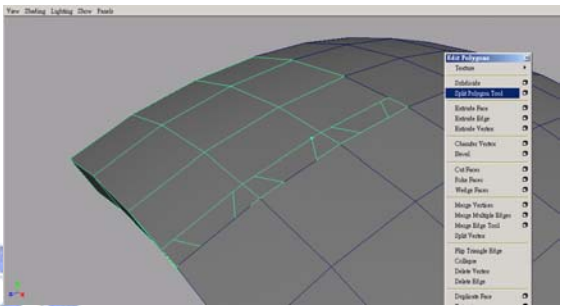
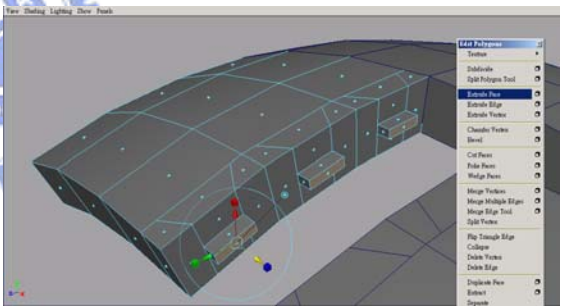
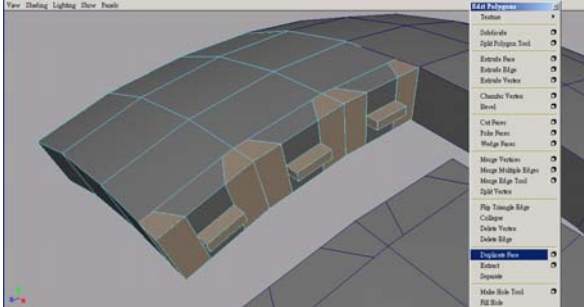


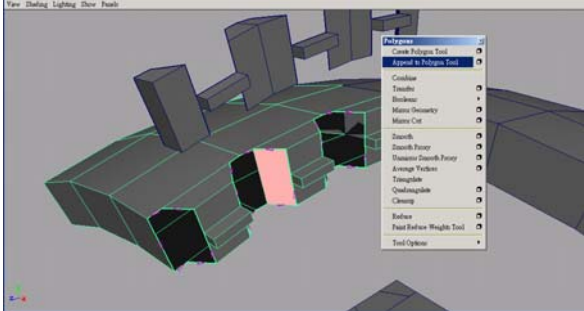
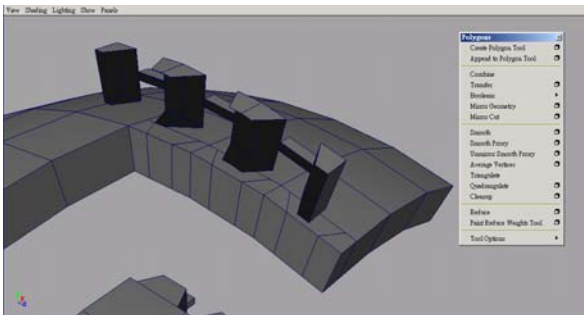
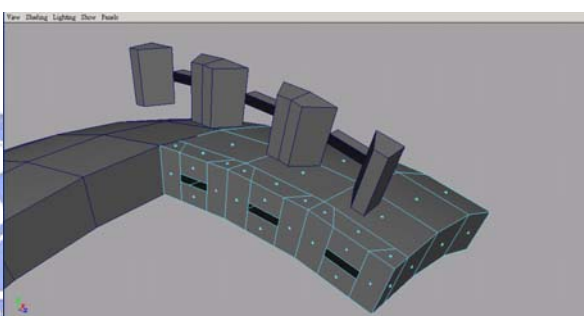
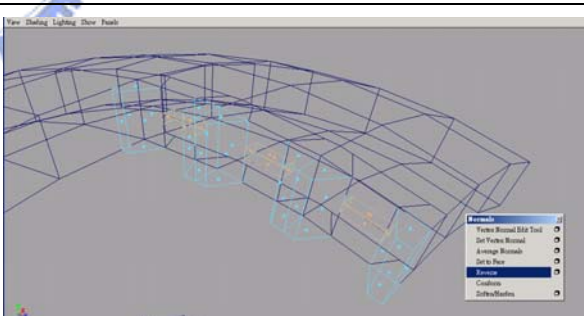
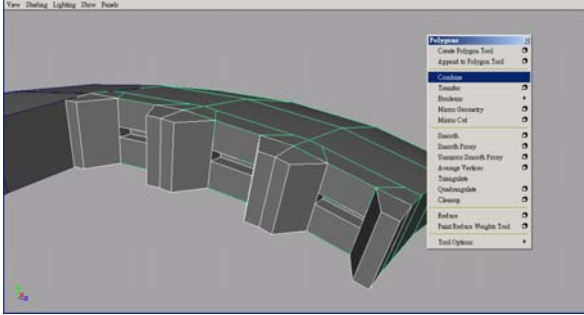
圖 41. 接縫接頭設計草圖

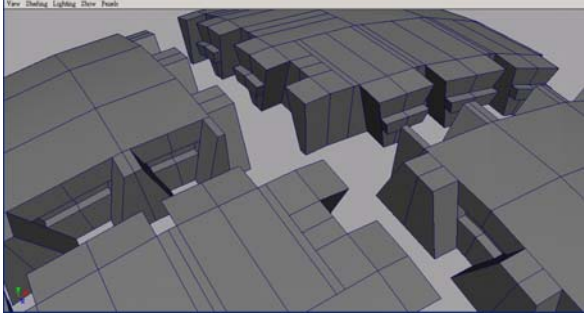
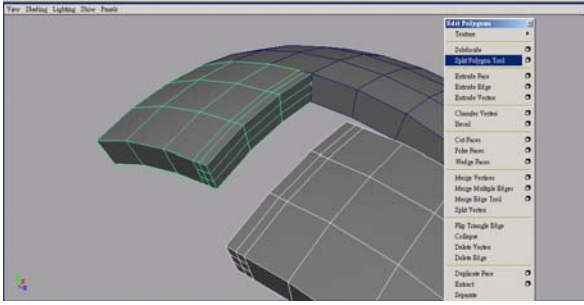
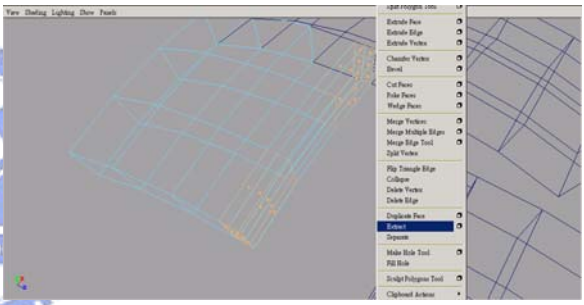
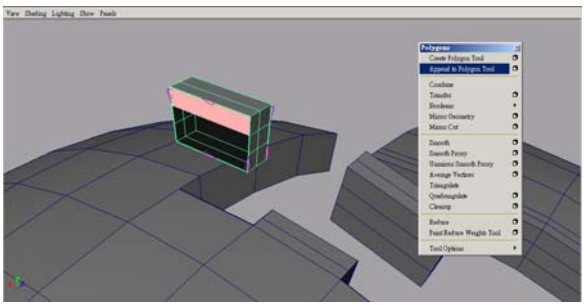
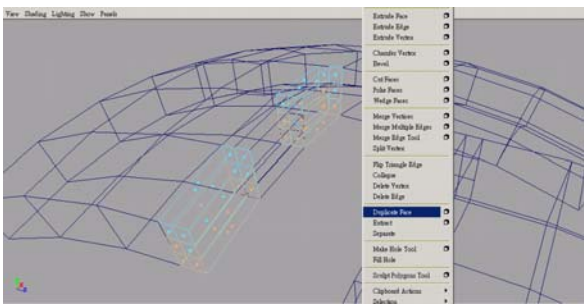
步驟二：

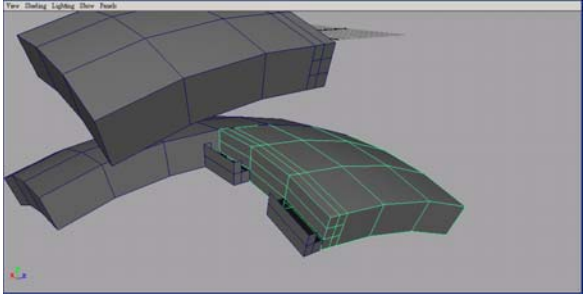
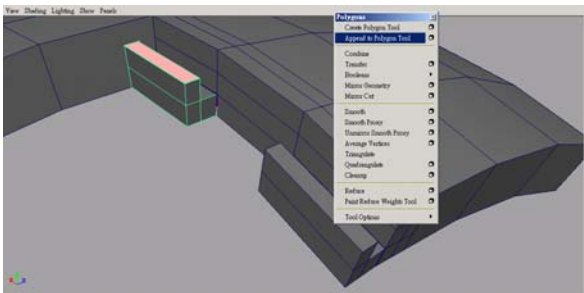
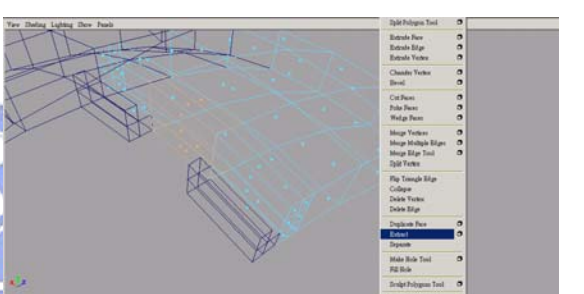
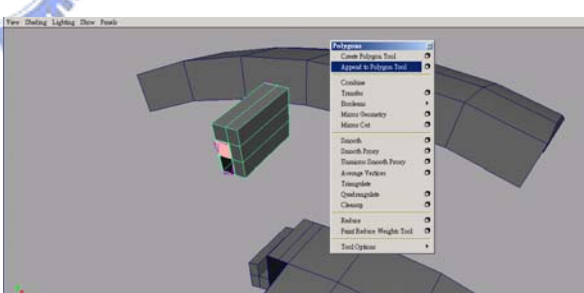
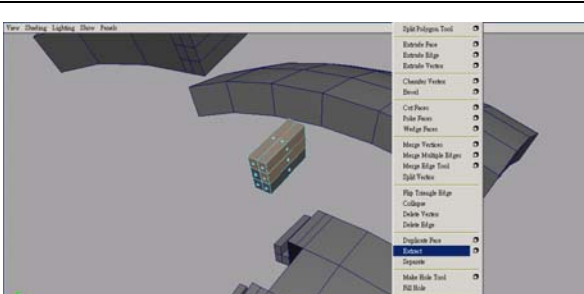
此步驟將以圖示來說明本研究在 Maya 上如何逐步進行接縫接頭設計的過程，範例以簡單的曲面體為單元，目的在使設計的過程可以專注在接頭的呈現，並且提供 Maya 製做接頭過程的操作指令，討論設計過程中指令功能上應用。

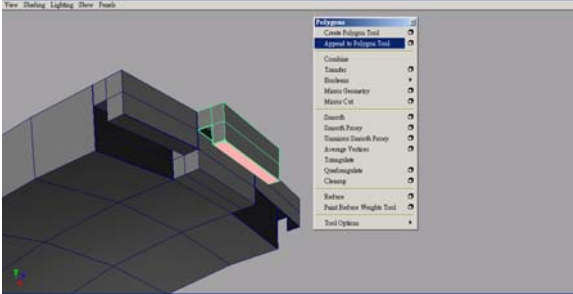
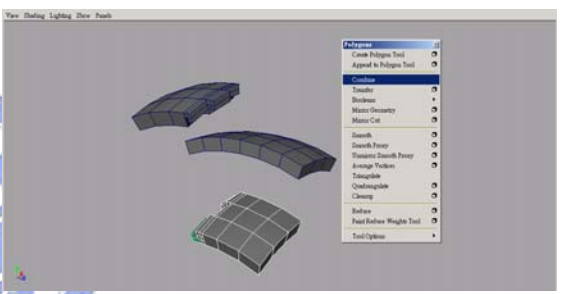
設計接縫接頭的過程如下所述(表 3)：

類型一：接縫接頭	
說明	圖示
<p>創造一個基本的曲面體單元，選取曲面體 1/4 的面使用指令 Extract 將曲面體分成四個個體(a,b,c,d)。</p>	
<p>使用指令 Split Polygon Tool 將曲面體(a)劃分出楔形接頭的輪廓。</p>	
<p>使用指令 Split Polygon Tool 將楔型接頭與曲面體(b)相接處，劃分出卯榫的輪廓再使用指令 Extrude Face 將卯榫的輪廓面長出深度。</p>	
<p>從曲面體(a)中選取曲面體(b)所需的接頭面，使用指令 Duplicate Face 複製所選取的面。</p>	

<p>將所選取的面移至上方，針對曲面體(a)使用指令 Append to Polygon Tool 填補缺口。</p>	
<p>使用指令將 Split Polygon Tool 將曲面體(b)劃分出楔形接頭和卯樁的輪廓。</p>	
<p>使用指令 Split Polygon Tool 填補楔形接頭的缺口，刪除曲面體(b)的卯樁輪廓面。</p>	
<p>將上方的楔形接頭與卯樁的量塊移回原處，選取卯樁的面使用指令 Reverse 將其法線反轉。</p>	
<p>使用指令 Combine 將曲面體(b)、楔形接頭與卯樁量塊合成一體。</p>	

<p>使用相同方式，將曲面體 a, b, c, d 的接縫接頭完成。</p>	
<p>類型二：接縫接頭</p>	
<p>使用指令 Split Polygon Tool 將曲面體(a)和曲面體(b)劃分出搭接和對接的輪廓線。</p>	
<p>從曲面體(a)選取搭接和對接的輪廓面，使用指令 Extract 使其脫離曲面體(a)。</p>	
<p>將搭接和對接的輪廓面移至上方，使用指令 Split Polygon Tool 和 Append to Polygon Tool 填補缺口。</p>	
<p>將搭接和對接的輪廓面移回原處，再選取一次完整的搭接和對接的輪廓面，使用指令 Extract 使其脫離原先的輪廓面。</p>	

<p>將立方體(a)移至上方，而立方體(b)移回原處。</p>	
<p>使用指令 Append to Polygon Tool 填補分離出的搭接和對接的輪廓面。</p>	
<p>選取曲面體(b)中段的搭接和對接的輪廓面，使用 Extract 分離曲面體(b)。</p>	
<p>將曲面體(a)移至上方，而面體(b)移至下方，使用指令 Split Polygon Tool 和 Append to Polygon Tool 填補搭接和對接的輪廓面的缺口。</p>	
<p>選取完整的搭接和對接的輪廓面始用指令 Extract 使其脫離彼此。</p>	

<p>將分離的搭接和對接的輪廓面其中一方移至上方立方體(a)處，使用指令 Append to Polygon Tool 填補搭接和對接的輪廓面的缺口。</p>	
<p>將分離的搭接和對接的輪廓面其中一方移至上方立方體(b)處，使用指令 Append to Polygon Tool 填補搭接和對接的輪廓面的缺口。</p>	
<p>分別將上、下兩方的曲面體與搭接和對接的輪廓面使用指令 Combine 成一個個體單元。</p>	
<p>使用相同方式，將曲面體 a, b, c, d 的接縫接頭完成。</p>	

本階段初期完成了兩個接縫接頭的原型(圖 42)，類型一，接頭的設計主要結合楔形樺頭和卯樺。類型二，接頭的設計主要結合搭接和對接。

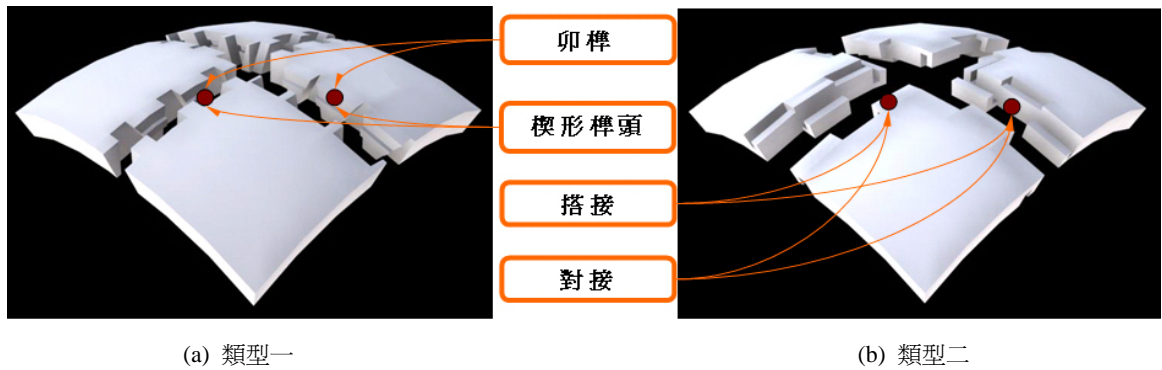


圖 42. 接縫接頭

步驟三：

本階段進行接縫接頭的設計，從概念的思考直到操作 Maya 測試可能發展想接縫頭的建模過程，從不斷的嘗試中來解決軟體上的不足，直到發展出可以精確的建造接縫接頭的數位模型，並以逐步的方式配合圖說來描述設計接頭的方法。在 Maya 設計接縫接頭的操作過程中有三點的問題，前兩點與設計接點接頭時所遭遇的問題相同，第三點如下：

- (c) Extrude Face – 當模型的表面是曲面時，假使模型分割成個別的單元後，相接面如果執行 Extrude Face 時所產生的面相對與模型的曲面不會在同一個曲度上，最後會造成模型的表面產生突出的異物，本研究採取將原本的面進行 Split Polygon Tool 劃分所需的接頭外框，再將相對的面複製至另一個單元上，面經過調整後並將兩者結為一個物體，以保持表面曲度的完整。

3.4 組裝測試

本節探討從數位模型設計到實體模型輸出這過程影響實體模型組裝的因素，不同比例的模型在組裝上所面臨的問題，並討論 RP 裝置在研究過程中所發現的優點以及缺點，以及在實做的過程中尋求解決上述問題的方法。

接頭設計的流程中，數位模型轉成 stl 檔案格式，需在 Maya 操作五步驟，關閉雙面光源、反轉法向、封閉缺口、三角化、刪除歷史紀錄來確保 stl 檔案具備的三角平面、封閉型體、法線朝向一致等屬性。經由上述的程序後，Insight 軟體讀入 stl 檔案開始計算製作實體模型所需的資料，研究中發現此透過此程序 Insight 可以無誤的讀入 stl 檔案並開始計算資料，但是還是會有所例外，雖然 Insight 在執行計算模型邊緣輪廓的指令時，提供檢視模型是否有破損的功能，在準確率方面此功能還不是很穩定，當錯誤發生時 Insight 初看似乎模型完整(圖 43)，RP 輸出實體模型卻是毀損的，此時使用者需要仔細的逐層檢視來確保輸出無誤(圖 44)。

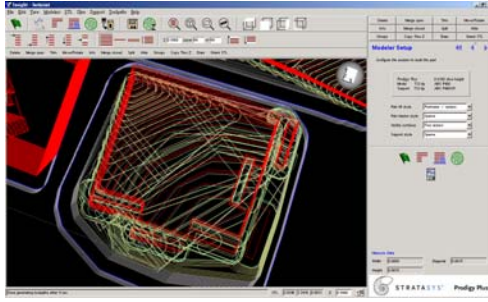


圖 43. Insight 計算錯誤圖

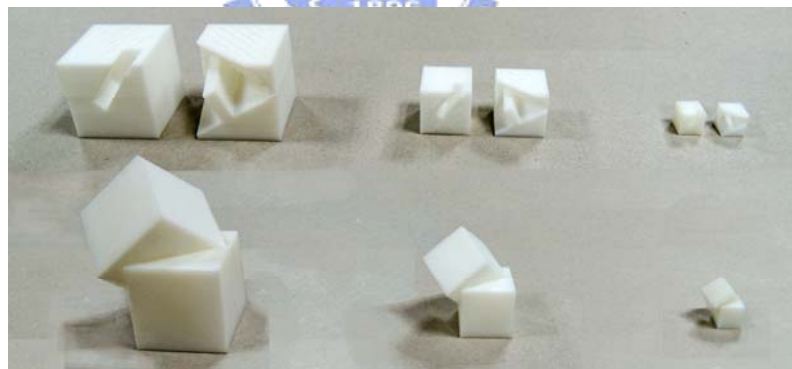


圖 44. 實體模型毀損圖

經過測試組裝後本研究發現兩個主要的問題，如下所述：

(a) 尺度(Scale) –本研究分別對接點接頭和接縫接頭輸出三個比例的實體模型：

接點接頭 – 立方體 a 尺寸為，長寬高(4cm, 4cm, 4cm)，接頭尺寸，長寬厚(3.2cm, 1.6cm, 0.8cm)；立方體 b 尺寸為，長寬高(2.5cm, 2.5cm, 2.5cm)，接頭尺寸，長寬厚(1.6cm, 0.8cm, 0.4cm)；立方體 c 尺寸為，長寬高(1.2cm, 1.2cm, 1.2cm)，接頭尺寸，長寬厚(0.8cm, 0.4cm, 0.2cm) (圖 45)。在組裝過程中發現三個尺度的接點接頭模型皆可順利的組裝，其中以 a 立方體在組裝時須加以施力才能將模型順利的卡入另一端的接頭，其餘兩者只稍加以施力即可以組裝，因此可以得知模型的尺度愈大組裝後就越緊密，可能影響此結果原因在於 Insight 所設計輸出模型的材料的密度和組裝時模型接合的面積大小。



(a) (b) (c)

圖 45. 接點接頭

接縫接頭 – 曲面體 a 尺寸為，長寬厚(6.5cm, 6.5cm, 6.5cm)，接頭尺寸，寬深(1.5cm, 0.8cm)；曲面體 b 尺寸為，長寬高(3.5cm, 3.5cm, 3.5cm)，曲面尺寸，寬深(7.5cm, 0.4cm)；曲面體 c 尺寸為，長寬高(2cm, 2cm, 2cm)，接頭尺寸，寬深(3.2cm, 0.2cm)(圖 46)。在組裝過程中發現三個尺度的接縫接頭模型皆可組裝，曲面體 a 和曲面體 b 在組裝時相較於接點接頭的組裝須施以更強的力道才能卡入另一端的接頭，卡入後模型的接合面略有細縫再加以敲打後接頭即可緊密結合，但唯獨曲面體 c 在接裝後型體無法穩固而容易脫落，其影響的原因在於模型接頭的尺寸僅有寬 3.2cm 深 0.2cm，因此無法順利

接合。

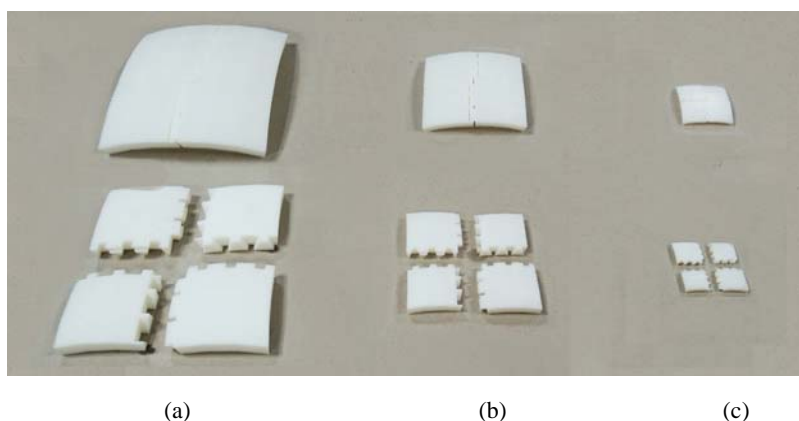


圖 46. 接縫接頭

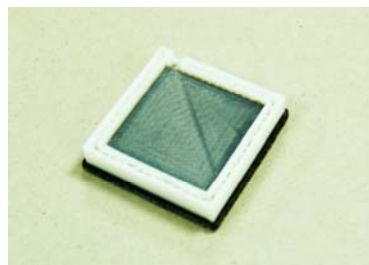
本研究在測試輸出的過程中發現有以下的問題，接頭的厚度在 2mm 以下的模型，在組裝上容易有模型破裂的產生；模型在深度上至少應保留 4mm 使在組裝時，可以確實的卡入另一端的接頭，若是低於 3mm 容易產生模型脫落。

(b) Precision – 精確度，本研究發現以下四點容易造成模型的精確度產生問題(圖 47)：

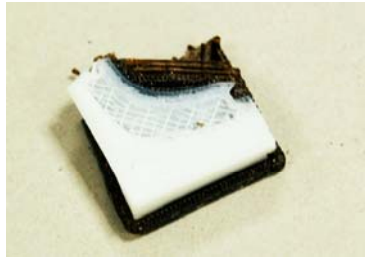
- (1) 數位模型的表皮面數過低，造成模型精確度降低。
- (2) RP 裝置輸出模型厚度最小底限大約為 0.5mm，而輸出模型的厚度小於 0.7mm 時，容易造成模型面破損。
- (3) 數位模型假設未做好封閉時，而缺口極小使得 Insight 軟體無法計算出有缺口，在模型輸出的過程中，支撐材容易吃入模型或者是產生破面。
- (4) 由於 RP 的材料 ABS 輸出方式是水平逐層向上堆疊，細長量體的數位模型，若是在 Insight 內傾斜直立的擺設，可能造成模型輸出不精確。



(1) 精確度不足的實體模型圖



(2) 模型過薄破損圖



(3) 模型破面圖



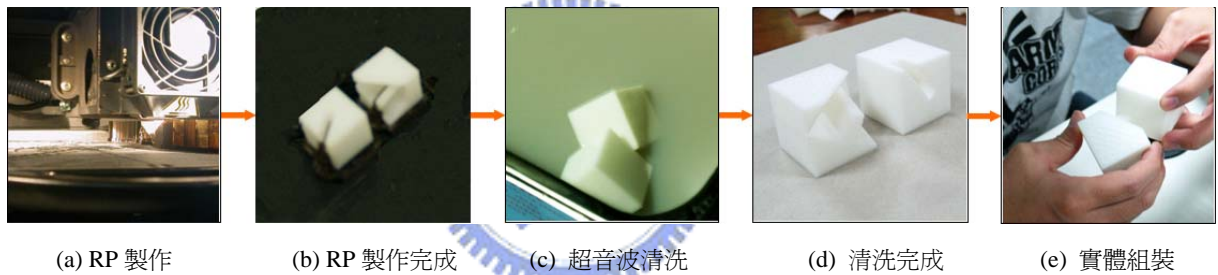
(4) 垂直擺設模型不精確圖

圖 47. 組裝測試 – 精確度的問題

3.5 實體組裝

以下為接點接頭和接縫接頭，從 RP 輸出實體模型到組裝的過程，圖解的描述模型在實際組裝後的成果(圖 48)(圖 50)，來驗證整個接頭設計的發展(圖 49)(圖 51)。

接點接頭實體組過程：



(a) RP 製作

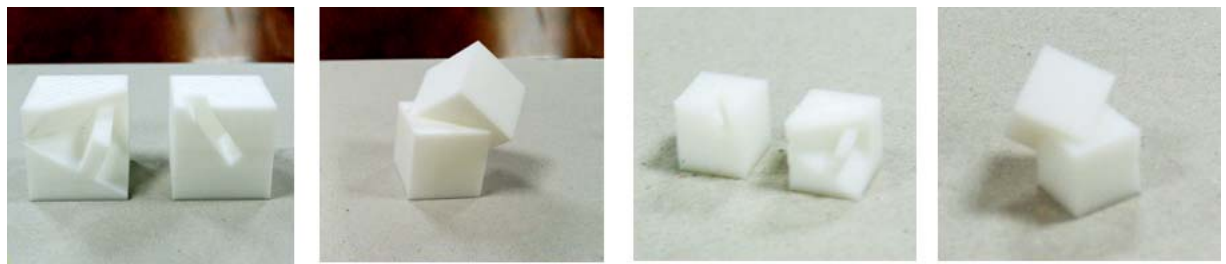
(b) RP 製作完成

(c) 超音波清洗

(d) 清洗完成

(e) 實體組裝

圖 48. 接點接頭 – 原型製作過程



(a) 接點接頭-類型一

(b) 接點接頭-類型二

圖 49. 接點接頭 – 組裝測試

接縫接頭實體組過程：

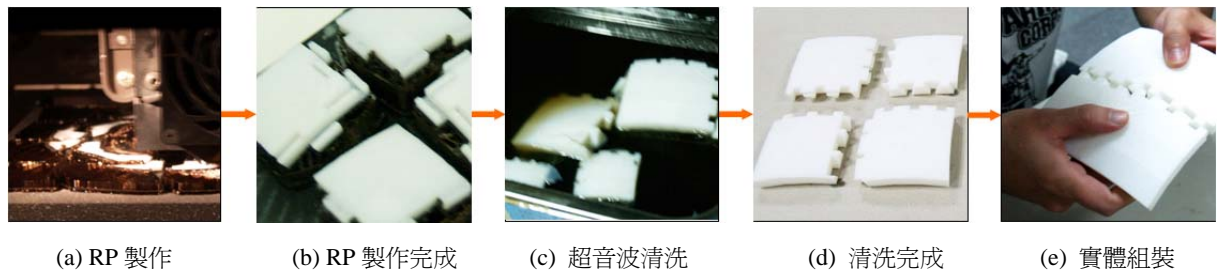


圖 50. 接縫接頭 - 原型製作過程

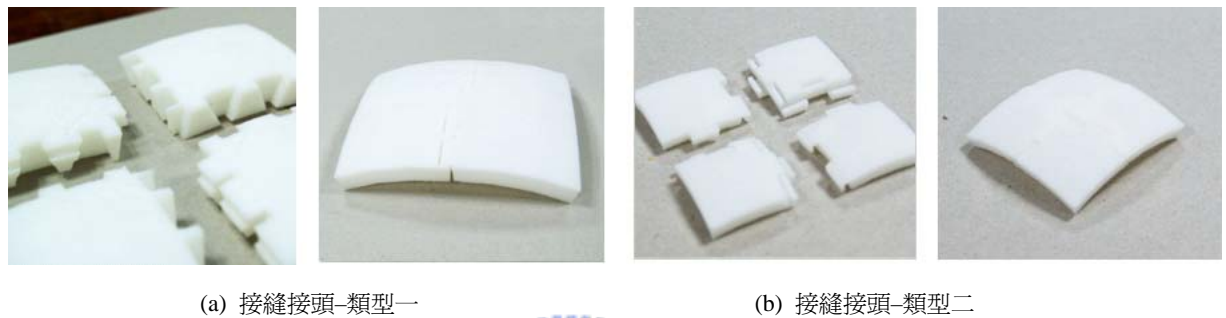


圖 51. 接縫接頭 - 組裝測試

CAD/CAM 技術將傳統木構接合系統發展新的應用至自由形體的組裝，初步的設計出接點接頭以及接縫接頭提供給自由形體在骨架組裝和表皮組裝時可能的新接合方式，並將整個研究在設計接頭的過程從構想直到生產製造的流程，逐一的探討所發現的問題及本研究所採用解決方法，在接頭的實體模型可順利的組裝下，驗證本階段所設定目標。