

## 第四章 技術研究

從第三章案例分析所歸納的「先期 CAD/CAM 設計與建造過程」(圖 3-114)，在設計與建造階段都有應用 CAD/CAM 技術輔助的步驟，其中以設計階段的「CAM 實體模型」步驟(圖 3-110)及建造階段的「單元生產」步驟(圖 3-111)扮演重要角色。因為這兩步驟大量在 CAD/CAM 軟硬體轉換，操作過程重複性高，且目前都以人力操作，容易導致失誤或誤差。因此本章著重於技術研究，詳細分析這些步驟中 CAD/CAM 技術的操作與軟硬體之間轉檔過程，並希望可以將繁瑣的步驟編寫程式自動化，主要以兩部分來分析：1.轉檔過程分析及 2.過程自動化。

### 4.1 轉檔過程分析

在 CAD/CAM 設計與建造過程中，應用到電腦數值控制(CNC)，快速成型(RP)及 3D 掃描(3D scanner)三種不同的 CAD/CAM 技術。從第三章案例分析中，CNC 大量應用於設計與建造階段，而 RP 及 3D scanner 多應用於設計階段。在應用上，CNC 技術中的雷射切割(laser cutter)，主要用來製作複雜自由形體的骨架及三角折板表皮，而數控滾灣(CNC rolling)可將金屬圓管製作成 3D 曲度變化的彎管骨架；數控銑床(CNC milling)可製作量體模型及曲面表皮；另外 RP 技術中的立體印刷術(Stereo Lithography, SLA)、選擇性雷射燒結(Selective Laser Sintering, SLS)、及熔融擠製成型(Fused deposition modeling, FDM)多數用來快速製作設計量體模型；至於 3D scanner 則是輔助將手作模型數位化的過程。除了從案例研究中理解不同 CAD/CAM 技術的輔助功能，本研究亦針對雷射切割與 RP 技術進行媒材實驗，進一步了解這些技術於設計過程扮演的角色與輔助設計之特性(詳見附錄三)。

為了理解如何操作不同 CAD 軟體中的 3D 模型再轉檔至不同的 CAM 硬體設備的過程，本節主要針對 CNC 技術中的雷射切割(laser cutter)，RP 技術中的熔融擠製成型(Fused deposition modeling, FDM)，及 3D scanner 技術中的小型 3D 攜帶式雷射掃描(3D laser scanner)(圖 4-1)，分別整合歸納出不同軟硬體介面之間的轉檔與操作步驟。以下分析雷射切割，FDM 快速成型，3D 攜帶式雷射掃描在輔助設計與建造的操作步驟並提出轉檔建議準則。



圖 4-1 三種 CAD/CAM 技術

#### 4.1.1 雷射切割

雷射切割主要是以 2D 切割平面薄板材料或蝕刻材料表面的製作。由於製作過程中雷射切割主要是讀取 2D 資料來切割，因此 3D 的模型數位資料必須先經由一些操作步驟轉換成 2D 的資料才可以切割輸出。在軟硬體的檔案轉換中，必須先從 3D 的建模軟體如 3D Max, FormZ, Maya, Rhino 的格式，轉檔至 2D 繪圖軟體如 AutoCAD 的格式，最後再轉成雷射切割硬體設備可讀取的特定檔案格式，才能由雷射切割設備輸出。

為了探討這些轉換步驟，本研究將透過同時發生於設計階段「CAM 實體模型」及建造階段「單元生產」過程中的步驟：1.「骨架製作」及 2.「折板表皮製作」，來歸納出雷射切割的轉檔過程。

##### 骨架製作

在骨架製作過程中，從目前 3D 建模軟體所建構的「3D CAD 模型」開始，先在 3D 軟體製作「骨架建構」及「骨架卡接」、再轉檔到 2D 軟體進行「2D 圖面製作」的步驟，最後將檔案由「雷射切割輸出」。以下詳細說明這些操作步驟。

**3D CAD 模型。** Maya 因具有多種建模方式，尤其完整的 Nurbs 建模功能，比其他 3D 軟體如 3Dmax, Rhino, FormZ 在自由形體設計的複雜曲面建模過程佔有較多的優勢。而各種不同 3D 軟體的模型都可以用 .OBJ 格式相互轉換。此格式主要支援多邊形(polygon)模型，同時也接受直線(lines)，表面(surfaces)和自由形線(free-form curves)，轉換過程最穩定而資料損失的機率低。另外還有 .IGES 格式，主要支援曲面(Nurbs)模型，已被定義為基於 CAD/CAM 不同電腦系統之間的通用 ANSI 信息交換標準。

**骨架建構。**在骨架建構的過程，包含三個主要操作：「分割」、「骨架擠出」及「骨架修正」。首先，對於「分割」的操作方式，是在曲面形體 3D 模型的頂視圖中畫出水平、垂直、或圓心的分割參考線，再將這些參考線擠出(extrude)成垂直面板，接著將這些板與設計曲面進行相交切割(intersect)取出線段，就可以得到骨架結構的中心線(圖 4-2)。取出骨架結構中心線後，畫出適當尺寸的斷面矩形，利用斷面矩形及骨架中心線將「骨架擠出」。骨架製作完成後必須進行「骨架修正」，因為當形體曲面過於複雜將導致在第一步水平垂直分割時，會有些骨架相互交錯形成不合理的骨架，因此必須進行修正(圖 4-3)。

**骨架卡接。**骨架製作及修正完後，必須將垂直與水平卡接的骨架「凹槽製作」。這個步驟在李元榮(2005)研究中，主要以製作交卡參考物件與骨架進行布林運算(boolean)而切出凹槽。但本研究將改變此方法，因為 3D 軟體的布林運算需耗很大的軟體資源，當遇到複雜形體時很常出現問題，尤其是 Maya 此功能常常會失效，因此會導致製作凹槽時不只是操作繁瑣，還會因指令失常而耗費更多的人力與時間。本研究經多次測試，提出另一種製作凹槽的方式，主要以 Nurbs 相交切割(intersect)的方式來取出凹槽位置。操作步驟先將水平與垂直向的骨架各往上與往下移 1/4 斷面寬度的位置(圖 4-4)，再將第一步的分割垂直板與移位

的骨架進行相交切割(intersect)，這樣就可以取出骨架外框與凹槽的線段(圖 4-5)。這種作法主要都是在 Nurbs 進行，不用將曲面形體再轉成 polygon，因此可以得到更精確的骨架資料。

**2D 圖面製作。**完成了垂直水平骨架卡接凹槽製作之後，將所得到的 2D 骨架外框與凹槽位置線段，匯出成.DXF 格式，再匯入 2D 軟體 AutoCAD 製作輸出的圖面。在 AutoCAD 包含兩個主要操作：「2D 骨架輪廓」及「排版編號」。由於從 3D 軟體匯入的骨架外框及凹槽位置線段不是完整的骨架圖面，因此必須繼續作編修，製作完整的「2D 骨架輪廓」圖面。當骨架邊修完後，再進行「排版編號」。將編修完的 2D 骨架輪廓編排於雷射切割可切割材料大小的版面上，並進行編號，以利骨架組裝時的識別(圖 4-6)。最後為了組裝參考依據，必須製作骨架編號標示圖片(圖 4-7)。

**雷射切割輸出。**將在 AutoCAD 排版編號完成的骨架檔案輸出成.DXF 格式，再匯入雷射切割機的控制軟體 Coreldraw。輸出前將線寬調到極細(0.001cm)，同時調整雷射切割輸出的火力(power)與速度(speed)的參數，再放置需要切割的材料在雷射切割機中，就可以開始進行雷射切割。切割完的骨架單元再進行組裝(圖 4-8)，最後按照編號標示圖完成骨架模型(圖 4-9)。

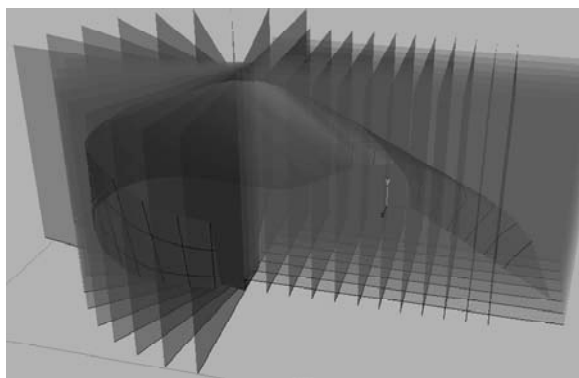


圖 4-2 分割骨架中心線

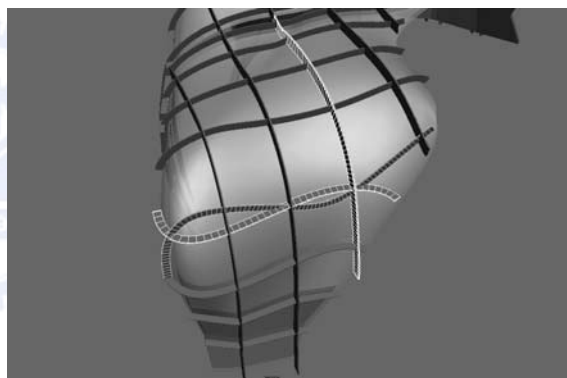


圖 4-3 檢查骨架合理性

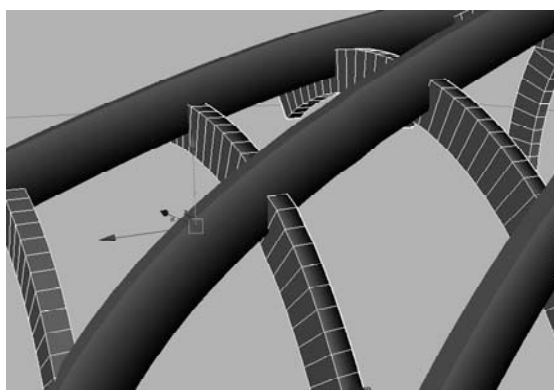


圖 4-4 不同方向骨架各自上下移位 1/4 斷面寬度

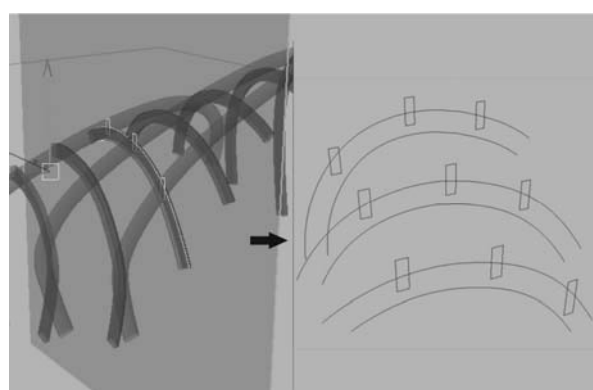


圖 4-5 分割板與骨架進行相交切割取得骨架外框與凹槽

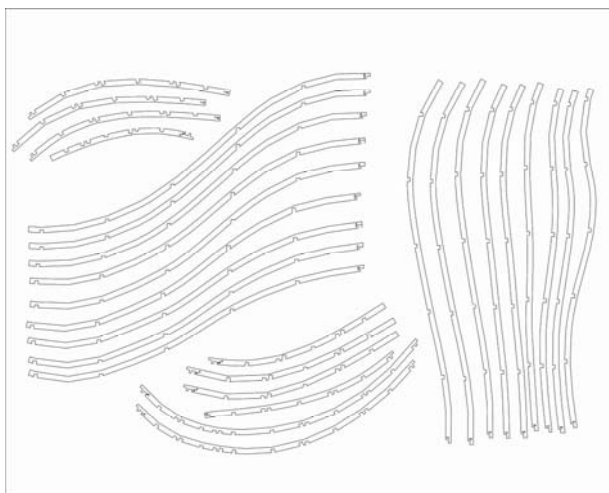


圖 4-6 AutoCAD 骨架排版編號圖

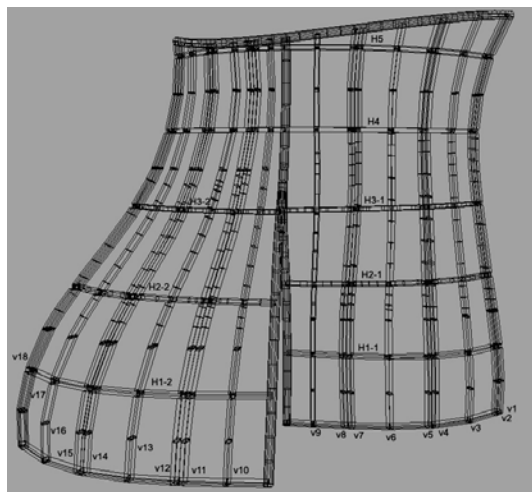


圖 4-7 骨架編號標示圖

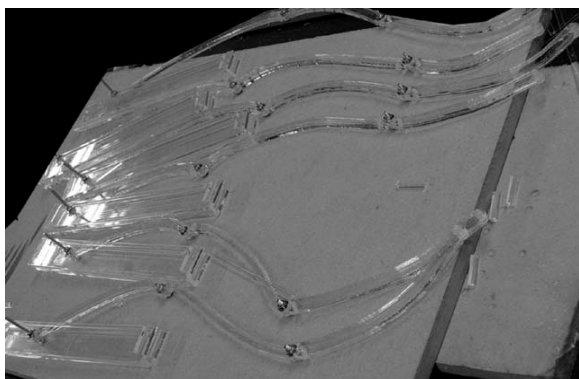


圖 4-8 雷射切割之骨架單元



圖 4-9 組裝完成的雷射切割骨架模型

### 折板表皮製作

在折板表皮製作過程中，開始從目前 3D 建模軟體所建構的「3D CAD 模型」，在 3D 軟體進行「折板建構」後、再轉檔到 2D 軟體進行「夾角計算」及「2D 圖面製作」的步驟，最後將檔案由「雷射切割輸出」。以下詳細說明這些操作步驟。

**3D CAD 模型。**對於各 3D 軟體之間轉換格式與前述骨架製作之敘述相同。

**折板建構。**在折板建構過程，主要於 3D 軟體執行三個操作：「分割」、「折板創建」、「三角化」。對於表皮「分割」其實具有不同的形式，如三角分割，四邊分割，六邊分割等。但是在折版的製作，分割形式以四邊分割為主。分割操作方式跟骨架製作一樣利用參考線擠出垂直板進行相交切割(intersect)取出分割線段。接著配合所分割的線段進行「折板創建」，主要是利用 3D 軟體建置多邊形(polygon)指令來建構每一片折板(圖 4-10)，最後所呈現的是近似於自由曲面的折板形體。當折板建構完成後，將這些四邊形折板「三角化」(圖 4-11)，通常 3D 軟體都具有多邊形三角化功能(triangulate)。

**夾角計算。**在將三度空間的折版單元展開成 2D 的資料前，必須先將每一片折板進行「夾角計算」的步驟。目前此步驟是在 2D 軟體 AutoCAD 進行。因此必須將 3D 軟體製作的折板，



匯出成.DXF 檔案，再匯入 AutoCAD。計算夾角的操作是應用 AutoCAD 的對齊(align)功能，將每一塊折版依序對齊在一個平面上(圖 4-12)。接著，測量每一塊折版的折線角度，除了測量角度，同時需要確認折版是往上折或往下折，往上折角度標示“+”，往下折角度標示“-”(圖 4-13)。這些角度數據主要為了折板材料加工所需，用數控折床機器將角度輸入，即可折出精準的折線。

**2D 圖面製作。**當角度計算完，就可以開始製作 2D 輸出圖面，包含兩個步驟：「2D 展開」及「排版編號」。「2D 展開」主要是將在計算夾角時已經攤平於平面上的折板另外一面折起來的三角形再用對齊(align)功能完全展開在平面上，此時四邊形折板已經是可供輸出的 2D 展開(unfold)資料。當折板全都展開成 2D 資料後，製作「排版編號」的圖面。為了輸出之後折版可以容易被組裝，每塊展開的折版必須編號，標示角度及編排在符合材料版尺寸大小的範圍內(圖 4-14)，另外也要有一張編號示意圖讓組裝時容易辨認折板位置(圖 4-15)。

**雷射切割輸出。**此步驟與骨架製作相同，將在 AutoCAD 排版編號完成的折板檔案輸出成.DXF 格式，匯入雷射切割機的控制軟體 Coreldraw。調整輸出參數及雷射切割輸出的火力與速度，放置切割的材料，開始進行雷射切割(圖 4-16)。切割完的折板單元再進行組裝，最後按照編號與編號標示圖完成骨架模型(圖 4-17)。

從以上各過程操作與轉檔分析，最後歸納出應用於「骨架製作」及「折板表皮製作」的「雷射切割轉檔過程」(圖 4-18)。

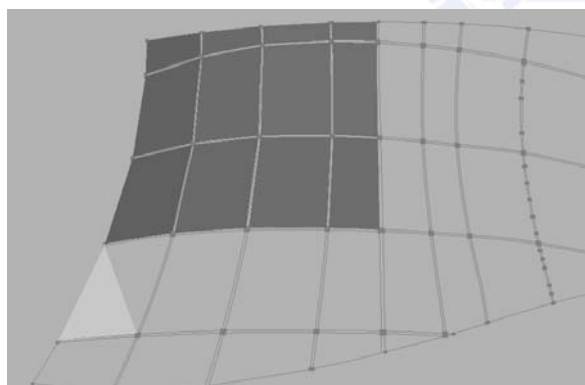


圖 4-10 依據分割的形式製作折版

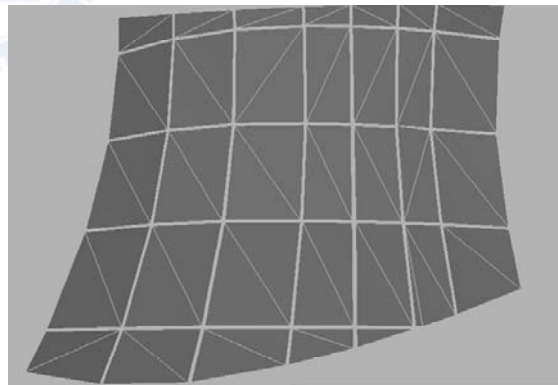


圖 4-11 折版三角化

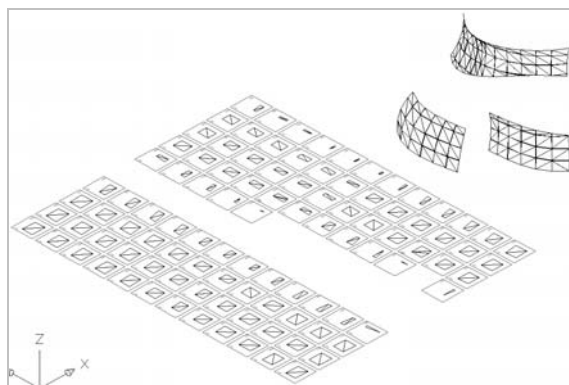


圖 4-12 AutoCAD 折板展開

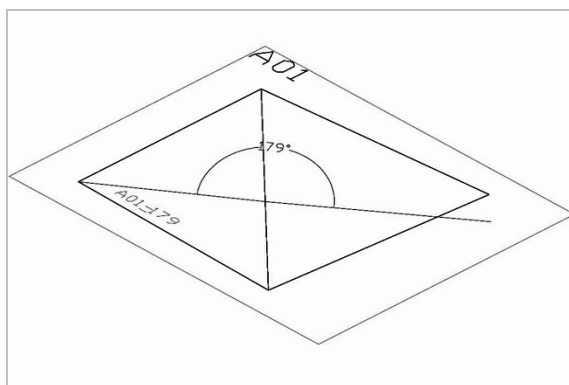


圖 4-13 AutoCAD 計算夾角的角度

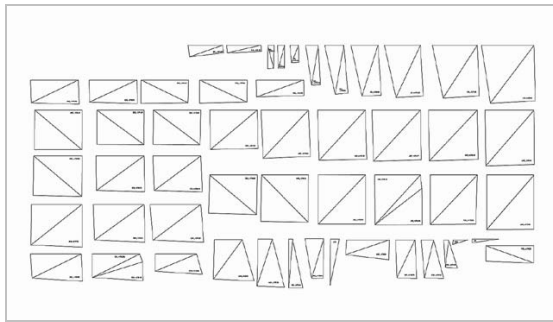


圖 4-14 AutoCAD 折版編號與編排

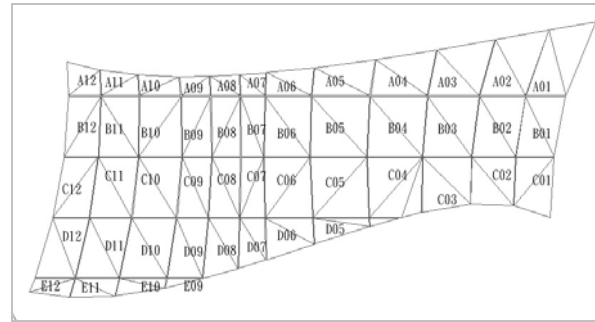


圖 4-15 折版編號標示圖

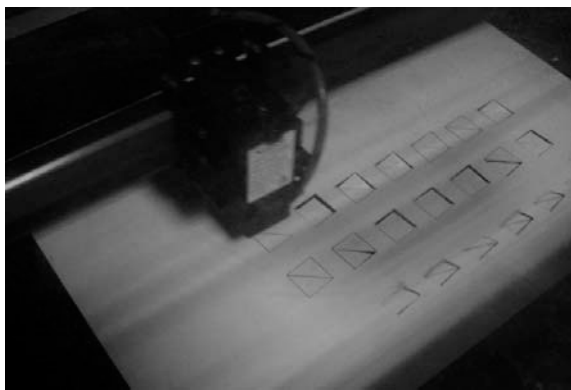


圖 4-16 折板進行雷射切割

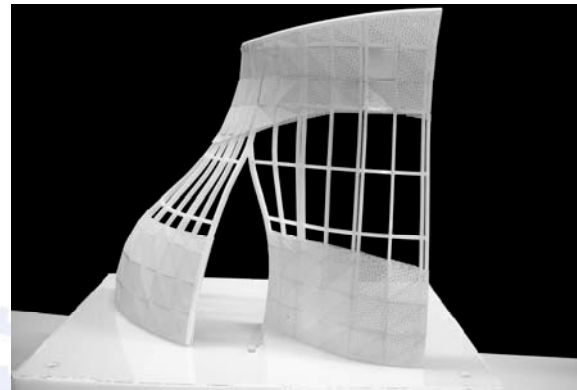


圖 4-17 組裝完成的雷射切割折板

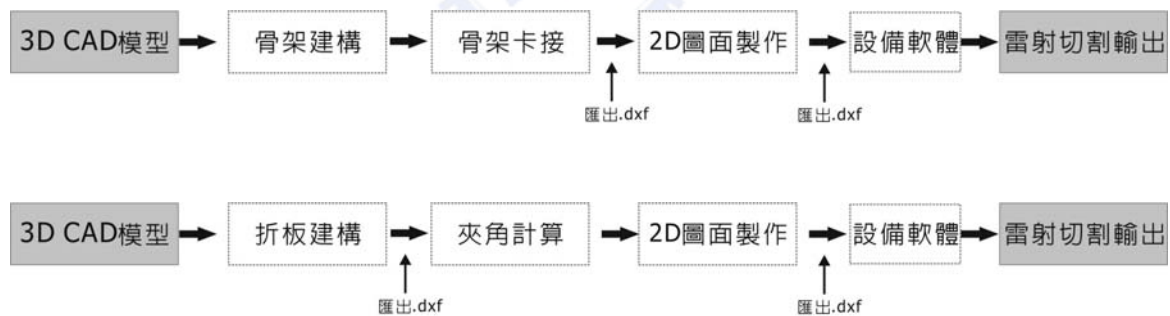


圖 4-18 雷射切割轉檔過程

#### 4.1.2 FDM 快速成型

快速成型(Rapid prototyping)技術為附加法製作生產過程，主要是將模型以一層一層附加的方式來成形。因此快速成型設備必須讀取具有每一層完整斷面的封閉模型才可以完整輸出。同時，所讀取的檔案格式為 STL，主要支援多邊形(polygon)檔案，內容為許多小三角形平面，它包含了每個三角形的單位法線向量(normals)及頂點座標。一個完整的 STL 檔案需求必須讓所有法線向量一致朝向外外部，模型的相鄰三角形間須頂點接頂點，並且確認模型完整的封閉。由於有 STL 格式的限制，因此在操作 FDM 快速成型的過程中，首先必須在 3D 軟體中將模型調整至符合 STL 格式的條件，再轉換檔案至 FDM 快速成型控制軟體 Insight 設定輸出參數，最後才可以完整輸出 ABS 材質的 RP 模型。

由於 RP 技術在 CAD/CAM 設計與建造過程中多應用於設計階段的「CAM 實體模型」步驟，可快速製作實體模型，因此為了探討 FDM 快速成型操作轉檔步驟，下列分析從目前 3D 建模軟體所建構的「3D CAD 模型」開始，進行「多邊形轉換」及「輸出前檢查」，最後將檔案由「FDM 快速成型」輸出。

**3D CAD 模型。**在使用 RP 製作實體模型過程中，主要需透過 3D 軟體提供實體模型(solid model)，即多邊形(polygon) 檔案的形式才能輸出 STL 格式至 RP 機器，目前的 3D 建模軟體 Maya, 3Dmax, FormZ, Rhino 等皆可提供此需求。

**多邊形轉換。**在將 3D CAD 模型製成可以由 RP 設備接受的檔案過程中，有五個主要操作：「Nurbs 轉 polygon」、「細緻化」、「厚度」、「模型切割」及「縫隙填補」。由於 STL 格式的需求必須將 Nurbs 轉成 polygon，在這過程中，為求 RP 模型可以細緻化，可以將模型的分佈線(UV)增加。此時模型是無厚度的，為了實體模型所需的厚度需將面擠出(extrude face) (圖 4-19)。最後，如整體模型大小超出 FDM 快速成型機器的輸出尺寸(20\*20\*30cm)，則需將模型切割(圖 4-20)。完成切塊分割後，必需將切割面的缺口封閉(fill hole/cap)，填補模型的縫隙，主要是因為 RP 設備只輸出每一層斷面都是完整封閉線段的模型。

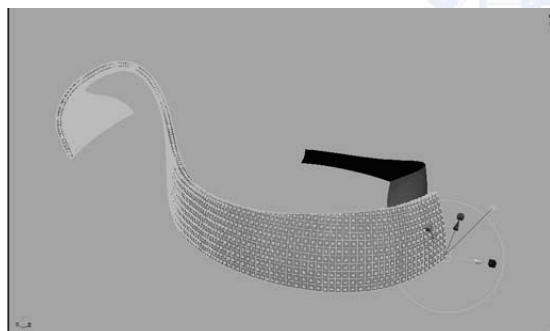


圖 4-19 製作曲面厚度-擠出面 (extrude face)

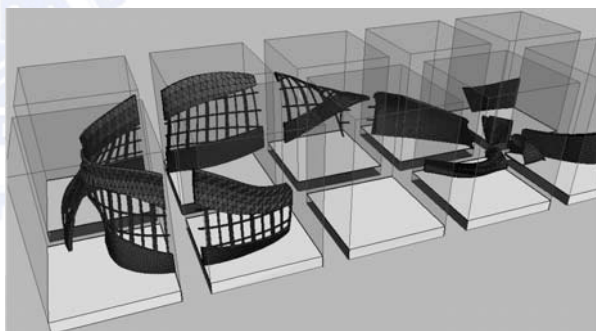


圖 4-20 模型依 FDM 設備輸出大小作切割

**輸出前檢查。**製作完成的多邊形模型在匯進 RP 設備前需先對模型進行檢查，主要進行四個操作：「三角化」、「法向量檢查」、「封閉檢查」、「三角頂點檢查」。在 Maya 中為求輸出完整的 STL 檔案格式，必須先將多邊形模型三角化(triangulate)，然後進行三項檢查：1. 檢查法線向量 (normals) 是否一致朝向外，2. 檢查模型是否確實為完全封閉面，3. 相鄰三角形間是否頂點接頂點(圖 4-21)。當模型檔案都檢查無誤後，就可以直接匯出 STL 格式。

**FDM 快速成型。**當 STL 格式匯入 RP 設備，須經由設備軟體-Insight 的參數設定後才可輸出。主要包含四個操作：「斷面分割」、「支撐材料建構」、「輸出路徑設定」及「製作時間及模型耗材體積計算」。但在調整這些參數設定之前，必須調整模型的加工方位。接著就設定上述的加工參數(圖 4-22)，再使用鍵盤上的 PgUp 和 PgDn，逐層檢查斷面是否封口(圖 4-23)，和輸出材料分佈的狀況(圖 4-24)，完成檢查後就可由機器輸出。輸出完成的模型取出後需放到 prodigy plus 洗淨支撐材料，內添加清潔劑，運用超音波共振及化學溶解的原理清除細部的支撐材(圖 4-25)。完成清潔之後，就可以將模型組裝成形(圖 4-26)。

從以上各過程操作與轉檔分析，最後歸納出應用於製作實體模型的「FDM 快速成型轉檔過程」(圖 4-27)。

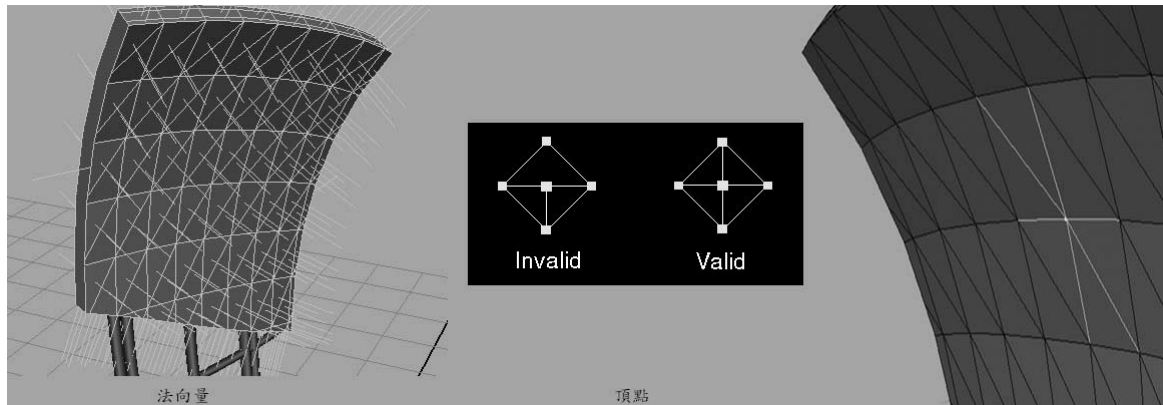


圖 4-21 輸出前檢查

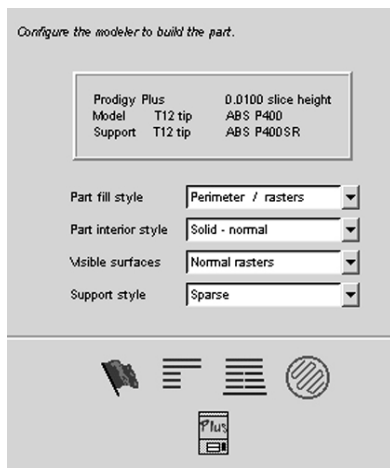


圖 4-22 Insight 軟體設定

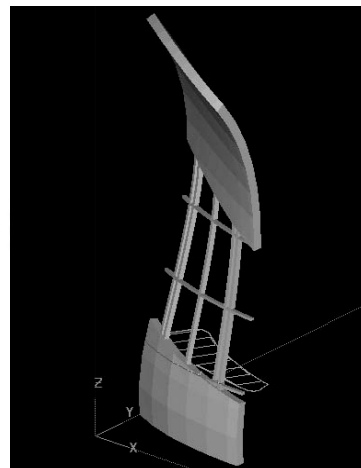


圖 4-23 檢查逐層封口是否封閉

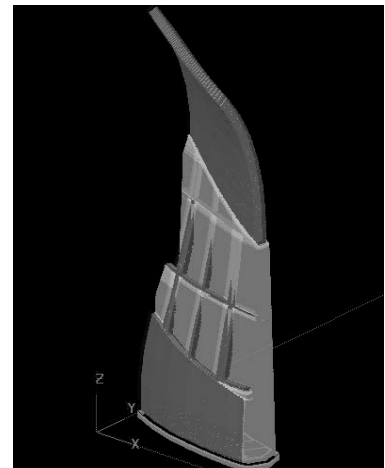


圖 4-24 材料與支撐材分配狀況

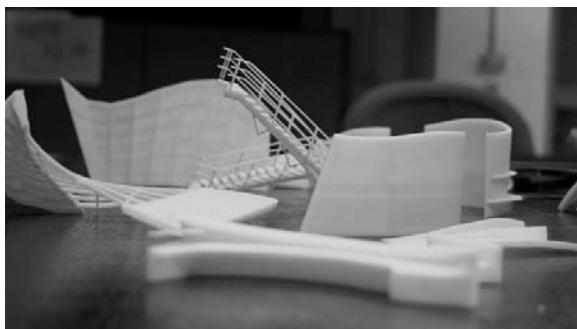


圖 4-25 支撐材被清除後的每一塊模型



圖 4-26 模型組裝成形



圖 4-27 FDM 快速成型轉檔過程



### 4.1.3 攜帶式雷射掃描

3D 雷射掃描為反向工程的技術，主要是可以將實體物件快速掃描成電腦 3D 模型資料。對於攜帶式小型的 3D 雷射掃描機器(portable 3D scanner)，主要以雷射光來掃描物件，整個操作步驟主要先放置一個「實體模型」，利用 3D 雷射掃描機器的控制軟體 TriD 先進行「掃描」，再對所掃描的數位模型進行「接合」及「破面修補」，最後再轉換成目前 3D 軟體可以讀取的「3D CAD 模型」格式，以下以各操作步驟分析其轉檔過程。

**實體模型。**為了可以將實體模型完整掃描而避免破面，必須先處理被掃描的實體模型的材質。在雷射光掃描過程中，掃描物件必須不具反光材質才能掃描出完整的模型；但是如果物件部分位置太暗或具有反光表面，則必須先經過處理，目前採取補上白色粉末的方式來解決。

**掃描。**在進行掃描時，其中包含調整「環境光線」、「掃描距離」、及「掃描角度變換」三個部份。由於掃描的環境光線也是重要影響物件表面掃描的完整度，3D 雷射掃描設備必須置於光線足夠及均勻的環境，光線太暗會導致無法掃描。另外，雷射光會有固定的掃描範圍，掃描物件與 3D 雷射掃描設備的距離不易太遠及太近，最佳位置約在 50~60cm 的距離，將可完整掃描（圖 4-28）。同時操作時必須多角度變換物件來進行掃描，再將每一部份接合，才可以得到完整的物件模型（圖 4-29）。

**接合。**此步驟主要在 3D 雷射掃描設備控制軟體 TriD 進行，共包含「調準」、「疊合」及「合併」三部分。主要是將所掃描的不同角度模型作完整的接合。首先，對於調準的步驟，必須先選擇其中一個模型作為調準的基準，再將另一塊模型調準位置。接下來，將已經調準的模型進行疊合，最後再由電腦自動開始作合併的精準運算，取得完整的模型（圖 4-30）。

**破面修補。**由於物件進行掃描時會因為某些部位光線不足或反光而導致所掃描的模型破面，因此必須進行修補破面（圖 4-31）。控制軟體 TriD 具有多種修補破面的方式，只是這些補面指令所能修補的程度有限，僅可以修補一些較小的破面，對於大範圍的破面，即使可以修補也無法讓表面滑順，如果模型中缺少了較大範圍的表面，建議再重新掃描破面的範圍。

**3D CAD 模型。**所掃描的檔案經過接合與修補破面後，就可以匯出成目前 3D 軟體可以讀取的.3DS 或.OBJ 格式。在 3D 軟體所匯入這些格式的檔案是具有三角面的 polygon 模型。

從上述各過程操作與轉檔分析，最後歸納出應用於實體模型數位化過程的「3D 雷射掃描轉檔過程」（圖 4-32）。

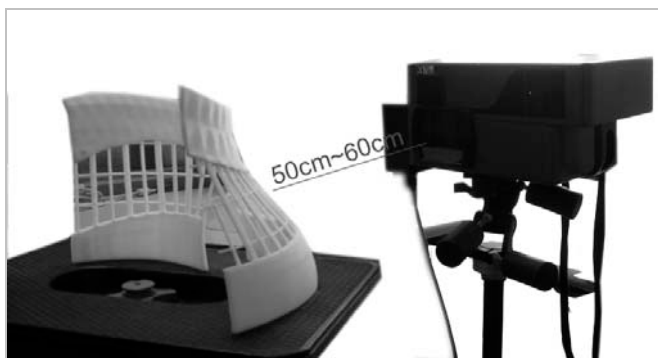


圖 4-28 調整掃描距離

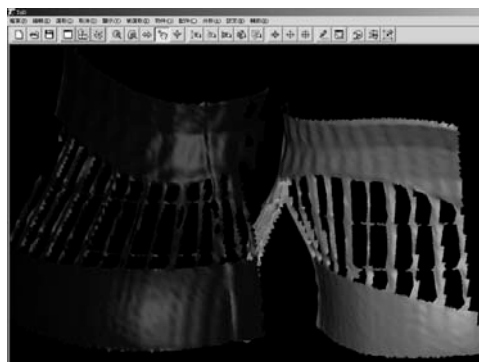


圖 4-29 變換角度掃描

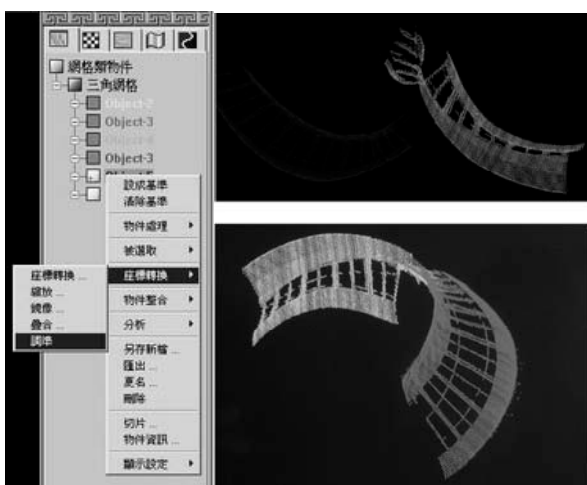


圖 4-30 多個掃描部分相互結合成一個完整模型

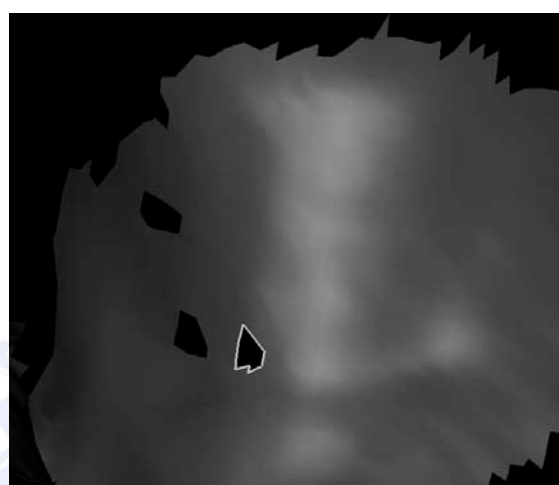


圖 4-31 修補破面

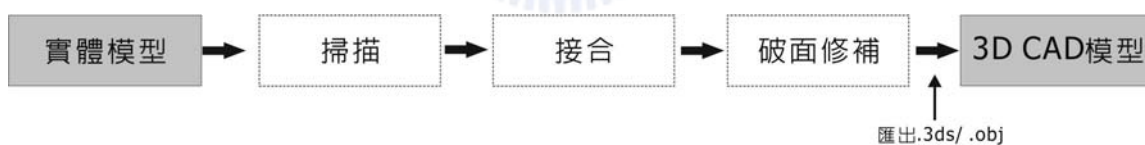


圖 4-32 3D 雷射掃描轉檔過程

#### 4.2 過程自動化 (Automation of critical micro-processes)

從 4.1 節轉檔過程的分析中，可以得知有些步驟很繁瑣且須重複執行，尤其是應用雷射切割製作的「骨架製作」與「折板表皮製作」，這兩個步驟除了應用於設計階段檢視設計的「CAM 模型製作」外，也須在建造階段「單元生產」時作為單元施工圖的重要製作過程。當設計大量時，圖面製作需要耗費許多時間與人力，加上以人力重複操作同樣的步驟，難免會出現錯誤與誤差，導致須花更多時間來作修正或調整。為了解決這些問題，已有研究者開始撰寫自動化程式，如 Dritisas (2005)在 Rhino 軟體撰寫骨架分割自動化程式，李元榮(2005)在 AutoCAD 軟體撰寫折板攤平自動化程式。然而，這些自動化程式主要是針對研究者所應用的軟體環境來設計，而且也只有局部步驟，並沒有完整的整合。為了提出一般化 (generalized)的自動過程，本研究希望透過對於「骨架製作」與「折板表皮製作」操作步驟的分析，整合出符合更多設計者在不同的設計環境下，可依循的自動化過程。再將此程式

應用於設計案例作驗證。本節以兩部分來進行討論：1. 自動化步驟與程式撰寫，2. 自動化程式應用之驗證。

#### 4.2.1 自動化步驟與程式撰寫

在「骨架製作」與「折板表皮製作」操作過程中，設計者會先在 3D 軟體中操作設計形體，而 3D 模型在轉換成 2D 資料時，必須經由不同軟體轉檔處理。此時，由於自由形體曲面變化複雜，在轉檔過程中，會礙於不同軟體支援的複雜度不同而出現資料流失或尺寸誤差。因此在自動化過程中，本研究將大部分可以在 3D 環境中完成的操作步驟盡量於同一軟體中完成，最後才將檔案匯出至 2D 軟體製作輸出圖面。

另外在程式撰寫方面，本研究選擇以 Maya 作為撰寫自動化程式的環境基礎。雖然目前建築教育與建築專業較常用來繪製 3D 模型的軟體是 3D Max，但近年也開始利用 Maya。Maya 原為製作電影動畫軟體，其動態及演算法產生形體之功能逐漸被設計師用來產生設計形體之重要工具。而且 Maya 的 Nurbs 功能比其他 3D 軟體在建置自由形體上占較多的優勢，加上其參數化特性、具有清楚歷史紀錄關係、容易將許多繁瑣操作指令寫成 Maya MEL 執行程式的優點，更適合作為程式自動化平台。對於程式撰寫，由於自由形體設計物件複雜及數量龐大，必須應用物件層(layer)來管理，因此除了撰寫重複性指令，也將物件層的建立作為重要的程序，讓模型檔案中物件層的建立也自動標準化，有利於日後資料管理。

以下分別以「骨架製作」與「折板表皮製作」，分析其自動化操作步驟並撰寫自動化程式。

##### 1. 「骨架製作」自動化操作步驟

「骨架製作」的過程開始在 3D 軟體中操作「分割」、「骨架擠出」、「骨架修正」、「凹槽製作」，之後再匯入 2D 軟體操作「2D 骨架輪廓」編修及「排版編號」，以作為輸出圖面。由於過程中的「骨架修正」步驟需要設計師決定與檢視，而在自動化過程中仍希望可以讓設計師掌控設計決定權而不只是被自動化程式取代，因此不宜將整個過程都採取自動化模式。另外，在撰寫程式過程，由於 Maya MEL 已具有很多開放資源的電腦運算直譯程式(script)可以取得，因此本研究除了對部分操作步驟撰寫程式，也整合一些開放資源可應用的程式。以「骨架製作」的操作，主要將「分割」及「凹槽製作」兩個步驟撰寫程式自動化，而「骨架擠出」步驟則直接應用所取得的外掛程式。以下對這些步驟加以說明。

*分割*。在設計骨架系統時，必須先於設計曲面上作分割取出製作骨架的中心線。在分割系統上，目前常用的有三種：垂直水平分割、圓心分割、法向量分割。在 3D 軟體中，有三種分割曲面的操作方法：投影分割法、相交分割法、取同位線分割法。本研究在曲面分割上採用相交分割法，在操作指令上，必須先畫分割線，製作分割垂直板，再將垂直板與形體進行分割取出分割線。這些操作對設計分割量很多的形體必須花費許多時間，因此希望可以將步驟自動化。由於分割系統決定於設計者，因此設計者只需先畫出分割線，其餘交由程式來執行，即可以輕易得到曲面形體上的分割線段。另外，執行此程式後，所建立的分割垂直板及所產生的分割線段將會置於指定的物件層(layer)中。分割的程式碼如下：

```

createDisplayLayer -name "L_ref_plane" -number 1 -empty;
createDisplayLayer -name "L_ref_intersectline " -number 1 -empty;
string $ref_planes[];
string $ref_intersectlines[];
string $selected[]=`ls -sl`;
for ($i=1;$i<=size($selected);$i++){
    string $ref_plane[0]= `extrude -name refplane1 -ch true -rn false -po 0 -et 0 -upn 0 -d 0 1 0 -length
    10 -rotation 0 -scale 1 -dl 1 $selected[$i-1]` ;
    $ref_planes[$i-1]= $ref_plane[0];
    select -r ($ref_planes[$i-1]);
    layerEditorAddObjects L_ref_plane;
    string $ref_intersectline[0]= `intersect -n proline -ch true -fs 1 -cos 0 -tol 0.01 ($ref_planes [$i-1])
    "loftedSurface1"` ;
    $ref_intersectlines[$i-1]= $ref_intersectline[0];
    select -r ($ref_intersectlines [$i-1]);
    layerEditorAddObjects L_ref_intersectline;
};

```

骨架擠出。骨架形體主要以擠出(extrude)功能來製作，操作方式先繪製骨架斷面矩形，再與所分割出的骨架中心線擠出骨架形體。但由於 Maya 軟體指令功能限制，使擠出功能只能一次擠出一根骨架，因此造成製作上很耗時，但目前可以取得的開放資源(open source)MEL script 外掛程式可以改良此功能，讓操作上只需選一次斷面矩形與所有的中心線，就可以一次擠出所有的骨架形體。直接應用此外掛程式讓骨架製作的操作更簡易而快速。主要程式碼如下：

```

createDisplayLayer -name "oa_extrude_A" -number 1 -empty;
for ($i = 1; $i < size($selected); $i++) {
    string $curveShape[0] = `listRelatives -s $selected[$i]`;
    int $degree = `getattr ($curveShape[0] + ".degree")`;
    rebuildCurve -kcp 1 -keepRange 0 -d $degree $selected[$i];
    string $surface[0] = `extrude -ch true -rn false -po 0 -et 2 -ucp 1 -fpt 1 -upn 1 -rotation 0 -scale
    1 -rsp 1 -name ($profile[0] + "_" + $selected[$i] + "_extrude") $profile[0] $selected[$i]`;
    $surfaces[$i - 1] = $surface[0];
    select -r ($surfaces[$i - 1]);
    layerEditorAddObjects oa_extrude_A;
    if ($scaps == 1) {
        int $spans = `getattr ($surface[0] + ".spansV")`;
        select -r ($surface[0] + ".v[0]");
    }
};

```



```

catch (`planarSrf -name ($surface[0] + "_cap1") -ch 1 -d 3 -ko 0 -tol 0.00393701 -rn 0
-po 0`);
select -r ($surface[0] + ".v[" + $spans + "]");
catch (`planarSrf -name ($surface[0] + "_cap2") -ch 1 -d 3 -ko 0 -tol 0.00393701 -rn 0
-po 0`);
parent ($surface[0] + "_cap1") ($surface[0] + "_cap2") $surface[0];
setAttr ($surface[0] + "_cap1.inheritsTransform") 0;
setAttr ($surface[0] + "_cap2.inheritsTransform") 0;
}
currentTime -e $time;
}
select -r $profile[0];
return $surfaces;

```

(修改自 open source – Oleg Alexander 的 oaExtrudeAll.mel)

*凹槽製作*。在製作凹槽的過程中，本研究於 4.1 節已提出簡化而更有效的操作方法，主要利用 Nurbs 相交切割法(intersect)取出骨架外框與凹槽線段。這種作法可以讓骨架輪廓資料更精準，因為如果採用 polygon 以用布林運算切割凹槽的方法，將會使原由 Nurbs 製成的骨架形體在轉成 polygon 時產生變形。在操作指令上，先將垂直水平骨架各位移骨架寬度的 1/4 位置來作切割，以得到骨架外框與凹槽線段。骨架移位操作方式可由程式自動執行，但由於自由形體複雜而讓骨架相交位置並不一，每根骨架的凹槽數量不一致，因此設計者必須先手自動選取要切割的骨架，再執行程式來自動切割及將骨架外框與凹槽線段置入指定物件層。主要程式碼如下：

```

createDisplayLayer -name "du_extrude " -number 1 -empty;
layerEditorSelectObjects oa_extrude_A;
string $oriframeA[]=`ls -sl`; select -cl ;
layerEditorSelectObjects oa_extrude_B;
string $oriframeB[]=`ls -sl`; select -cl ;
string $duframeA[]=`duplicate $oriframeA`;
select -r $duframeA; move -r 0 0.1 0;
layerEditorAddObjects du_extrude;
string $duframeB[]=`duplicate $oriframeB`;
select -r $duframeB; move -r 0 -0.1 0;
layerEditorAddObjects du_extrude;

layerEditorSelectUnused;
layerEditorDeleteLayer "";
group -n groupA1;

```

```
xform -os -piv 0 0 0;
createDisplayLayer -name "group_profile" -number 1 -empty;
layerEditorAddObjects group_profile;
```

## 2. 「折板表皮製作」自動化操作步驟

「折板表皮製作」主要操作過程先在 3D 軟體中操作「分割」、「折板創建」、「夾角計算」、之後再匯入 2D 軟體操作「2D 展開」及「排版編號」，以作為輸出圖面。過程中「分割」的執行指令與骨架分割一樣，可以共用前面的程式。而以「折板表皮製作」的操作，主要將繁瑣及常會因人為操作而出錯的「夾角計算」及「2D 展開」兩個步驟撰寫程式。但這兩步驟在李元榮(2005)研究已經在 AutoCAD 轉寫自動化程式，為了解決因轉檔問題所產生的資料誤差，本研究希望將此兩步驟於 Maya 中執行，並程式自動化。另外在折板編號標示過程中，當折板數量大時，需要花很多時間製作編號圖面，另外也會因大量折板展開時造成編號錯誤。因此本研究建議在折板計算角度與 2D 展開之前就先在 3D 環境中給予標示，可以避免操作失誤。除了撰寫前面重要的兩步驟，也希望在將折板進行自動化的「折板編號」。以下對「折板編號」、「夾角計算」、「2D 展開」這些自動化步驟加以說明。

*折板編號*。此步驟主要是可以讓三度空間中的折板都先標示編號，以作為折板展開輸出後可以參考的依據。在 Maya MEL 程式撰寫中，利用對物件命名的方式來作標號標示，先將折板重新命名，再將名稱作為編號以標註(annotation)方式顯示在折板中間，主要程式碼如下：

```
string $selected[]=`ls -sl`;
for ($i=0; $i< size($selected); $i++) {
    rename $selected[$i] obj1;
};
string $selected[]=`ls -sl`;
for ($i=0; $i< size($selected); $i++) {
    float $XYZ[] = `objectCenter -l ($selected[$i])`;
    float $anno_x = $XYZ[0];
    float $anno_y = $XYZ[1];
    float $anno_z = $XYZ[2];
    annotate -tx $selected[$i] -p $anno_x $anno_y $anno_z ($selected[$i]);
    string $r = $i+1;
    string $annotation_name[]={"annotation"+$r};
    parent ($selected[$i]) ($annotation_name);
};
```

*夾角計算*。折板表皮設計過程中，在將三度空間中的折板全部展開於平面上以供輸出之前，必須先計算折板的夾角。目前的操作都必須先將 3D 模型檔案轉入 2D 軟體 AutoCAD 來進行角度計算。而李元榮(2005)已將此操作撰寫 AutoCAD 自動化程式，但程式因不同軟體轉檔

之間導致資料產生誤差。為了解決轉檔失誤問題，本研究建議將此步驟在 3D 軟體中執行。在 Maya MEL 程式撰寫過程中，先應用數學程式將折板兩個三角形之間的夾角算出，再撰寫成自動化程式，設計者只要選取折板，再執程式後，就可從 Maya 的 script editor 得到對應每片折板編號的夾角數值(圖 4-33)。為了確認所得到的角度數值為正確，本研究將所得到的數值與利用 AutoCAD 算出的角度進行比對，經過重複驗證，精準度達小數點六位。以下為主要的 MEL 程式碼：(完整程式詳見附錄四)

```

string $selected[]=`ls -sl`;
for ($i=0; $i< size($selected); $i++) {
    select -r ($selected[$i] + ".vtx[0:3]");
    string $selectedCV[] = `ls -sl -fl`;
    float $pos3[] = `pointPosition -w $selectedCV[3]`;
    float $point_a_1_0 = $pos3[0];
    float $point_a_1_1 = $pos3[1];
    float $point_a_1_2 = $pos3[2];
    .....
    vector $plane_a_line_uv1=<<$point_a_2_0-$point_a_1_0, $point_a_2_1-$point_a_1_1,
    $point_a_2_2 - $point_a_1_2>>;
    vector $plane_a_line_uv2=<<$point_a_3_0-$point_a_1_0, $point_a_3_1-$point_a_1_1,
    $point_a_3_2 - $point_a_1_2>>;
    vector $plane_a_uv = << ($plane_a_line_uv1.y) * ($plane_a_line_uv2.z) - ($plane_a_line_uv1.z)
    * ($plane_a_line_uv2.y), - (($plane_a_line_uv1.x) * ($plane_a_line_uv2.z) - ($plane_a_line_uv1.z)
    * ($plane_a_line_uv2.x)), ($plane_a_line_uv1.x) * ($plane_a_line_uv2.y) - ($plane_a_line_uv1.y)
    * ($plane_a_line_uv2.x)>>;
    .....
    float $a_dot_b = ($plane_a_uv.x) * ($plane_b_uv.x) + ($plane_a_uv.y) * ($plane_b_uv.y) +
    ($plane_a_uv.z) * ($plane_b_uv.z);
    float $length_plan_a_uv=sqrt ((($plane_a_uv.x) * ($plane_a_uv.x)) + (($plane_a_uv.y) *
    ($plane_a_uv.y)) + (($plane_a_uv.z) * ($plane_a_uv.z)));
    float $length_plan_b_uv=sqrt ((($plane_b_uv.x) * ($plane_b_uv.x)) + (($plane_b_uv.y) *
    ($plane_b_uv.y)) + (($plane_b_uv.z) * ($plane_b_uv.z)));
    float $angle_between_vector=acos($a_dot_b/($length_plan_a_uv*$length_plan_b_uv));
    float $angle_between_plane=180-(rad_to_deg($angle_between_vector));
    print ("(" + $selected[$i] + "=" + $angle_between_plane + ")");
}

```

**2D 展開**。在表皮的製作過程中，展開(unfold)屬重要的步驟之一，主要是將 3D 軟體建置的 3D 模型資料，經由展開使每個單元攤平於平面上，成為 2D 資料傳送到 CAM 機器輸出。目前工業設計常用的設計軟體中，很多都具有展開功能，如 Rhino，Solidworks 及近年開發得

相當完整的 Lamina，同時常用的 3D 軟體如 FormZ, 3D Max 也附加了此功能。另外一些專業的展開軟體如日本為摺紙玩具所開發的 Pepakura\_designer 軟體也被用來作為展開的轉化功能。此外，李元榮(2005)也將 AutoCAD 的對齊(align)功能撰寫程式自動化，讓折板的展開步驟得以更快速及精確。然而此程式遇到轉檔上的困擾，原因是自由形體曲面變化複雜而導致從 3D 軟體轉檔至 2D AutoCAD 時因判別式太多使參考點無法定義。為了減少轉檔問題，本研究改變此步驟自動化的環境，希望先在 3D 軟體中就可以進行展開自動化過程。在 Maya MEL 程式撰寫過程中，先以數學程式計算將折板其中一邊三角板展開於一個平面上，展開時將按照編號依序編排，而且也標註出折板編號。接著才將另一邊上折或下折的三角折板展開於平面上(圖 4-34)。由於展開後的折板也具有編號名稱，因此可方便對應到原在空間中的折板位置。展開過程的程式碼如下：(完整程式詳見附錄四)

```

string $selected[]=`ls -sl`;
for ($i=0; $i< size($selected); $i++) {
    float $r = $i+1;
    string $anno[] = {"annotation"+$r};
    parent -w ($selected[$i]);
    delete $anno;

    select -r ($selected[$i] + ".vtx[0:2]");
    select -tgl plane.vtx[0:2];
    snap3PointsTo3Points(0);

    select -r ($selected[$i]);
    move -r 0 0 (10*$i) ;
    select -r ($selected[$i] + ".vtx[0:3]");
    string $selectedCV[] = `ls -sl -fl`;
    float $pos0[] = `pointPosition -w $selectedCV[0]`;
    float $anno_x = $pos0[0];
    float $anno_y = $pos0[1];
    float $anno_z = $pos0[2];
    annotate -tx $selected[$i] -p $anno_x $anno_y $anno_z ($selected[$i]);
}
.....

```

對於以上每個步驟的程式碼，都在 Maya 中製成圖像指令(icon)(圖 4-35)，讓設計者在操作過程中可直接選取執行。這些步驟並非一連串的執行程式，主要讓設計者在過程中可以因為設計的修改，有機會還原每個自動化步驟。另外也可以配合不同設計需求，來執行不同的自動化程式。



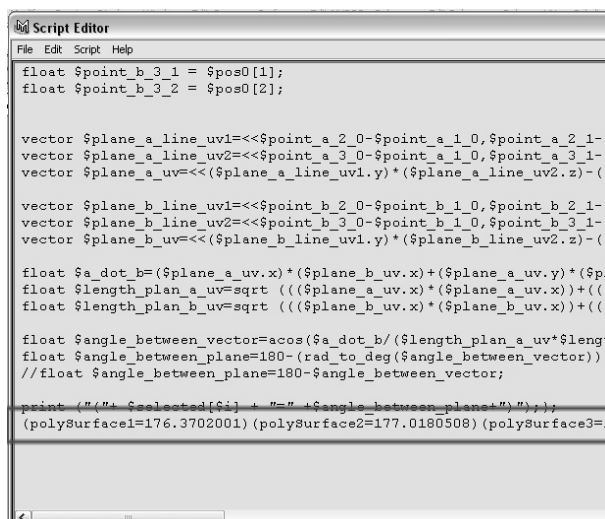


圖 4-33 夾角數值

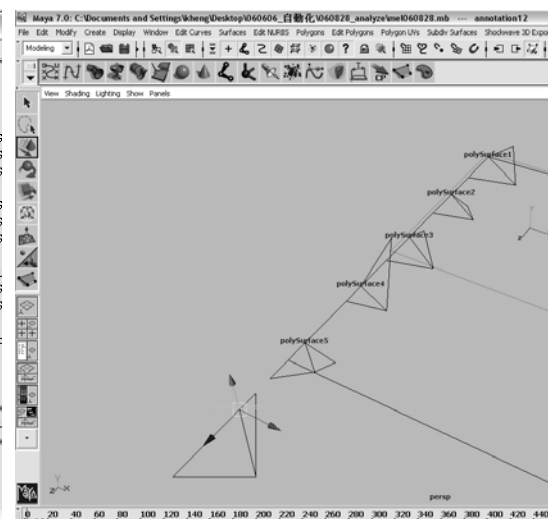


圖 4-34 折板展開並依編號編排於平面上

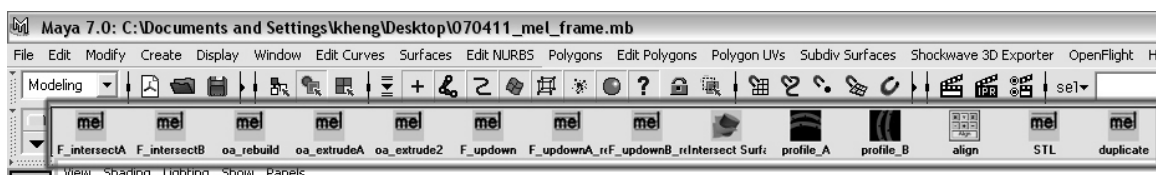


圖 4-35 Maya MEL 程式製成圖示指令(icon)

#### 4.2.2 自動化程式應用之驗證

經過程式撰寫，「骨架製作」與「折板表皮製作」的操作步驟將更簡化及快速，為了檢視這些自動化程式的使用性，以兩個設計案例的操作來驗證自動化程式之應用：

1. 座椅設計 (骨架模型製作)
2. 高第展場設計案 (折板展櫃製作)

##### 座椅設計

此為一個以骨架作為主要形體的座椅設計，主要利用雷射切割木板製作比例 1:5 的模型。過程中應用骨架製作的自動化程式輔助設計，以下敘述此設計在設計過程中如何應用自動化程式來輔助。

**分割。**設計者在此設計的骨架系統採用不規則的圓心分割(圖 4-36)，當分割線決定後，就執行「分割」的自動化程式，順利得到圖 4-37 的骨架中心線。

**骨架擠出。**當設計者得到骨架中心線後，就繪製骨架斷面，希望可以由「骨架擠出」的外掛程式快速將骨架形體擠出(extrude)。然而，卻出現骨架方向錯誤的問題(圖 4-38)，這是因為程式無法將斷面依非垂直水平的骨架中心線法向量位置來擠出形體。從這步驟發現此程式有必要進行進一步改善，以適合非垂直水平骨架的製作。

**凹槽製作。**此設計形體僅由主要垂直向的骨架組成，只有中間座位區域才有橫向骨架穿越，因此須處理骨架之間的凹槽數量很少，但設計過程依然利用「凹槽製作」的自動化程式快速產生骨架外框與凹槽位置的線段(圖 4-39)。

接著這些線段匯入 AutoCAD，排版於 60\*40cm 雷射切割材料大小的版面(圖 4-40)，並進行編號，同時也製作編號標示圖面。最後組裝完成的模型如圖 4-41 所示。從以上操作過程可知，雖然在製作骨架步驟必須以手動方式製作，但分割骨架及製作凹槽的自動化程式已經讓設計者在操作過程中免於繁瑣的重複性操作，而且經設計者計算，以自動化取代手動製作骨架，得以讓他節省 5 倍操作時間，而且也更精準。

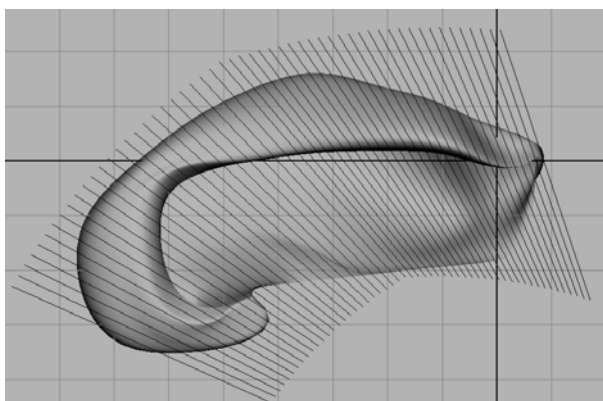


圖 4-36 設計師繪製骨架系統分割線

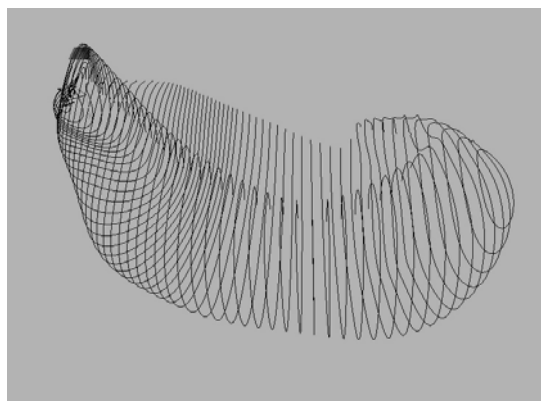


圖 4-37 利用分割自動化程式取得骨架中心線

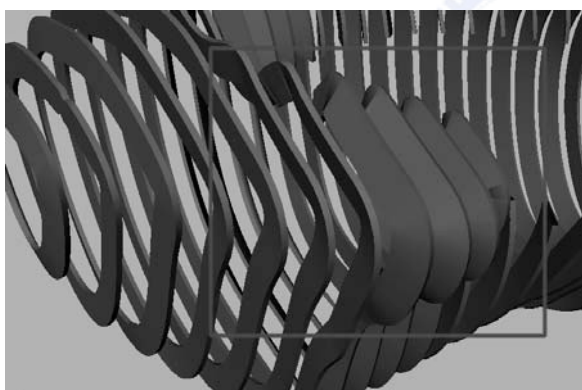


圖 4-38 對於非垂直水平骨架擠出錯誤方向的骨架形體

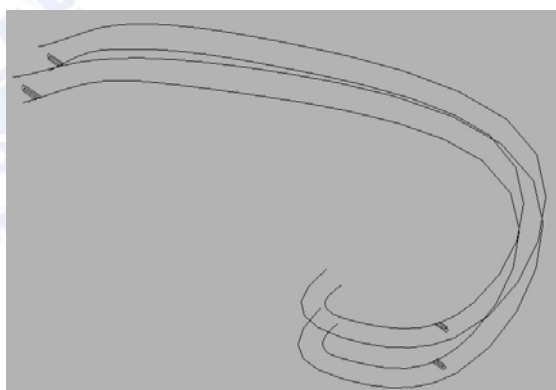


圖 4-39 利用凹槽製作自動化程式得到骨架外框

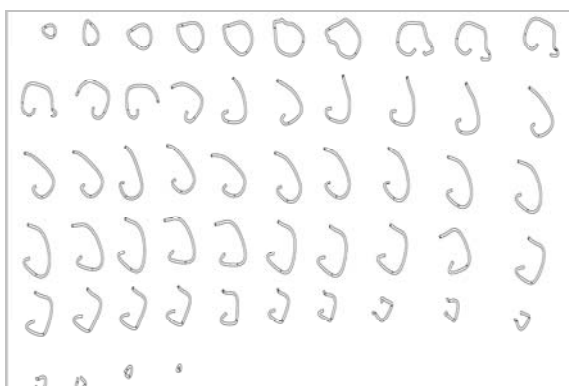


圖 4-40 AutoCAD 骨架編號與排版

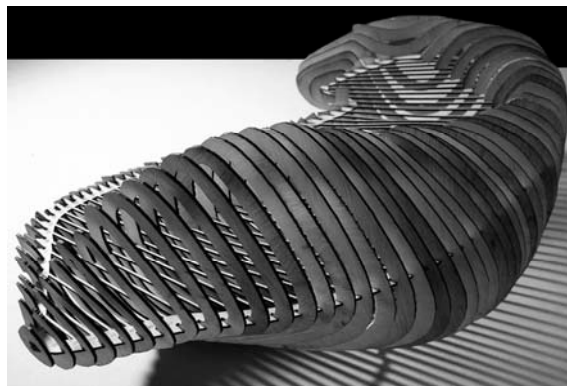


圖 4-41 組裝完成比例 1:5 座椅模型

### 高第展場設計案

高第展場設計案中設計了由不規則三角板製成的木作展示櫃(圖 4-42)。為了現場搬運與組

裝，將 8m\*9m 的 L 型三角板展櫃分割成九組櫃子單元來個別施作。以下敘述此展櫃單元在設計與建造過程中如何應用自動化程式來輔助。

*分割*。為了讓三角板表皮可以在組裝時精準定位，在切割櫃子的骨架時，除了考慮骨架支撐功能外，特別為每塊三角板的定位與固定位置來分割，主要作法於三角板接觸的頂點位置就切割一根骨架。因此當櫃子三角板數量較多時，所切割的骨架數量也會增加。設計者依設計需求畫完設計分割線後(圖 4-43)，就執行「分割」的自動化程式，得到圖 4-44 的骨架輪廓。這些骨架輪廓線直接匯出.DXF 檔案到 AutoCAD 標註尺寸，排版編號以供裁切。

*折板編號*。由於每一組展櫃單元共有 50 幾片三角板，如需每一片手動編號需耗費大量時間，因此過程中利用「折板編號」自動化程式將每塊三角板自動編號，並製作編號圖示圖，作為組裝時每塊三角板位置可以對照的依據(圖 4-45)。

*2D 展開*。此設計主要材料為木作，施作上將每片折板以三角形切割。在操作過程中執行「2D 展開」自動化程式，就可以將大量的三角板全部攤平於平面上，而且自動編號(圖 4-46)。

接著將骨架輪廓與三角板檔案匯入 AutoCAD，編排入 122\*244 夾板大小的範圍中，標註尺寸後進行木作裁切。裁好的骨架與三角板在工廠進行組裝，此時編號圖示圖面扮演重要角色，每片具編號的三角板需根據圖面上所標示的位置依序組裝(圖 4-47, 4-48)。最後組裝完成的三角板展櫃如圖 4-49 所示。從各步驟分析可知，此設計案無骨架凹槽設計，折板直接以三角形切割，不需計算角度，但因為所撰寫的程式以每一步驟作成指令圖示，所以可以因應各種設計需求來應用，以此設計案為例，在部分步驟的需求下，也可以應用到自動化程式的輔助，簡化製作過程。

從上述兩個設計案例操作自動化步驟的結果，驗證出本研究初步撰寫的程式：分割、凹槽製作、折板編號、2D 展開，皆可以滿足骨架與表皮設計操作的需求，但對於夾角計算的自動化程式只有做過多次測試而在此兩設計案例中沒機會被應用到，因此仍需再未來做進一步驗證其應用性。此外對於骨架擠出外掛程式則具有應用上的局限，希望下一步可以進行改善。

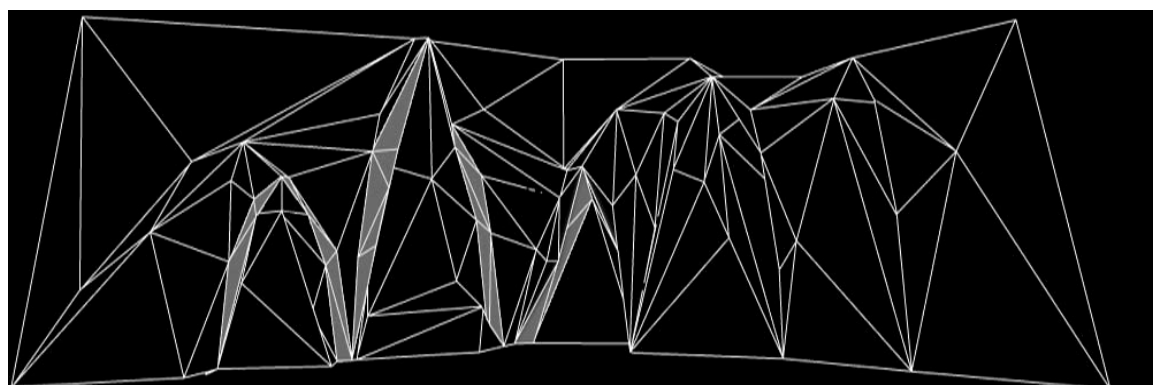


圖 4-42 表面全由不規則三角板製成的展示櫃設計

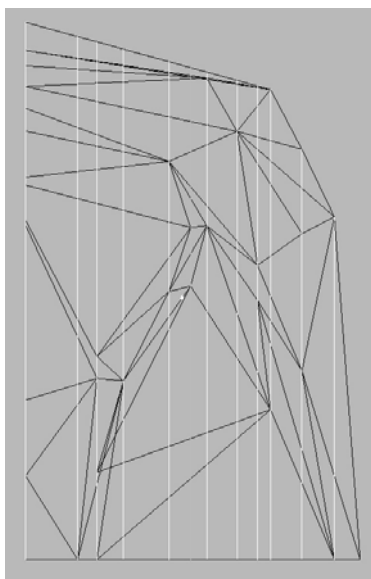


圖 4-43 設計師繪製骨架分割線

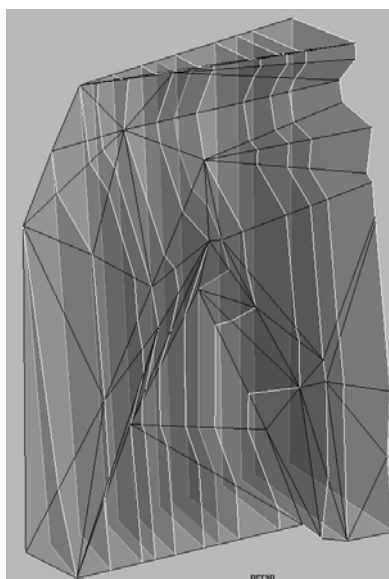


圖 4-44 利用分割自動化程式取得骨架輪廓

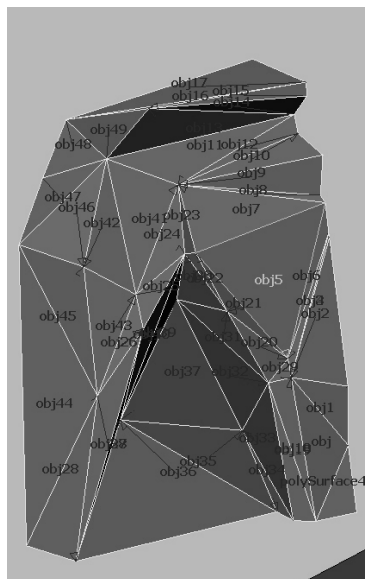


圖 4-45 利用折板編號程式自動編號

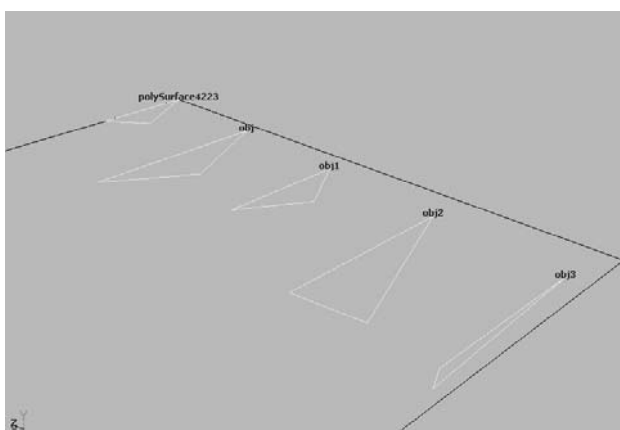


圖 4-46 利用 2D 展開自動化程式將三角板攤平於平面上



圖 4-47 現場依編號標示圖進行組裝

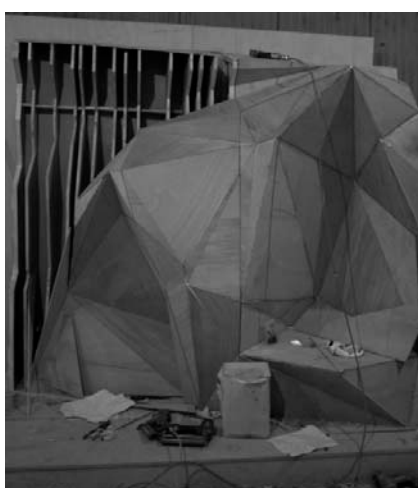


圖 4-48 工廠組裝過程



圖 4-49 組裝完成的三角板展櫃