

電腦模型與實體密合度的探討與應用

鄧志堅 劉家麟 高全樹 陳俊清 賴宜和

大葉大學工業工程與科技管理學系

51591 彰化縣大村鄉學府路 168 號

摘要

本研究使用逆向工程的方法搭配 MicroScribe G2 進行真人頭顱量測建立電腦模型，其作法為使用矽膠彈性土建立頭顱負模後使用 MicroScribe G2 取點建立電腦模型，之後產出 RP (rapid prototype) 的安全頭盔，並請受測者穿戴。為了解哪些因子影響電腦模型和實際物體的密合度，以相親相愛木雕作樣本並以田口 L_{16} 實驗作實驗和分析，實驗的 4 個因子為：操作人員、SVD (singular value decomposition) 的點數、結合點重覆量測的次數和檢驗點的重複次數。量測的標準為檢驗點差異的 SN 比。SN 比越高表示密合度愈好。本實驗指出操作人員、SVD 的點數和檢驗點的重複次數為顯著因子。其中 SVD 的點數為 6 時和檢驗點的重複次數為 5 時產生的密合度最佳。我們用 SN 比所產生的 S/N ratio 得知前述兩個因子的水準也能產生最穩定的結果。

關鍵詞：逆向工程，SVD，電腦模型

A Matching Index between a Computer Model and an Artifact

JYHJENG DENG, CHIA-LIN LIU, CHUAN-SU KAO, CHUN-CHIN CHEN and YI-HE LAI

Department of Industrial Engineering & Technology Management, Da-Yeh University

No. 168, University Rd., Dacun, Changhua, Taiwan 51591, R.O.C.

ABSTRACT

Reverse engineering with MicroScribe G2 was used to measure the negative mold of a human skull to construct a computer model thereof in Rhino, a task accomplished by using special clay to obtain a negative impression of the skull and measurement by MicroScribe G2 to build the model. Later a rapid prototype (RP) of ABS (acrylonitrile butadiene styrene) material was created for a helmet to fit the head studied. To understand the factors influencing the match between the computer model and its artifact, "Love each other," a wooden sculpture, was used as a sample to analyze data obtained by Graceo-Latin Square Design and the Taguchi method. The experiment showed that the significant factors were the operators, the SVD (singular value decomposition) number and repetitions of check points.

Key Words: reverse engineering, SVD, computer model

一、緒論

(一) 研究背景和重要性

產品的製作時間縮短和多元化驅動著設計與生產者們調整作業流程。就製作時間而言光學式儀器可節省人工操作時間；然而就精密度而言少了人工操作量測是否較優良？這是有待商榷的。並且由於光學儀器無法重複量測定點位置的座標，因此在作電腦模型與實體的密合度上是有困難的。機械式儀器可以重複在定點量測，因此可以比較在檢驗點上電腦模型與實體之間密合的情形。機械式的量測儀器應用很廣，文獻上有使用在不會活動的大體手臂（cadaveric arm）以及較難活動的座輪椅病患身上（wheelchair users）進行實際量測，Feathers [12] 指出其效果接近光學儀器，Ferrario [13] 更進一步的應用在活動量更大的唐氏兒病患（Downs syndrome）探討依然有不錯的效果。由於光學式儀器無法提供特定點座標供檢驗，本研究以機械式儀器取點的 MicroScribe G2 進行電腦模型與實體的密合度研究，並指出統計上影響密合度的顯著因子，並以最佳的因子水準組合來製作真人頭顱的電腦模型，且選用 ABS 材料，設計並 RP 製作客製化安全頭盔作為它的應用。本研究以找出一個指標來衡量 3D 的電腦模型和實體的相似度為首要目的。

二、文獻探討

逆向工程可將實體用機械、雷射或光學的手段將物件的外型建構在電腦上 [2, 18]。雖然光學的掃描可以接近 $10 \mu m$ 的精密度來複製物件的外型，但是其價格相當昂貴（約 2 至 3 百萬台幣），因此當外型精密度要求不高時，且實體是靜態且可在其上觸控時，機械式的 MicroScribe 三維數位化儀就成了一項很好的選擇。雖然機械式的數位化儀有精密的探頭（約有 0.03 mm 的精密度），但由於取點數目少，所以所建構的曲面與實際的曲面會有較大誤差。本論文主要是研究有哪些因子是影響密合度並進一步指出這些影響因子的水準值應設為多少，其對密合度的結果是最好的。我們實驗的對象是「相親相愛」木雕。我們並且用真人的頭做一個安全內盔來證實本結果的可用性。鍾宜達 [4] 探討光學掃描所引發的密合度、甚至有些軟體如 rapidform XOR2、polyworks 等都有設計方法來量測掃描的雲點和逆向建模的差異。但是機械式的逆向建模與實體的密合度文獻倒是沒有。

(一) 產品的發展演進

處在產品生命週期短暫的環境下，設計師們必須輔以一些方法來壓縮開發流程，逆向工程是常使用的方式。我們這次所設計的安全頭盔乃是依據 Carruthers [8] 所提出的內盔設計範例，配合三位受測者的頭顱大小（各為大、中、小三種尺寸）來測試其可行性。其中外型上我們作大幅的修改，以避免侵犯作者的智慧財產權。

(二) 量測儀器

在考量成本以及先天條件的限制下，使用光學儀器作為逆向工程的外型量測工具需要藉由複雜的演算法進行影像校正的工作，現今設備較低廉的相對儀器為機械式儀器。這些量測儀器的功效及優缺點比較，曾在文獻上被探討。如以人頭模型為例（石膏材質 plaster），用機械式儀器（microScribe 3DX）、電腦斷層掃描（CT scan: computer tomography）、雷射掃描（laser scan）、立體攝影測量學（stereo photogrammetry）進行非對稱的頭蓋骨之量測並探討之間的優缺點 [10]。若能彼此相輔相成消除本身的限制或是簡化其製作流程，一方面可以減輕設計者的負擔，讓設計者們能夠更致力於設計上；另一方面也可以相對提升產品的競爭力。本研究使用的工具是機械式儀器，優點為適用不同材質和不同形狀的物體分別為：楊復勝 [3] 使用陶瓷材質的小狗模型頭顱部分、蕭子程 [5] 使用塑膠材質的人體手部量測、Sforza [17] 量測人體耳朵部份；使用機械式儀器缺點為需要人工操作。

本研究使用 Arun [7] 提出的 SVD 演算法作為影像結合的工具，其特色是除了座標系統轉換外量測誤差也一並考慮，將演算法原本複雜的目標式作簡化，其目標式如公式(1)所示：

$$P_i' = RP_i + T + N_i \quad (1)$$

其中 R 代表旋轉（rotation）、T 代表位移（translation）、 N_i 代表誤差向量，其目的乃是找出 R 和 T 使誤差向量 N_i 地長度平方合為最小，如公式（2）所示：

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N \left\| P_i' - (RP_i + T) \right\|^2 \quad (2)$$

將公式（2）中 R 和 T 的問題拆解，即分別求解 R 值和 T 值，首先藉由公式（3）說明 R 值的求解過程：

$$\text{Min } \sum^2 = \sum_{i=1}^N \|q_i' - Rq_i\| \quad (3)$$

其中 $\{q_i'\}$ 和 $\{q_i\}$ 為 $\{p_i'\}$ 和 $\{p_i\}$ 中心化 (centralize) 後的結果。首先，令 H 如公式 (4)

$$H = \sum_{i=1}^n q_i (q_i')^t \quad (4)$$

Hardle [14] 提出從 SVD 找出 H 的方法，如公式 (5)

$$H = U\Lambda V^t \quad (5)$$

令

$$X = \Lambda U^t \quad (6)$$

若 X 行列式值 $\det(X)$ 為 +1 時， $\hat{R} = X$ ；若 $\det(X)$ 為 -1 時，將 X 的第三行改變符號。求解出 R 值之後 T 值可藉由公式 (7) 計算出來。

$$\hat{T} = p' - \hat{R}p \quad (7)$$

其中 p 代表 $\{P_i\}$ 的中心值， p' 代表 $\{p_i'\}$ 的中心值。

三、研究方法

本研究以三維量測結果應用矩陣分解做為電腦繪圖的圖像結合為主軸，並對儀器所取得的點資料進行分析找出影響模型準確度的量測因子，最後製作出產品並驗證電腦模型的精確度。以下為本研究主要內容：

1. 找出影響模型準確度的量測因子

為了知道哪些因子會影響實際體物件與電腦模型的密合度，本實驗以北歐木雕相親相愛為模型（如圖 1）來作 4 個因子的 L_{16} 田口實驗（又稱為希臘_拉丁方格實驗）[16]。選用木質模型的理由為在第二章第（二）節中提及該量測儀器試用多樣材質。本研究欲探討以及驗證該機器應用的廣度，因此特別挑選尚未有相關文獻產出的材質（木質、金屬）之其中一項，並將該木雕模型命名為相親相愛。

2. 模型結合

藉由經過取點後搭配 Arun [7] 演算法將影像結合即完成電腦模型繪製。本研究的影像結合方法為第二章第（三）節提及的 SVD 演算法。



圖 1. 相親相愛木雕

（一）因子參數設定

依照前述的希臘_拉丁方格的實驗設定 2 個 Treatments（檢驗點重覆量測的次數設定為 1、2、3、5 次，和結合點的數目設定為 4、5、6、8 點），還有 2 個 Blocks（分別為結合點重覆量測的次數設定為 1、2、3、5 次，以及操作人員的人選設定為甲、乙、丙、丁），完成後就可以做一個希臘_拉丁方格如表 1 所示。羅馬字母表示 Treatment1 的水準。Treatment1 中的水準 1 為 (A) 表示檢驗點的重覆次數為 1，水準 2 為 (B) 表示重覆次數為 2，水準 3 為 (C) 表示重覆次數為 3，水準 4 為 (D) 表示重覆次數為 5。希臘字母表示 Treatment2 的水準。因此 Treatment2 中的水準 1 為 (α) SVD4（表示 SVD 的結合點數目為 4 點），水準 2 為 (β) SVD5，水準 3 為 (γ) SVD6，水準 4 為 (δ) SVD8。結合點的功用在於結合 2 個不同的座標系統量測的點在一起。例如有兩組座標值 (A、B 兩組) 分別在不同的座標系統量測，藉由結合點可將 A 組座標值轉移到 B 組座標值所在的座標系統上。檢驗點的功用在於比較轉換方法的績效。例如有兩組座標值 (A、B 兩組) 分別在不同的座標系統量測，其上各有一組檢驗點。在經過座標轉換後，這兩組檢驗點應該一模一樣如果沒有量測誤差存在。但是由於量測一定會有誤差，因此這兩組檢驗點會不一樣。不同的轉換方法造成的誤差不一樣。我們的目的就是找出最佳的轉換方法使得誤差達到最小。為求實驗穩定，我們重複 L_{16} 實驗 2 次。檢驗點的數目為 15 個（男生 8 點，女生 7 點）。

以下說明實驗步驟 (Block1、Block2、Treatment1、Treatment2) = (1, 1, A, α)。其餘的實驗以此類推。

表 1. 希臘拉丁方格實驗設計表

| Block 1 \ Block 2 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------------------|----|----|----|----|
| 1 | Aα | Bβ | Cγ | Dδ |
| 2 | Bδ | Aγ | Dβ | Cα |
| 3 | Cβ | Dα | Aδ | Bγ |
| 4 | Dγ | Cδ | Bα | Aβ |

Setp1 A 區 (雕像女生部分)

4 個基準點 SVD4 (以綠色表示), 取一次; 7 個檢驗點 (以紅色表示), 取一次; 由其中一組組員甲量測。如圖 2(a) 所示。

Setp2 B 區 (雕像男生部分)

4 個基準點 SVD4, 取一次; 8 個檢驗點, 取一次; 由同一組組員甲量測。如圖 2(b) 所示。

Setp3 比較績效

將 A 區以及 B 區的基準點和檢驗點再次量測 (如

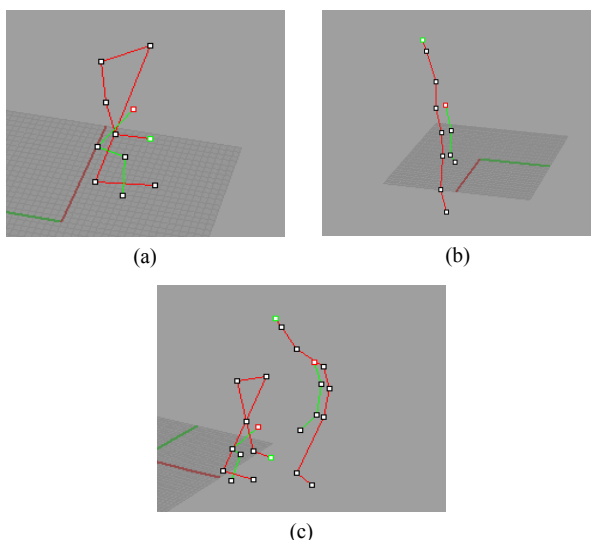


圖 2. 希臘拉丁方格實驗量測結果

圖 2(c)), 各量一次並經由 Arun [7] 所使用的方法作座標轉換將圖 2(a)~2(b) 中的檢驗點轉入圖 2(c) 的座標系統, 與圖 2(c) 的檢驗點做比較並計算差異。此時的差異為 D_{ij} , 形成一個 15×15 矩陣, 我們取矩陣的上三角的值計算 S/N 比。其中 S/N 比採用望小特性 (smaller is better) 如公式 (8) 所示 [6]:

$$SN = -10 \log \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^{14} \sum_{j=i+1}^{15} D_{ij}^2 \right) \quad (8)$$

其中 $m = \frac{1}{2} \times 14 \times (14 + 1) = 105$ 。SN 越大表示密合度越好。整個實驗的 S/N 值如附錄 1~附錄 2。使用 MINITAB 軟體將 2 次 L_{16} 求得之 S/N 值進行 ANOVA 分析, 結果如表 2 所示。由表 2 可知 block2、treatment1 和 treatment2 這三個因子是顯著的 ($P < 0.05$)。這指明操作員、檢驗點的重複量測次數和結合點的數目是顯著因子。接著我們分析三個因子的水準效果, 發現操作員為 C 時, 檢驗點重複量測 5 次、SVD6 時所產生的 S/N 比最高, 即結果最為穩定。並且其平均值也最高, 表示密合度最佳 (如表 3 所示)。在表 3 中 treatment2 代表 SVD 的種類, 其中第 3 水準 (也就是 SVD6) 的 SN 最高 (15.75) 表示其對密合度的貢獻最佳。圖 3 說明用公式 (8) 所分析的 SN ratio, 此時的 SN ratio 表示實驗值的穩定度, SN ratio 的值越高表示其穩定度越高。例如 treatment 2 中的第 3 水準 SVD6 的 SN ratio 為 23.9 是所有水準的最高值。表示 SVD6 比其他 SVD 更為穩定。因此 SVD6 不僅產生密合度最佳的結果, 也是最穩定的結果。並且由表 2 的 p value 值 (0.026) 得知, 本結果在統計上是顯著的。Treatment 1 中的結合點重複量測 5 次產生密合度最佳的結果, 並且也是最穩定的結果, 也可以類似的得到。

表 2. 訊號噪音比的變異數分析

| Source | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F | P |
|--------------|----|---------|---------|---------|--------|-------|
| treatment2 | 3 | 2.4993 | 2.4993 | 0.83309 | 15.03 | 0.026 |
| block1 | 3 | 0.9728 | 0.9728 | 0.32428 | 5.85 | 0.090 |
| block2 | 3 | 18.0122 | 18.0122 | 6.00408 | 108.29 | 0.001 |
| treatment1 | 3 | 16.8545 | 16.8545 | 5.61817 | 101.33 | 0.002 |
| Residual Err | 3 | 0.1663 | 0.1663 | 0.05544 | | |
| Total | 15 | 38.5052 | | | | |

表 3. 平均值的反應

| Level | treatment2 | block2 | treatment1 |
|-------|------------|--------|------------|
| 1 | 13.89 | 13.78 | 12.65 |
| 2 | 14.86 | 12.93 | 14.34 |
| 3 | 15.75 | 17.76 | 15.42 |
| 4 | 15.39 | 15.43 | 17.50 |
| Delta | 1.86 | 4.83 | 4.85 |
| Rank | 3 | 2 | 1 |

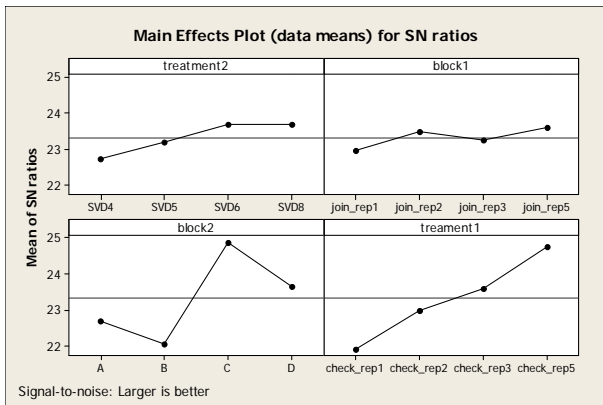


圖 3. 各因子之 S/N 平均值

(二) 模型結合

本研究僅以男生部位的點 (Data1) 轉換至女生部位的座標系統說明模型的結合模型的結合。首先量測女生部位的點 (Data2) 之後在不同座標系統下量測男生部位的點，各取其六點 (Data1：藍色 Data2：綠色)，其結合前的結果如圖 4(a)。求出將 Data1 轉至 Data2 所需的角度和位移就可以將男生部位的點轉至女生部位的座標系統並與之結合，結果如下：

$$Data1 = \begin{bmatrix} -17.719 & 12.945 & 7.741 \\ -17.715 & 13.172 & 12.876 \\ -23.312 & 13.238 & 17.841 \\ -17.941 & 11.878 & 28.058 \\ -19.580 & 11.224 & 41.475 \\ -17.428 & 10.278 & 50.725 \end{bmatrix},$$

$$Data2 = \begin{bmatrix} -28.3360 & -5.6300 & 7.1060 \\ -28.3140 & -5.5280 & 12.1140 \\ -28.2020 & -11.0090 & 17.3250 \\ -26.5660 & -5.3580 & 27.6600 \\ -25.3840 & -6.7890 & 41.3690 \\ -24.1030 & -4.2620 & 50.1760 \end{bmatrix}$$

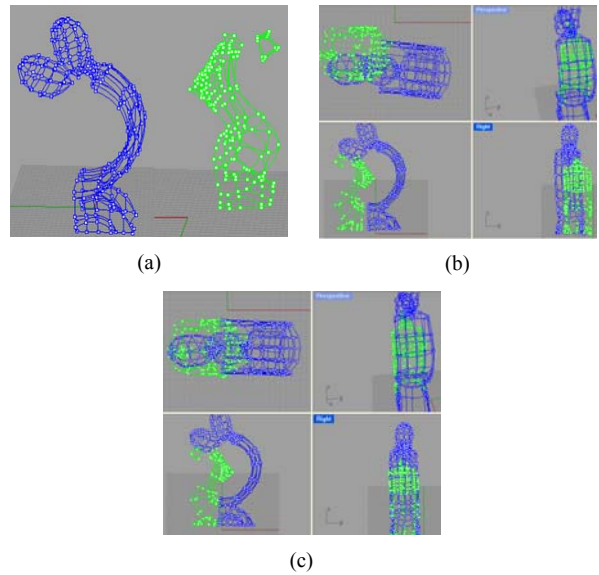


圖 4. 相親相愛電腦模型

再利用公式 (1) ~ (7) 可以得到 R (旋轉矩陣) 和 T (位移矩陣)。如下所示：

$$R = \begin{bmatrix} -0.0083 & -0.9994 & 0.00345 \\ 0.9997 & -0.0076 & 0.0232 \\ -0.0229 & 0.00346 & 0.9991 \end{bmatrix},$$

$$T = \begin{bmatrix} -15.7725 \\ 11.9930 \\ -1.3253 \end{bmatrix} \tag{9}$$

其中 R 矩陣可以藉由 John Craig 的公式得到旋轉角度向量 R_1 [9]

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1.9861 \\ 1.3115 \\ 90.4784 \end{bmatrix} \tag{10}$$

即 Data1 對 Data2 需旋轉 X=1.9861 度、Y=1.3115 度、Z=90.4784 度 (如圖 4(b))，其中 Y 軸部分因為軟體本身 (Rhino) 的設計問題要改變符號，即 Y=1.3115 變更為 Y=-1.3115。此時 Data1 和 Data2 呈現平行的狀態，透過公式 (9) 求出位移向量 T 使得 Data1 和 Data2 間的距離消失，即完成定位如圖 4(c) 所示。男生部位的點經座標轉換後的結果為 $Data2a = R \times Data1 + T$ ，Data2a 的值如下：

$$Data2a = \begin{bmatrix} -28.2946 & -5.6392 & 7.2631 \\ -23.3446 & -5.5179 & 12.4015 \\ -28.1927 & -10.9988 & 17.4926 \\ -26.5262 & -5.3824 & 27.5307 \\ -25.3966 & -6.7052 & 40.9510 \\ -24.1503 & -4.3325 & 50.1110 \end{bmatrix}$$

將 Data2-Data2a 比較差異，其量測誤差結果如下：

$$Data2 - Data2a = \begin{bmatrix} -0.0414 & 0.0092 & -0.1571 \\ 0.0306 & -0.0101 & -0.2875 \\ -0.0093 & -0.0102 & -0.1676 \\ -0.0398 & 0.0244 & 0.1293 \\ 0.0126 & -0.0838 & 0.4180 \\ 0.0473 & 0.0705 & 0.0650 \end{bmatrix}$$

四、產品繪製

爲了驗證上述理論在實際產品的效果爲何，本研究以安全頭盔作爲驗證產品。不論是光學還是機械式儀器都必須讓受測物體呈現靜止狀態。爲了消除此限制本研究採用製作產品負模的方式使得受測物體能夠固定，之後然後根據前述研究方法經希臘_拉丁方格的實驗分析得知的最佳量測因子水準組合獲取點資料並在 Rhino 上建立電腦模型，最後利用 Rhino 和 SolidWorks 可讀取的檔案類型進行模型實體化的工作將模型轉成可以製作出 RP 的資料（使用 SolidWorks 的主要原因爲檢驗電腦模型是否有缺陷如破洞）。本研究的產品繪製流程如圖 5 所示。

(一) 負模製作

本研究石膏負模製程參考鍾宜達 [4] 所提出的頭模製程以及陽光社會福利基金會壓力面具 [1]，如圖 6(a)所示：將浴帽套在受測者頭上，包住頭髮，然後將石膏繃帶（如圖 6(b)）加水鋪在浴帽上，此時須施加力量以確保外型的精確，完成頭部負模。

用石膏繃帶作成的負模必須注意其厚度，如果太薄將影響堅硬程度以及重複使用的次數；其二、完成後發覺利用石膏繃帶做出的負模表面不是很平坦（由圖 6(a)可見浴帽產生的皺摺）。因此捨棄浴帽改用襪套（外科手術用上石膏時作爲皮膚和石膏的介面材料，如圖 6(c)所示），並將石膏繃帶的厚度增加補強負模硬度（如圖 6(d)所示）。此時利用石膏繃帶做出的負模表面皺摺獲得改善。爲了能夠獲得更準確的模型，參考些陽光社會福利基金會建議用矽膠彈性土（聚矽氧烷矽膠），該物質的特性爲能夠更加貼近皮膚、彈性佳，

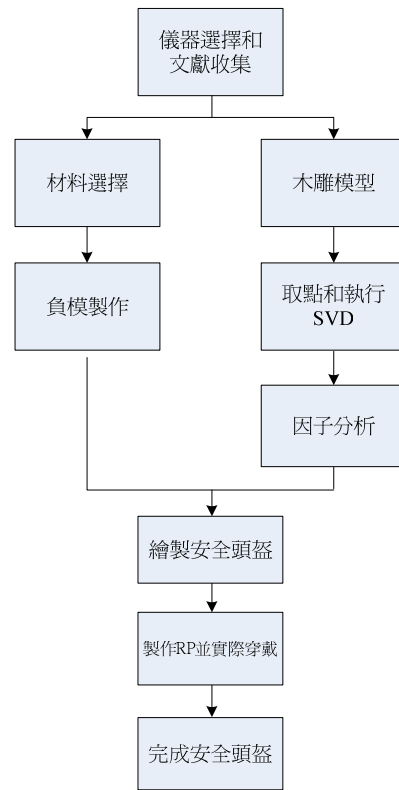


圖 5. 產品繪製流程

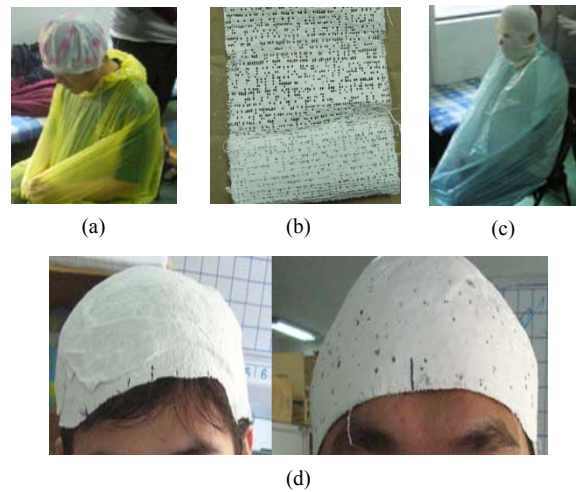


圖 6. 石膏負模製程

其取模效果如圖 7 所示。

經實際實驗發覺矽膠彈性土用於面部、頭部取模由於具彈性以及硬度仍顯不足，所以仍然需要搭配石膏繃帶定型，以下是改用聚矽氧烷矽膠搭配石膏繃帶的取模過程（步驟如圖 8）：



圖 7. 聚矽氧烷矽膠取模結果



圖 8. 聚矽氧烷矽膠負模製程

1. 將保鮮膜套在受測者頭上包住頭髮（目的為方便製作負模，可改用其他材質替代）。
2. 將矽膠彈性土鋪在受測者頭，將石膏繃帶加水鋪在矽膠彈性土上完成頭部負模。

(二) 實體化

完成負模製作取得外型點資料後便可使用繪圖軟體建立產品的三維外型。在實體化產品之前必須先了解所選用兩個繪圖軟體（Rhino、SolidWorks）之間對物體曲面的運算方式，我們以一個封閉曲面為例說明，在圖 9 中凸出的曲面（深藍的帶狀曲面）為 SolidWorks 在解讀 Rhino 圖檔所形成的曲面。由圖 9 可知 SolidWorks 所建構出的曲面會比 Rhino（在此以 Matlab 模擬兩套繪圖軟體的曲面建構）所繪出的曲面大些，其中的關鍵在於所用的曲面運算不同 [11]，經由這部份的探討可以讓本研究在對所繪製的模型更加了解不同建模軟體所得電腦模型之間的差異。本研究把安全頭盔拆成三種模式逐步進行薄殼製作，分別為西瓜皮式、半罩、四分之三罩，從中了解影響電腦模型實體化-薄殼製作（使模形由沒有厚度曲面長出厚度）之曲面。首先是西瓜皮式其結果如圖 10(a) 所示，完成西瓜皮式的模型後接著挑戰二分之一罩其結果如圖 10(b) 所示，完成半罩薄殼之後依循經驗繪製四分之三罩的模型結果如圖 10(c) 所示。

(三) 產品製作

本研究使用類似 ABS 材料來做 RP 成型，該材料特性硬度佳、彈性非常低。為了防止發生破裂問題，因此必須在

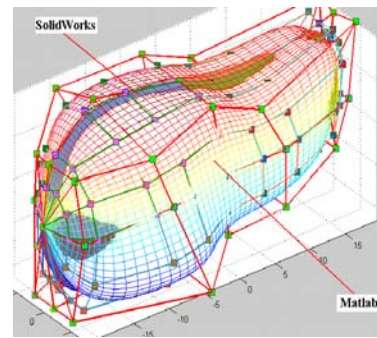


圖 9. 兩繪圖軟體之建構曲面比較

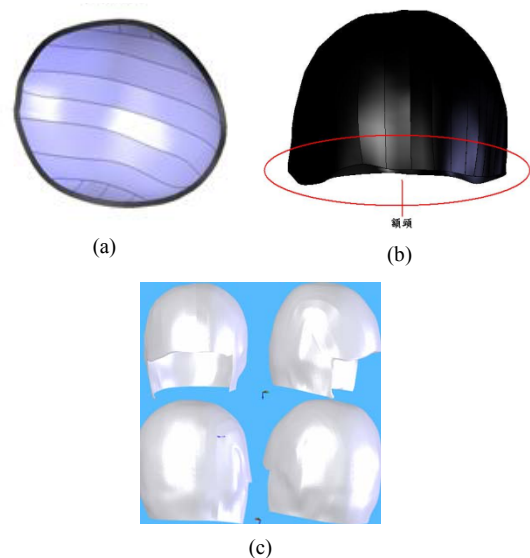


圖 10. 電腦模型薄殼結果

原本模型上做些不影響外型的處理（如分割），讓受測者可以完成穿戴的動作以利往後的檢驗工作（安全帽與受測者的緊密度）。增加分割這個項目衍生出兩項待克服的目標：（1）如何分割；（2）分割後如何結合。分割部分：必須決定分割的方向以及程度（縱切、橫切；分割的塊數），本研究選擇橫切的方式將原本模型分成三塊（半罩：1+臉頰：2），其好處是較符合現實。如圖 11(a) 所示（左為 SolidWorks 模型，右為 RP 模型）。結合部分：必須能達到多次結合分離的條件（至少能完成測試），ABS 材料並無法提供該項功能，所以我們必須加入中介物。磁力是一項很好的選擇，它能符合多次結合分離的條件，但這需要 RP 機台的配合，以厚度 6 mm 的模型為例，要在上面裝置磁鐵有其難度，因此這個思考方面必須做些修正，暫用膠帶做結合。如圖 11(b) 所示（左為 SolidWorks 模型，右為 RP 模型）。將 RP 模型

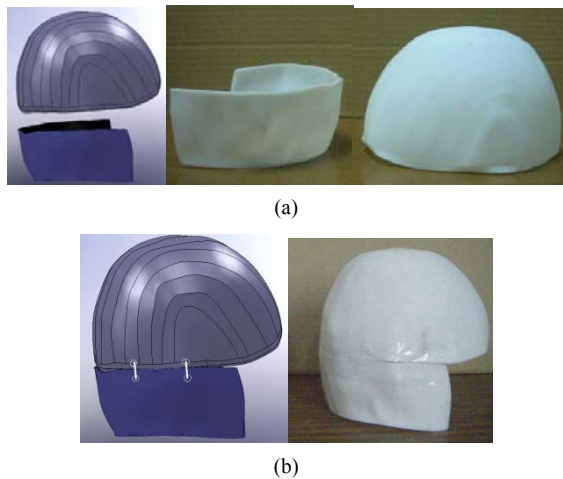


圖 11 .RP 模型分割與結合

完成結合後，進一步測試 RP 的模型與實際的人體密合程度如圖 12 所示。

實際的安全頭盔會預留間隙放置泡棉等材料提供緩衝以及些許的空氣流通 [15]。一般解決方式為採用將模型（人體計測資料庫取得頭型資料）等比例放大後產出產品，圖 13 中的橙色部份為原始尺寸的電腦模型，在其外圍黑色部分是等比例放大後的結果。經過受測者實際穿戴後證實 ABS 材料仍有一些彈性所以新繪製的電腦模型將不再分割，改善圖 12 的缺陷提升密合度。

考慮上述通風因素及外型設計，最終的安全頭盔如圖 14 所示。其中相關尺寸由 4-1 節製作之負模取得，此



圖 12 .RP 模型密合結果

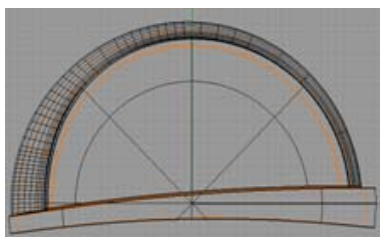


圖 13. 等比例放大的安全頭盔

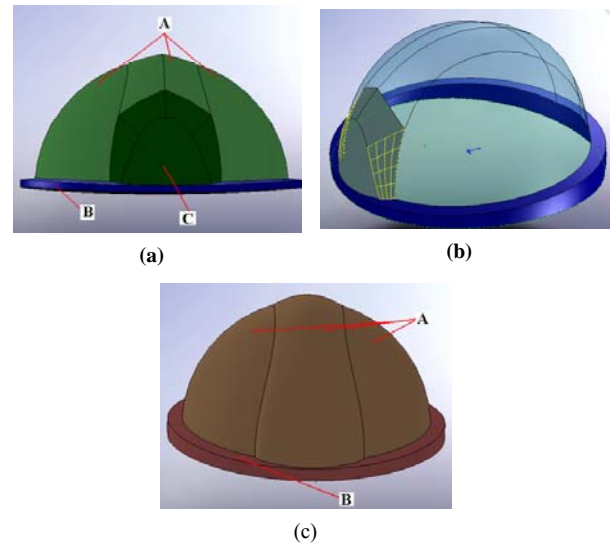


圖 14. 安全頭盔模型

安全頭盔為三大部分組成（A、B、C），其中 C 部分的曲面在製作薄殼時需要改變原始薄殼部位以消除曲面造成的曲率問題（如圖 14(b)所示），因而拉長了作業時間，考量此問題本研究將原先的安全頭盔做些微改良，減少電腦繪圖的製作時間，結果如圖 14(c) 所示。以 14(c) 為外觀的 RP 模型（以模特兒甲為示範，代表 2-1 節描述的大尺寸）如圖 15(a) 所示，經過受測者（模特兒甲）實際穿戴後其密合效果如圖 15(b) 所示；以圖 14(a) 為外觀的 RP 模型（以模特兒乙為示範，代表 2-1 節描述的中尺寸）如圖 16(a) 所示，經過受測者（模特兒乙）實際穿戴後其密合效果如圖 16(b) 所示；介於 14(a) 和 14(c) 之間為外觀的 RP 模型（以模特兒丙為示範，代表 2-1 節描述的小尺寸）如圖 17(a) 所示，經過受測者（模特兒丙）實際穿戴後其密合效果如圖 17(b) 所示。

五、結論

本研究運用機械式儀器量測實體外型，並以 Arun 提出的 SVD 演算法作為圖像結合的工具；為了得到電腦模型與實際物體的密合度以北歐木雕相親相愛為模型來作 4 個因子的 L_{16} 田口實驗（又稱為希臘_拉丁方格實驗），知道哪些因子會影響實際體物件與電腦模型的密合度。實驗的 4 個因子為：操作人員、SVD 的點數、結合點重覆量測的次數和檢驗點的重複次數。量測的標準為簡驗點差異的 SN 比。SN 比越高表示密合度愈好。根據田口模型及驗證結果，密合度最好並且最穩健的顯著因子設計水準為 SVD6、檢驗



(a)



(b)

圖 15. 大尺寸頭型穿戴結果



(a)



(b)

圖 16. 中尺寸頭型穿戴結果



(a)



(b)

圖 17. 小尺寸頭型穿戴結果

點重複量測 5 次。最後我們以 ABS 材質的 RP 產品（安全頭盔）針對不同頭顱大小的人作測試。証實本法確實可應用於產品設計與製作。

參考文獻

1. 陽光社會福利基金會(民 96), Transparent Face Mask 製作流程與方法。陽光社會福利基金會內部網頁。
<http://facial-at.moi.gov.tw/archive/Archives.asp>。(檢索下載日期: 97 年 12 月 10 日)
2. 黃俊峰(民 95), 逆向工程在車燈曲面重建技術之探討, 國立中央大學機械工程研究所碩士論文。
3. 楊復勝、蕭子程、張嘉麟(民 96), 以三維數位化儀分段量測物體之座標系統整合理論。技術學刊, 22(2), 167-177。
4. 鍾宜達(民 96), 數位條紋投射法量測胸腔外形三維點資料之處理與應用, 國立交通大學機械工程學系碩士論文。
5. 蕭子程(民 94), 用 MicroScribe 數位化儀結合 RHINO 對複雜曲面的量測探討: 以人體模型的手部為例。大葉大學工業工程與科技管理學系碩士論文。
6. 蘇朝敦(民 92), 品質工程, 頁 98-102, 中華民國品質學會, 台北。
7. Arun, K. S., T. S. Huang and S. D. Blostein (1987) Least-squares fitting of two 3-D points sets. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 9, 698-700.
8. Carruthers, J. (2005) *Form vs. Shape 1: Advanced 3D Modeling with Rhino*, 3rd Ed., Hydraulic Design, Ontario, Canada.
9. Craig, J. (2005) *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, 3rd Ed., Pearson, London, Uk.
10. Enciso, R., A. Shaw, U. Neumann and J. Mah (2003) *3D Head Anthropometric Analysis*, SPIE Medical Imaging, San Diego, CA.
11. Farin, G. (2002) *Curves and Surfaces for CAGD*, 5th Ed., Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, CA.
12. Feathers, D. J., V. L. Paquet and C. G. Drury (2004) Measurement consistency and three-dimensional electromechanical anthropometry. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 33, 181-190.
13. Ferrario, V. F., C. Dellavia, G. Serrao and C. Sforza

-
- (2005) Soft tissue facial angles in Down's syndrome subjects: A three-dimensional non-invasive study. *European Journal of Orthodontics*, 27, 355-362.
14. Hardle, W. and L. Simar (2003) *Applied Multivariate Statistical Analysis*, Springer, Berlin.
15. Meunier, P., D. Tack, A. Ricci, L. Bossi and H. Angel (2000) Helmet accommodation analysis using 3D laser scanning. *Applied Ergonomics*, 31, 361-369.
16. Montgomery, D. (2005) *Design and Analysis of Experiments*, 6th Ed., Wiley, NJ.
17. Sforza, C., C. Dellavia, G. M. Tartaglia, V. F. Ferrario (2005) Morphometry of the ear in Down's syndrome subjects a three-dimensional computerized assessment. *International Journal of Oral Maxillofacial Surgery*, 34(6), 480-486.
18. Vinesh, R. and F. J. Kiran (2008) *Reverse Engineering - An Industrial Perspective*, Springer, Berlin.
- 收件：97.09.11 修正：97.10.20 接受：97.12.31**

附錄

附錄 1

| treatment2 | block1 | block2 | block2b | treatment1 | sn1 |
|------------|------------|--------|---------|------------|---------|
| SVD4 | join_rep1 | A | A | check_rep5 | 14.2318 |
| SVD4 | join_rep2 | D | D | check_rep1 | 12.2174 |
| SVD4 | join_rep3 | B | B | check_rep3 | 11.0417 |
| SVD4 | join_rep5 | C | C | check_rep2 | 15.4921 |
| SVD5 | join_rep1 | D | D | check_rep3 | 15.7094 |
| SVD5 | join_rep2 | A | A | check_rep2 | 12.4146 |
| SVD5 | join_rep13 | C | C | check_rep5 | 21.1734 |
| SVD5 | join_rep5 | B | B | check_rep1 | 11.1293 |
| SVD6 | join_rep1 | B | B | check_rep2 | 11.0035 |
| SVD6 | join_rep2 | C | C | check_rep3 | 19.0619 |
| SVD6 | join_rep3 | A | A | check_rep1 | 11.339 |
| SVD6 | join_rep5 | D | D | check_rep5 | 18.5677 |
| SVD8 | join_rep1 | C | C | check_rep1 | 16.4848 |
| SVD8 | join_rep2 | B | B | check_rep5 | 15.5880 |
| SVD8 | join_rep3 | D | D | check_rep2 | 14.6895 |
| SVD8 | join_rep5 | A | A | check_rep3 | 14.5696 |

附錄 2

| treatment2 | block1 | block2 | block2b | treatment1 | sn2 |
|------------|------------|--------|---------|------------|---------|
| SVD4 | join_rep1 | A | A | check_rep5 | 14.3314 |
| SVD4 | join_rep2 | D | D | check_rep1 | 12.6622 |
| SVD4 | join_rep3 | B | B | check_rep3 | 13.2928 |
| SVD4 | join_rep5 | C | C | check_rep2 | 17.8782 |
| SVD5 | join_rep1 | D | D | check_rep3 | 14.5359 |
| SVD5 | join_rep2 | A | A | check_rep2 | 13.8649 |
| SVD5 | join_rep13 | C | C | check_rep5 | 19.5049 |
| SVD5 | join_rep5 | B | B | check_rep1 | 10.5200 |
| SVD6 | join_rep1 | B | B | check_rep2 | 14.0614 |
| SVD6 | join_rep2 | C | C | check_rep3 | 18.9554 |
| SVD6 | join_rep3 | A | A | check_rep1 | 13.3210 |
| SVD6 | join_rep5 | D | D | check_rep5 | 19.7369 |
| SVD8 | join_rep1 | C | C | check_rep1 | 13.5353 |
| SVD8 | join_rep2 | B | B | check_rep5 | 16.8394 |
| SVD8 | join_rep3 | D | D | check_rep2 | 15.2848 |
| SVD8 | join_rep5 | A | A | check_rep3 | 16.1637 |