

薄殼物件的脫模角

THE PARTING ANGLES OF THIN-SHELL OBJECTS

陳漢明* 杜介雄**

Han-Ming Chen Jie-Siong Du

*副教授 **碩士班研究生

國立台灣大學機械工程學系

*Associate Professor **Graduate student

Department of Mechanical Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan 10617, R.O.C.

Abstract

Today, the products are manufactured according to ergonomics and artistic. So, engineers usually design an object with exquisite shapes. Before the products are manufactured, they will be segment to several parts with machinability. Those parts usually have the feature of free-form surface. However, it is difficult to determine whether those parts are partible or not. In designing process, it will waste time on determining parting directions. For this reason, we generate a method for checking partibility by using the relations of the normal vectors of shapes. If the mold was decided as partible object, the process would evaluating the range of the parting directions. Also, the result of parting directions will be demonstrated by one cone named parting cone. The total procedures of determining partibility require $O(n)$ time.

Keywords: thin-shell objects, free-form surfaces, parting cones.

摘要

現今的產品，爲了人體工學、視覺美觀的因素，常設計了相當精巧的曲線，所以切割出來的零件常具有複雜曲面的特徵，這些複雜曲面通常造成了判斷零件的可脫模性上，相當大的困擾，在模具設計的流程中將會增加相當多的時間。基於這樣的原因，本文提出一個判斷可脫模性的方法，利用自由曲面上三角化之後所得到的法向量的分佈情形，進行運算，若判斷爲可脫模模型，並計算出可脫模模型的脫模範圍，使用圓錐表示之，此圓錐既稱爲脫模角，過程所需的時間複雜度爲 $O(n \log n)$ ；若判斷爲不可脫模模型則所需要的時間複雜度爲 $O(n)$ 。

關鍵詞：薄殼物件、自由曲面、脫模角錐。

1. 前言

零件外型的資料在電腦中經過重建、修改後，在加工前需經由適當的切割，使其成爲數片可脫模零件，才能經由塑膠射出機製造出來。所以檢驗零件的可加工性，是產品成功與否的檢查哨，避免加工時才知道產品設計的缺陷，而在加工前就告知設計者予以變更設計，以期順利製造出來。如何判斷零件的可脫模性和表示脫模難易程度，是一大重點。

在模具設計的過程中，零件從建立 CAD 模型，從選定分模線／面 (parting line/face)，設計澆道、流道，到產品順利量產，每一個環節在自動化過程中都是相當關鍵的，在模具設計的流程中屬於分模線/面定義的一部份 [1]。

產品外型在經過工程師的設計修飾之後，緊接著

面臨的就是製造的問題，林提出一工件分割演算法則，利用此演算法發展適合外觀模型製作的電腦輔助製程，其演算法則將含有不完全加工區域的工件依其加工資訊分割成數個可完全加工的子塊 [2]，但其限制在工件表面形狀侷限於平面及圓柱面，面與面交線限於直線和圓弧；基於製造上的限制，產品外型多半爲立方體、球體、圓柱、圓錐、三角錐和甜甜圈。葉由邊界盒 (boundary box) 找出三個投影方向，評估後選一最佳方向 [3]，類似於葉 [3] 的概念，Chen 提出找包含整個物件最小矩形的方法，並以該矩形的長、寬、高的方向視爲可能脫模方向進行分析，在三者中找出最佳的方向 [4]，此兩種方法固然可以幫助使用者決定一個比較理想的方向，卻忽略了可能存在更佳的脫模方向。

可視性理論在工件的加工性或是脫模性，應用相

當廣泛，其理論基礎在於利用所設定的方向觀察模型外型特徵，經由其設定的限制條件，偵測出模型不可被加工或是不可脫模的位置，再加以修正。朱引入可視性 (visibility) 的觀點，發展出一套遮蔽理論，針對凸多面體找出脫模的方向，假設每一個面的法向量都視為脫模方向的候選者，進行運算，其研究結果時間複雜度為 $O(n^4)$ [5]，此法不利於在自由曲面模型中應用，而在脫模角方面，只提供原則並沒有明確的說明與方法。Woo 將高斯圖 (Gaussian maps) 和可視性圖 (visibility maps) 應用於模具的加工與製造上。將加工機的自由度分成點、線和面，判斷可視性物件至少所需自由度等級的加工機 [6]。在 Amitabha 的研究中，則進一步可以依特徵檢測曲線和非交錯的平面，對複雜的連續的曲面可以定義出最少的加工程序 [7]。

Zhou 利用模型的特徵外型，尋求各個位置的假定分模方向，且利用文中所提到兩個方法，重複檢查所得到分模線的合理性；這樣的方式可以排除出所有過切 (undercut) 的特徵面，建立出分模線進而產生分模面；亦可以處理平面、二階曲面，對使用側向滑塊的模具之分模性亦能適當處理，但目前對自由曲面的模型並無法處理，其中過切的定義：妨礙公模、母模依照脫模方向分離的部分我們稱為過切發生的地方 [8]。Kurth 處理兩種過切特徵，包括擠出特徵 (extruded features) 與旋轉特徵 (rotational features)，主要概念是將物件的過切特徵轉換成二維空間的問題 [9]，此規則有使用上的限制，對於不規則的特徵並不適用。

Tan 提出實體掃除 (solid sweep) 的方法來找脫模方向，文中定義阻塞指數 (blocking factor)、偏好值 (preference value)、妥協程度 (degree of compromise) 等三個參數，並依據此三參數建立物件平面的樹狀排列資料結構，以需最少側向滑塊的主脫模方向為優先考量，當出現好幾種需相同個數側向脫模滑塊的主脫模方向時，以主脫模方向的偏好值來決定，反覆以啟發式搜尋樹狀資料結構找出最佳解 [10]。Chang 提出平面掃除 (plane sweep) 的方法，針對薄的、多邊形外型的工件，能找出模型的工整外型，但是對於成對多邊形接和的邊緣，在計算上會較複雜，這是因為這些邊緣可能會因終止點的重複而發生衝突，其修正的方法是將衝突的可能歸成數類，各類各自解決 [11]。

Ravi 將影響脫模的因素 (如投影面積、脫模深度、過切...等九項)，並定義各參數的計算方式，依各個參數的重要性給一個適當的比重，再由評估的結果決定脫模方向與脫模線 [12]。Wong 和鐘都預設已知脫模方向，將 z 軸視為脫模方向 [13,14]，Wong 以平面 (法向量垂直 z 軸) 切割物件，計算每個平面極端值，預先設定切平面的大小和可容忍切平面極端值

變化的範圍，如果極端值變化大於預設的容忍範圍，則此間隔將繼續細分。計算出極端值之後，這些極端值所構成的平面即為有最大面積的脫模平面。此方法可以避免因為切割平面間距的大小而失去某些重要的外型特徵 [13]。鐘提出凹凸面判斷法則，任兩個面的法向量夾角小於 180° 便視為凸邊 (convex edge)，大於 180° 便視為凹邊 (concave edge)，凸邊面群中再細分為 M1 (與脫模方向內積為正的集合) 與 M2 (與脫模方向內積為負的集合)，進而找出脫模線與脫模面 [14]。

而本文針對具有自由曲面外形的薄殼模型，進行可脫模性判斷，可脫模定義為：選一特定方向脫模，若不會有過切的情況發生，則稱此物件為可脫模物件。經由量化描述脫模方向，我們認為一個可以脫模的自由曲面的物件，可以脫模的範圍包含一個錐體，最嚴格的限制即是該錐體的內切圓錐。

2. 曲面資料點處理

我們以雷射掃描取得自由曲面物體的資料，常用的掃描機構有旋轉掃描與平行掃描方式 [15]，本研究採用平行掃描方式，其運作方式為雷射光源沿 x 軸方向移動一固定距離後，對模型由下而上做一次掃描，然後雷射光源沿 x 軸方向再移動此一固定距離，如此全程掃描完後，模型繞 z 軸逆時針旋轉 90° ，再次沿 x 方向做全程掃描，如此可得模型在四個方向掃描的資料點，將四個面整合起來之後的模型，如圖 1 所示。

2.1 三角網格之法向量的平移

我們將所掃描得到的資料，以曲線內插 (interpolation) 並以舉昇曲面 (lofting surface) 建立物體表面的幾何資訊，實際上我們將物體的表面資料三角化，以有限個小三角平面模擬實際被掃描物體外型。為了能有效判斷物體的可脫模特性，首先將每一個三角形將其法向量的移至座標原點位置 (如圖 2)，並選擇法向量的總和方向作為脫模的基準方向。

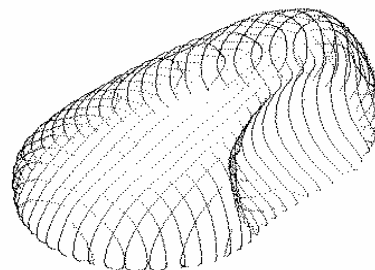


圖 1 模型之掃描點群資料

Fig. 1 Scanned points of one model

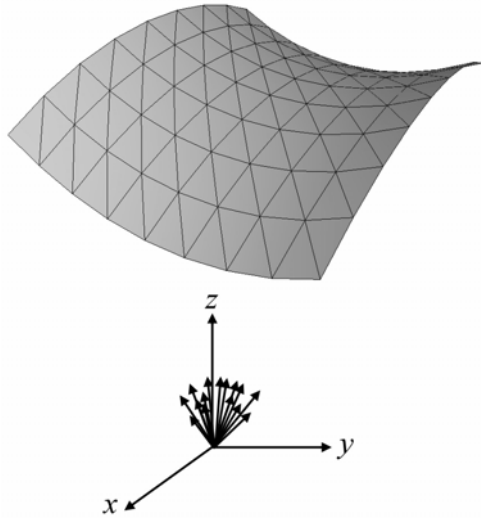


圖 2 曲面上法向量平移至原點

Fig. 2 Shifting normal vectors of surface to the origin

首先求出所有三角形平面的法向量和，並將其單位化得到 $\bar{n}_i$ ，如方程式(1)，一般而言，對掃描物體所建立的自由曲面而言，其三角網格分佈通常較為均勻，主要原因在於雷射掃描的取點方式為等間距取點，該物體的脫模方向取決於各個小平面的可視圖(visibility maps) 交集，實際上， $\bar{n}_i$ 方向可視為判斷均勻變化物體的脫模方向的折衷方向。

$$\bar{N}_t = \text{normalize} \left(\sum_{i=1}^n \bar{n}_i \right) \quad (1)$$

2.2 基準平面和三角網格之法向量的旋轉處理

當 $\bar{n}_i$ 方向找出後，對物體旋轉使得 $\bar{n}_i$ 旋轉至 z 軸；當 $\bar{n}_i$ 旋轉至 z 軸意味著大多數小平面的法向量是面對 z 軸，如圖 3，對空間座標作任意方向的旋轉如方程式(2)：

$$\bar{N}'_t = M \bar{N}_t \quad (2)$$

如圖 4 中所示，欲將 $\bar{N}_t$ 向量旋轉至 z 軸，其旋轉矩陣 M ，可分解為兩個步驟完成：

1. 對 x 軸旋轉 θ_1 角，使 $\bar{N}_t$ 置於 xz 平面上，旋轉矩陣為 $M_x(\theta_1)$ 。
2. 對 y 軸旋轉 $-\theta_2$ 角，使 $\bar{N}_t$ 置於 $+z$ 軸上，旋轉矩陣為 $M_y(-\theta_2)$ 。

故可得：

$$M = M_y(-\theta_2) M_x(\theta_1) \quad (3)$$

其中對於 x 軸與 y 軸的旋轉矩陣分別為方程式(4)與方程式(5)：

$$M_x(\theta_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x & 0 \\ 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$M_y(\theta_y) = \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

旋轉的角度與向量間的幾何關係如方程式(6)~(9)：

$$\theta_1 = \cos^{-1} \frac{c}{l} \quad (6)$$

$$\theta_2 = \cos^{-1} l \quad (7)$$

$$\bar{N}_t = [a \quad b \quad c \quad 1]^T \quad (8)$$

$$a^2 + b^2 + c^2 = a^2 + l^2 = 1 \quad (9)$$

將方程式(3)整理後，可將轉換矩陣 M 化簡如方程式(10)：

$$M = \begin{bmatrix} l & -ab/l & -ac/l & 0 \\ 0 & c/l & -b/l & 0 \\ a & b & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

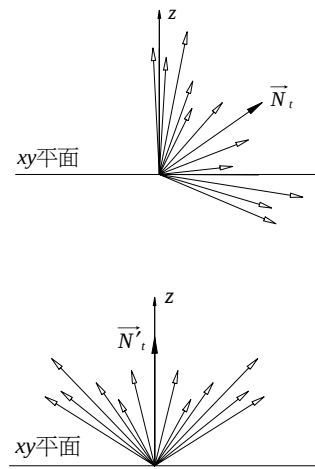


圖 3 將所有法向量旋轉至特定位置

Fig. 3 Rotating normal vectors to specified direction

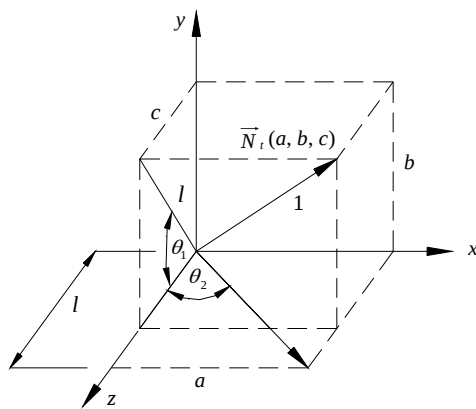
圖 4 將 $\vec{N}_t$ 法向量旋轉至 z 軸之分解圖

Fig. 4 The decomposed procedures of rotating vector $\vec{N}_t$ to z axis

3. 脫模判斷

檢查零件的可脫模性，和產品的外型和脫模方向有密切的關連的，三角形網格的法向量就是曲面三角化之後所得到的；基準面即是分模面，若零件能經由分模面順利取出即可以脫模。具有複雜曲面的物件，要確定是否可以進行脫模的程序是相當繁瑣的，本文透過基準方向決定基準面，並找出一個最大的角錐，該角錐可包含所有三角形平面的法向量，該角錐的最大外徑，對應著最大完全可脫模角。

3.1 基準平面的選擇

當 $\vec{N}_t$ 旋轉至 z 軸後，取一橫切平面（此處稱為 F 平面）， F 平面與 xy 平面平行，並且與 xy 平面相距一段適當距離，而這適當距離便是所有在 z 平面之上的法向量中之最小 z 值，因此 F 平面將與所有 z 平面上的法向量相交（如圖 5）。

向量 $\vec{N}_t$ 是由單位化所有的三角形平面之法向量的總和，計算的目的是假定它為脫模方向。計算 F 平面和所有三角形平面之法向量的交點，如圖 6 和 F 平面有交點的向量所形成的點群為 CP ，不和 F 平面有交點的向量群為 NCP 。

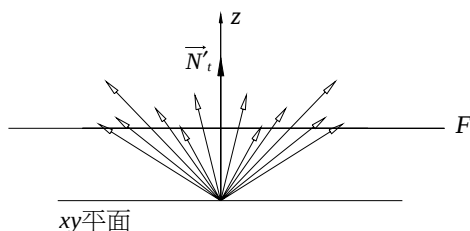


圖 5 基準平面選擇之示意圖

Fig. 5 Figure of selecting a datum plane F

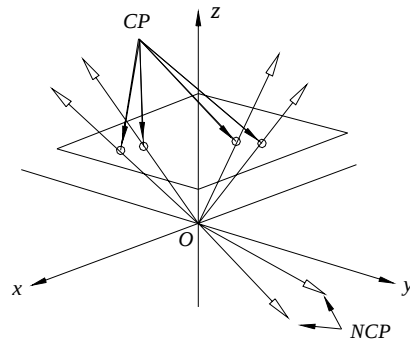
圖 6 向量與基準平面 F 之交點

Fig. 6 The intersected points of vectors and the datum plane F

3.2 凸多邊形的尋找

F 平面決定後，首先檢查這些點群和 F 平面的關係，判斷哪些點群是在 xy 平面的下方，這些點群在定義上是不會和 F 平面有交點。而在 xy 平面上方的點群可找出與 F 平面的交點座標。當計算出向量群和 F 平面的交點後，在 F 平面上所呈現的是一群在同一平面上但沒有規律排列的點群，若可找到包圍所有點群的凸多邊形，則該凸多邊形的頂點與原點連接所形成的角錐，即可包圍所有法向量，以下將介紹如何獲得包圍所有點群的凸多邊形。

找尋點群 CP 的座標在 x 和 y 方向的四個極值，以此四個極值可圍成一個邊長平行 x 軸和 y 軸方向的封閉矩形，設 P_R 、 P_L 分別為 X 座標值最大與最小的座標點， P_U 、 P_D 分別為 Y 座標值最大與最小的座標點。此四點所形成的四邊形 $P_R P_U P_L P_D$ ，可將該矩形分為 (I)、(II)、(III)、(IV) 和 (V) 五個區塊的集合，如圖 7。若 P_R 、 P_U 、 P_L 、 P_D 中有任意兩點為同一座標點，則四邊形 $P_R P_U P_L P_D$ 會退化為三角形或直線點，此時部分區塊則退化為空集合。

找尋凸多邊形的方法：

1. 排除 (V) 點群體：由於 (V) 點群體中的點資料被四邊形 $P_R P_U P_L P_D$ 所包圍，故點資料必不會構成凸多邊形的邊界，如圖 10 過程一。
2. 檢查 (I) 點群體，若該點群體為空集合則跳至步驟 5，否則進行步驟 3。

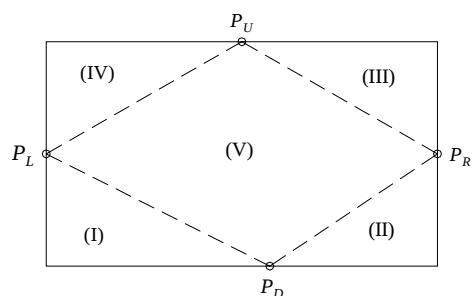


圖 7 點群劃分之區塊圖

Fig. 7 Five sections of point sets

3. 檢查由 P_U 和 P_D 所組成的邊，若有 i 個點，則以 P_L 為起始點 (圖 8)，找出在 (I) 內與 P_L 相連之斜率為最小值的點，可知並不會有其他的點群落在 P_L 與 (X_i, Y_i) 所形成的直線外，並將 (I) 中， y 值大於 Y_1 點的去除，再以 (X_i, Y_i) 為基準點找出與 (X_i, Y_i) 連成直線，其斜率為最小值的點 (X_2, Y_2) ，同理找到 (X_3, Y_3) 、 (X_4, Y_4) 、... 直到下一點為 P_D 為止。
4. 記錄下所找到最外圍的點資料，置於串列資料結構中。
5. 分別對 (II)、(III) 與 (IV) 點資料做映射座標轉換至 (I)，如圖 9，以 (II) 點群為例，將 (II) 點群以 y 軸為對稱軸，找出對應的資料點，(III) 與 (IV) 點群，則分別以 $x = y$ 和 x 軸為對稱軸，轉換為與 (I) 區塊相同形式的座標。轉換後執行步驟 2，以計算該區塊內的最外圍點位的串列資料，當求得最外圍點串列資料後，必須在映射回原來的區塊，由於映射的關係，(II) 與 (IV) 所映射回的最外圍點串列資料，必須反序排列。如圖 10 過程二。
6. 合併 (I)、(II)、(III) 與 (IV) 點群的最外圍點資料串列，並移除重複的點。如圖 10 過程三。

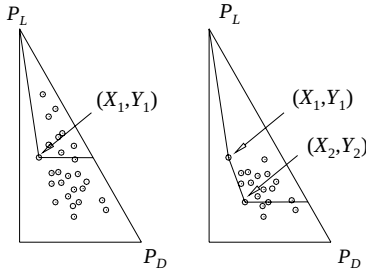


圖 8 (I)點群之最外邊界找法

Fig. 8 The outer points in point set (I)

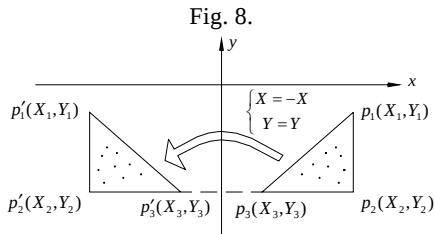


圖 9 (II)區塊的點資料映射方式

Fig. 9 The mapping rule of point set of (II)

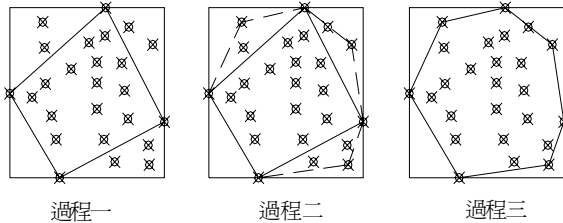


圖 10 找凸多邊型的示意圖

Fig. 10 Finding convex polygon of irregular points

4. 可脫模性分析

4.1 角錐建立的目的

角錐建立的目的是：整合曲面上的三角網格之平面法向量，所得到的幾何圖形即是一角錐，檢查錐邊的最大夾角，可以檢查出曲面上三角網格之平面法向量的相對關係，容許的錐邊之最大夾角為 180° ；如果最大夾角大於 180° ，便找不出脫模方向，判定此零件不可脫模。

4.2 找尋角錐最大夾角之方法

在 F 平面上，若可以找到最大的直徑，也等於找到角錐的最大夾角，此部分以平行演算法來處理平面凸多邊形的最大直徑問題 [16]，找尋 F 平面上得最大直徑可分以下幾個步驟來進行：

1. 假設有一凸多邊形由 $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$ 的點以逆時針呈現，每一個邊角都有一個相對於 $\overline{d_1 d_2}$ 的夾角，令 $\overline{d_1 d_2}$ 為基準軸，然後計算出每一個頂點所代表的角度 $d_{i,angle} = (\overline{d_1 d_{i+1}} \text{ 和 } \overline{d_1 d_2} \text{ 夾角})$ ，圖 11、12。
2. 從 d_2 也就是 $k = 2$ 開始搜尋，搜尋一個點 d_k ，此 d_k 滿足方程式(11)。在圖 13 中， $k = 5$ ，找到第一組頂點對 (d_2, d_5) 。

$$d_{k,angle} - d_{1,angle} \geq 180^\circ \quad (11)$$

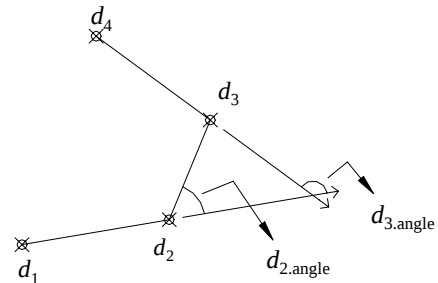


圖 11 頂點角度的定義

Fig. 11 The definition of vertex angle

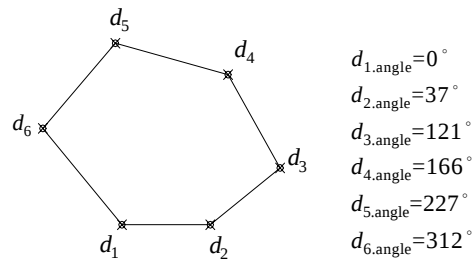


圖 12 最大凸多邊形找最大直徑的範例

Fig. 12 An implement of determining maximum diameter of convex polygon

3. 用兩指標 (標記點 S_1 、 S_2) 分別指向先找到的對頂點, 本範例中 (圖 13) 設 d_2 為初始 S_1 , S_2 為 d_5 , 平行線 (L_1) 的角度為 0° , 另一平行線 (L_2) 的角度為 180° 。將 L_1 和 L_2 同時逆時針旋轉, 直到 L_1 或 L_2 的角度等於邊線的角度, 根據這個邊角改變頂點的指標。在範例中 (圖 13), 當兩平行線旋轉 37° , L_1 和 $\overline{d_2d_3}$ 重疊 (圖 14), 因此 S_1 從 d_2 移到 d_3 , 此時找到第二個頂點對 (d_3, d_5), 接下來兩平行線再旋轉 10° (圖 15), L_2 與 $\overline{d_5d_6}$ 重疊, S_2 從 d_5 移到 d_6 , 得到下一個頂點對 (d_3, d_6)...以此類推, 可以得到其餘的頂點對 (d_4, d_6), (d_1, d_4) 和 (d_1, d_5)。
4. 計算這些頂點對中的最大距離, 假設 (d_3, d_6) 為最大距離的頂點對, 可依據餘旋定理 (圖 16), 利用方程式(12) 可求得最大角錐。

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\overline{Od_3}^2 + \overline{Od_6}^2 - \overline{d_3d_6}^2}{2\overline{Od_3}\overline{Od_6}} \right) \quad (12)$$

4.3 可脫模圓錐

可脫模圓錐：在不可脫模模型中是不存在的；在可脫模模型中，其所代表的意義為：沿著圓錐的中心軸，檢驗的模型擁有圓錐錐角大小的可脫模範圍，及由圓錐的錐頂為出發點，所指的方向若在圓錐內，模仁皆可順利取出。此時圓錐錐角即為脫模角，依據空間中的幾何關係 (圖 17) 可知，脫模角與最大最大角錐角互補。

5. 結果與討論

在進行模型之可脫模性的判斷，過去文獻中曾提到相當多的方法，但在擁有自由曲面外型的模型上則較少有研究提出，本研究提供一個針對自由曲面模型之脫模性判斷可行的方法：在透過雷射掃描與曲面重建技術，可快速取得零件的三角網格資料，為求充分表現出曲面的特徵，使之不失真，在大小 $70 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的實際模型上，約有 5,000 個三角形網格；而在不可脫模的模型上，大小 $135 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$ 的實際模型上，約有 12,000 個三角形網格。

5.1 可脫模模型判斷

以下是判斷可脫模模型的結果，圖 18 為掃描模型外型彩現圖形 (Model 1)，圖 19 為模型三角化之後的側視圖及說明其脫模範圍的脫模角，經過計算可知脫模角為 12.62° ，意即在圓錐中心軸的方向，可以有 12.62° 的脫模範圍意。

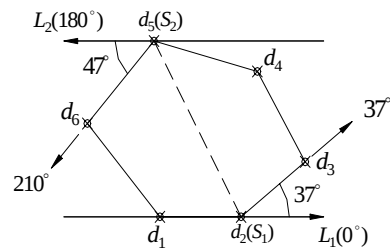


圖 13 對頂點尋找的方法 (過程一)

Fig. 13 The method of searching couple points (procedure 1)

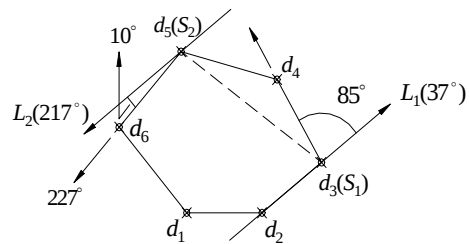


圖 14 對頂點尋找的方法 (過程二)

Fig. 14 The method of searching couple points (procedure 2)

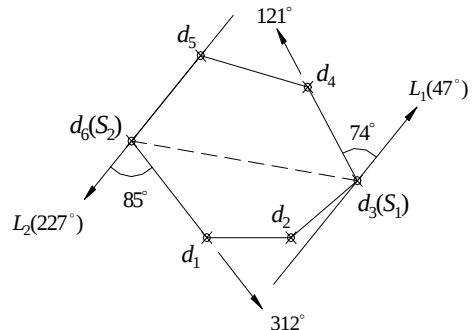


圖 15 對頂點尋找的方法 (過程三)

Fig. 15 The method of searching couple points (procedure 3)

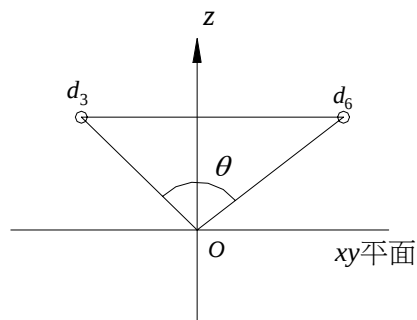


圖 16 餘旋定理示意圖

Fig. 16 Figure of law of cosine

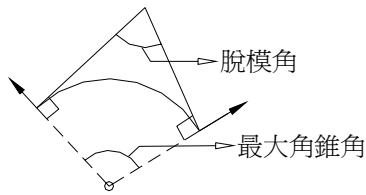


圖 17 空間幾何關係

Fig. 17 Spatial geometric relation of maximum pyramid and parting angle



圖 18 可脫模模型外型彩現圖 (Model 1)

Fig. 18 Shading figure of partible model (Model 1)

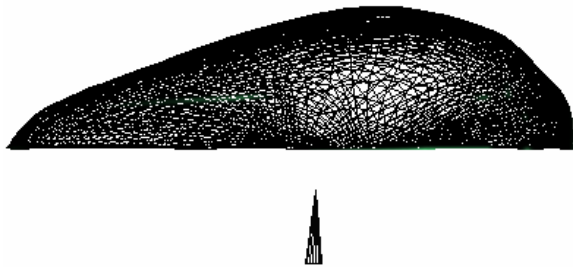


圖 19 可脫模物件之脫模範圍 (Model 1)

Fig. 19 Parting cone of partible model (Model 1)

5.2 不可脫模模型判斷

圖 20 為掃描不可脫模模型的彩現圖形 (Model 2)，圖中可以看出，造成不可脫模的原因在於前方凹陷處，圖 21 使用角錐的方式表現出曲面上三角形平面的法向量分佈的情形，大多數法向量群 (9187 個) 在 xy 平面之上的角錐內，在此稱「上角錐」，但凹陷處的三角形網格的平面法向量，卻造成了在 xy 平面下仍有 2693 個法向量，經過整理，將之以另一角錐表示之，在此稱「下角錐」，下角錐的錐邊表示和上角錐的錐邊和在 $-z$ 的四個象限求得的最大夾角。由圖 21 可以看出一旦模型具有同時上角錐和下角錐組合，既判斷為不可脫模模型。



圖 20 不可脫模模型外型圖 (Model 2)

Fig. 20 Shading figure of unpartible model (Model 2)

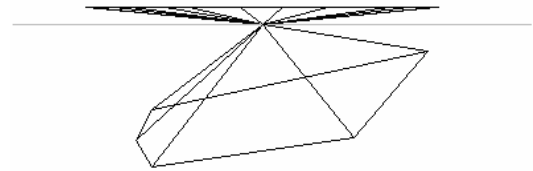


圖 21 Model 2 之角錐示意圖

Fig. 21 Corresponding pyramid of Model 2

5.3 不可脫模模型處理

Model 2 在程式的判斷下，確定其不可脫模，但相信經由適當的脫模切割法則的處理下，將可分割成兩個或兩個以上的可脫模零件；但定義「適當的切割法則」，牽涉的層面相當廣泛，雖不在本文的討論範圍內，但仍對不可脫模的模型做簡單的切割處理，以期得到兩個可以進行脫模的模型，其方法為：在 Model 2 的縱軸端接近中心的位置進行切割，使 Model 2 分為圖 22：

但若在橫軸中心位置附近切開，則得不到可脫模的結果，如圖 25 為在 Model 2 橫軸中心位置附近橫切開的圖形；圖 26 為模型上半部的圖形，圖 27 為其無法脫模的角錐示意圖；圖 28 為模型下半部的圖形，圖 29 為其無法脫模的角錐示意圖。

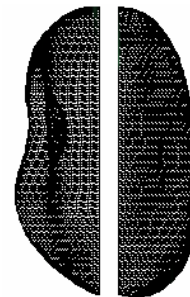


圖 22 Model 2 由縱軸切割圖

Fig. 22 Figure of Model 2, after slicing in column direction

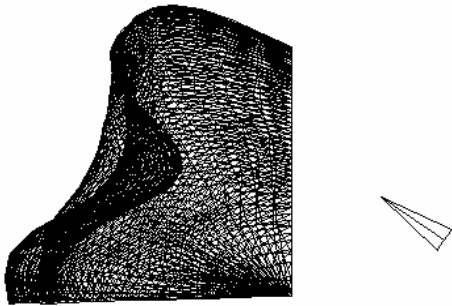


圖 23 Model 2 左半圖及其脫模角

Fig. 23 The left-half part of Model 2 and its corresponding parting cone

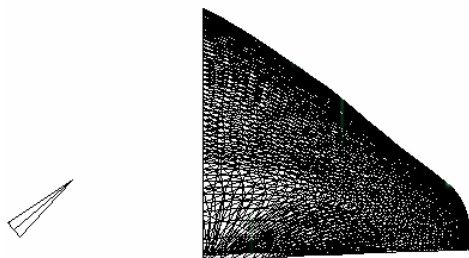


圖 24 Model 2 右半圖及其脫模角及其脫模角

Fig. 24 The right-half part of Model 2 and its corresponding parting cone



圖 25 Model 2 由橫軸切割圖

Fig. 25 Figure of Model 2, after slicing in row direction

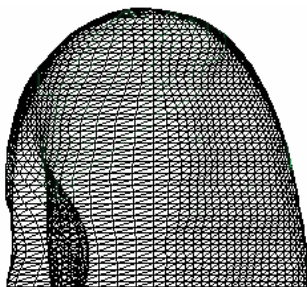


圖 26 Model 2 上半圖

Fig. 26 The upper-half part of Model 2

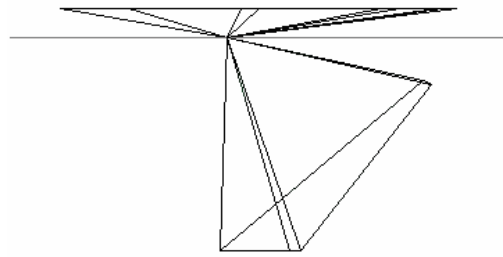


圖 27 Model 2 上半圖之角錐示意圖

Fig. 27 The corresponding upper pyramid and lower pyramid of the upper-half part of Model 2

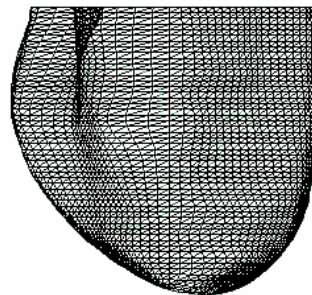


圖 28 Model 2 下半圖

Fig. 28 The lower-half part of Model 2

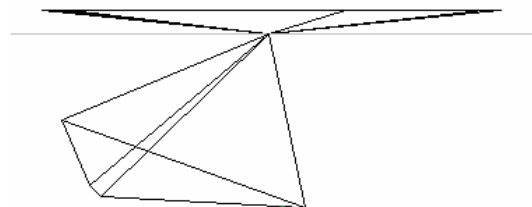


圖 29 Model 2 下半圖之角錐示意圖

Fig. 29 The corresponding upper pyramid and lower pyramid of the lower-half part of Model 2

6. 結 論

本文在可脫模的模型中，以「找平面上最大凸多邊形」的運算最為複雜，為 $O(n \log n)$ 的時間複雜度，其餘皆為 $O(n)$ 的時間複雜度，整體而言，時間複雜度視為 $O(n \log n)$ ；在不可脫模的模型中，程式進行到「 F 平面與各法向量求交點」運算時就會被判別出來，總時間複雜度為 $O(n)$ 。

當遭遇到不可脫模模型時，由 Model 2 的不同切割形式可以觀察出其差異，同樣只是做了切開的動作，確有著截然不同的結果，在 Model 2 的縱軸上切開，得到的是可脫模的兩組模型零件，但在 Model 2 的橫軸上橫切開，得到的仍是不可脫模的兩組模型零件。因此不同

的切割形式造成截然不同的結果。因此，若能輔以適當的切割法則，不但能將不可脫模的模型切割為數片可以脫模的零件子塊，更可以組合成和原來設計功能相符的產品外形。

誌 謝

本文為國科會所資助的計畫 NSC 90-2212-E-002-167 內的研究成果，特此致謝。

參考文獻

- [1] Y. M. Chen, C. T. Ho and R. S. Lee, "Computer-aided integrated design for injection modeling," *Proceedings of the Second International Conference on Intelligent Processing And Manufacturing of Materials*, IPMM, Vol. 2, 1999, pp. 1061–1066.
- [2] 林廣宏，「外觀模型製作的電腦輔助製程計畫」，國立交通大學工業工程系碩士論文，1991 年。
- [3] 葉財源，「同步式射出成型產品與製程開發之可脫模性分析」，國立成功大學製造工程研究所碩士論文，1998 年。
- [4] Y. H. Chen, Y. Z. Wang and T. M. Leung, "An investigation of parting direction based on dixel model and fuzzy decision making," *International Journal of Production Research*, Vol. 38, No. 6, 2000, pp. 1357–1375.
- [5] 朱麗鴛，「電腦輔助射出成型製品分模線自動產生方法之研究」，國立台灣工業技術學院工程技術研究所設計技術學程碩士論文，1995 年。
- [6] T. C. Woo, "Visibility maps and spherical algorithms," *Computer Aided Design*, Vol. 26, No. 1, 1994, pp. 6–16.
- [7] Amitabha Mukerjee and Neelesh Kumar Jain, "A featureless approach to process planning," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation Albuquerque*, New Mexico, April 1997, pp. 2747–2752.
- [8] Zhenyong Zhou, Shuming Gao, Zhengchao Gu, and Jiaoying Shi, "A feature-based approach to automatic injection mold generation," *Proceedings of Geometric Modeling and Processing 2000: Theory and Applications*, 2000, pp. 57–68.
- [9] G. R. Kurth and R. Gadh, "Virtual prototyping of die-design: determination of die-open directions for near-net-shape manufactured parts with extruded or rotational features," *Computer Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 10, No. 1, 1997, pp. 69–81.
- [10] K. C. Hui and S. T. Tan, "Mould design with sweep operations — A heuristic search approach," *Computer Aided Design*, Vol. 24, No. 2, 1992, pp. 81–91.
- [11] Fu Chang, Yung-Ping Cheng, Theo Pavlidis, and Tsuey-Yuh Shuai, "A line sweep thinning algorithm," *Proceedings of the Third International Conference on Document Analysis And Recognition*, Vol. 1, 1995, pp. 227–230.
- [12] B. Ravi and M. N. Srinivasan, "Decision criteria for computer-aided parting surface design," *Computer Aided Design*, Vol. 22, No. 1, 1990, pp. 11–18.
- [13] T. Wong, S. T. Tan and W. S. Sze, "Parting line formation by slicing a 3D CAD model," *Engineering with Computers*, Vol. 14, 1998, pp. 330–343.
- [14] 鐘移誦，「以幾何模型為基礎之射出成型模具特徵設計研究」，大業大學機械工程研究所碩士論文，2000 年。
- [15] 陳漢明、張家興、詹宏志，「修補與建立模型曲面」，*技術學刊*，第十七卷，第一期，2002 年，第 83–89 頁。
- [16] 陳啓榮，「計算凸多邊行直徑之最佳平行演算法」，國立台灣大學電機工程學研究所碩士論文，1991 年。



陳 漢 明 (Han-Ming Chen) 美國加州大學柏克萊分校博士，現任國立台灣大學機械工程學系暨研究所副教授。主要研究領域：電腦輔助造形、電腦輔助設計。



杜 介 雄 (Jie-Siong Du) 國立台灣大學機械工程學研究所碩士班研究生。興趣為電腦輔助設計。

收稿日期 93 年 2 月 5 日、修訂日期 93 年 8 月 20 日、接受日期 93 年 8 月 25 日
Manuscript received February 5, 2004, revised August 20, 2004, accepted August 25, 2004