

21. 鈦合金人工牙根加工成形技術

陳一雄、林明哲
義守大學 機械與自動化工程系副教授

摘要

以鈦合金為材料的人工牙根由於形狀複雜且具有多樣不同的尺寸，故製程上包括多道的車削、銑削、沖孔及車牙等加工步驟。本研究針對走心式車銑複合機(Swiss-type Lathe) (以下簡稱車銑複合機)應用於鈦合金人工牙根的相關加工技術進行研究與開發。主要執行項目為(一)車銑複合機之操作技術，(二)刀具的設計與開發，尤其是旋風切削的刀具，(三)CAD/CAM 技術的導入。本研究完成兩套旋風車削刀具之設計及製作，利用CAD/CAM軟體完成鈦合金人工牙根刀具路徑的安排並成功產生NC碼，最後搭配Star SR-20R車銑複合機進行人工牙根的實際加工。

關鍵字：人工牙根、車銑複合機、旋風車削、CAD/CAM

一、前言

鈦或鈦合金由於具有生物相容性，因此在牙科、骨科及整型外科植入材料的選用上有其優點。但鈦或鈦合金也具高化學反應性、低熱傳導性、高溫下高強度、及低彈性模數等特性，因此加工性很差。如何選用最有效的鈦合金加工技術是醫療元件製造的一項挑戰[1-4]。

以鈦合金為材料的人工牙根由於形狀複雜且具有多樣不同的尺寸，故製程上包括多道的車削、銑削、沖孔及車牙等加工步驟，為了加工定位的準確方便及製程工時的節省，加工設備以車銑複合機最為適合。

旋風車削的技術在相關論文皆未涉及細節[5-7]。目前國內只有極少數廠家使用旋風切削，其刀具亦由歐美進口，由刀具訂購到交貨往往需時3週以上，在成本及時效上均極不利，故有必要發展刀具設計製造的自主能力。

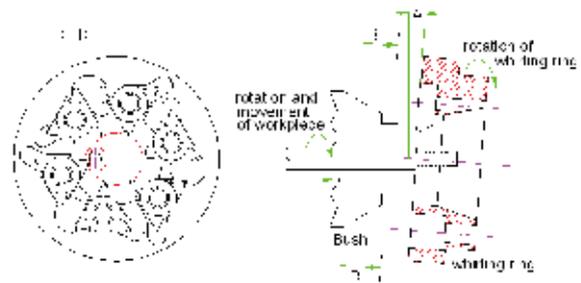
CAM被用於3D銑削加工已然十分成熟。但在車削領域中，由於刀具路徑並不複雜，工業界仍停留於手工編輯刀具路徑程式的階段，對CAM的引進並不積極，因而熟悉CAM的人才並不多。當進入車銑複合加工階段，國內CAM的人才更是幾乎絕無僅有。而複雜工件(如前顎齒人工牙根)的加工往往需要很多時間手工編輯刀具路徑程式。能將CAM導入車銑複合加工，將對業界發揮極大助益。

二、研究方法

以下先闡述旋風切削螺牙時，在刀具設計上，尤其是刀刃尺寸設計上所做之分析，並設計出刀刃尺寸。之後則說明以車銑複合機進行人工牙根加工之流程及CAD/CAM技術的導入。

2.1 旋風車削幾何分析與刀刃設計

以旋風刀具切削螺牙的方式可以由圖一做說明。工件以慢速旋轉(數十RPM)，並配合每轉一個螺牙距的進給率。切削的進行乃依靠裝在高速旋轉的旋風車刀頭(whirling ring)上的刀刃。由於一次走刀即可完成螺牙的切削，生產率可比普通車削或傳統車削螺牙提高數倍。且導套與旋風車刀頭的相對位置是固定的，故而切削點與工件的被支撐點(工件被導套支撐住)之間的距離恆為一相對小的定值，使得工件剛性佳，加工尺寸及品質容易維持且不受螺牙長或短的影響，更適合切削長螺牙。



圖一 以車銑複合機進行旋風切削螺牙

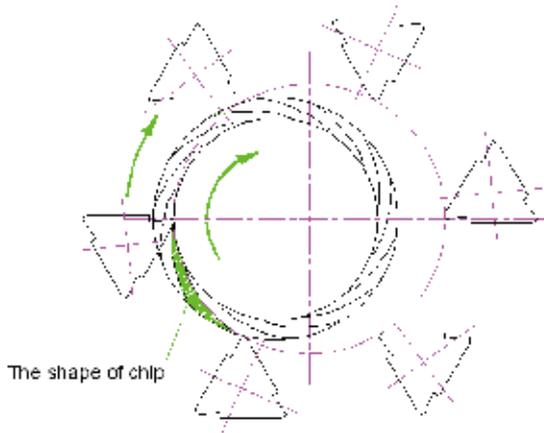
圖二中的深色區為旋風車刀切削時每一切刃所負責切削區域的示意圖，圖中所示為工件每轉一圈被14刃切削過之情形。工件每轉實際切削次數，可由下例得知。鈦合金之切削速度大約在30-60m/min，取45m/min，若牙根螺牙外徑Do為3.5mm，則旋風車刀頭之轉速T應為

$$\omega = 45 * 1,000 / (\pi D_o) = 4,092 \text{ rpm} \quad (1)$$

但因測試機台Star SR-20R最高轉速限制，取旋風車刀頭轉速3,000rpm。刀頭上有6刃，使用工件轉速50 rpm，則實際上工件每一旋轉將被N次刀刃經過

$$N = 3,000 * 6 / 50 = 360 \text{ (tooth/rev)} \quad (2)$$

由於N值頗大，使得每一刀刃所受之切削力相對變小，故可延長刀具之壽命。



圖二 旋風切削螺牙時每一刀刃所負責切削掉工件面積之示意圖

旋風切削刀頭與工件並非同軸，而是具一傾斜角度(螺牙的導角，如圖一中之角A)，

$$N = 3,000 * 6 / 50 = 360 \text{ (tooth/rev)} \quad (3)$$

以本研究使用之編號IM07人工牙根(圖三)為例，其螺牙之導程 $P = 0.8\text{mm}$ 。若D以螺牙之外徑 $D_o = 3.3\text{mm}$ 代入，則

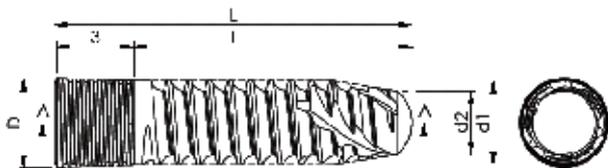
$$N = 3,000 * 6 / 50 = 360 \text{ (tooth/rev)} \quad (4)$$

若D以螺牙之根徑 $D_r = 2.5\text{mm}$ 代入，則

$$N = 3,000 * 6 / 50 = 360 \text{ (tooth/rev)} \quad (5)$$

若D以螺牙之平均徑 $D_{avg} = 2.9\text{mm}$ 代入，則

$$A = \tan^{-1}(0.8 / (\pi * 2.9)) = 5.0^\circ \quad (6)$$



圖三 IM07人工牙根

圖四說明旋風切削螺牙時刀具外形與螺牙斷面之關係，圖中a為刀具之寬度 = 0.65mm (以IM07人工牙根之切削為例)，b為刀具之深度 = 0.4mm，d為螺牙斷

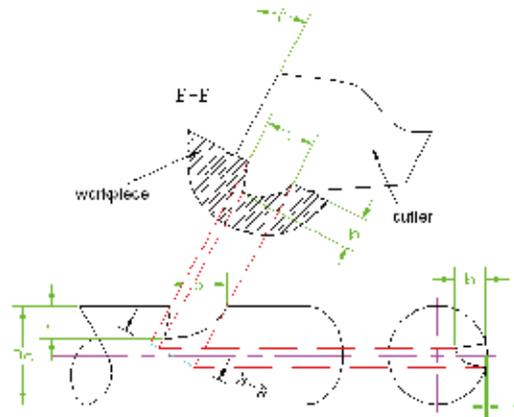
面之寬度，e為螺牙斷面之深度，A為螺牙的導角，亦即旋風車刀頭之傾斜角， D_o 為螺牙之外徑，c為工件外緣到螺牙頂部之距離。其中c及d之值可由下式得出，

$$c = \frac{D_o}{2} - \sqrt{\left(\frac{D_o}{2}\right)^2 - \left(\frac{a \sin A}{2}\right)^2} \quad (7)$$

$$d = \frac{a}{\cos A} \quad (8)$$

由圖四可知

$$e = b + c = b + \left(\frac{D_o}{2}\right) - \sqrt{\left(\frac{D_o}{2}\right)^2 - \left(\frac{a \sin A}{2}\right)^2} \quad (9)$$



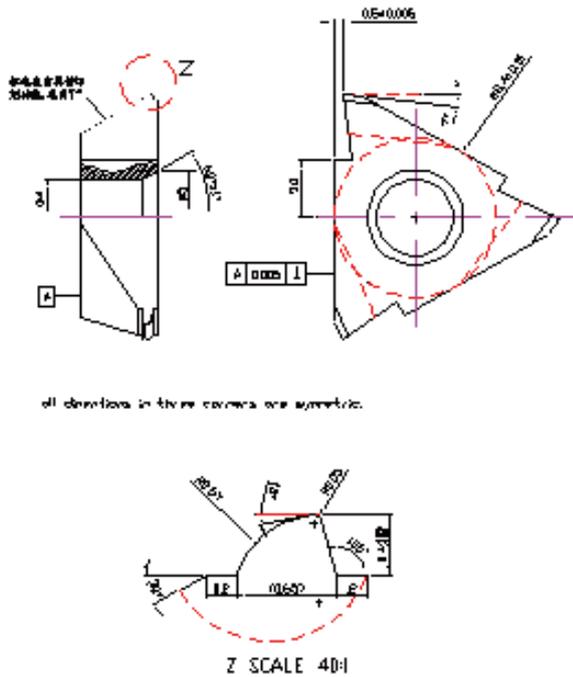
圖四 旋風切削螺牙時刀具輪廓與螺牙斷面之關係圖

表一說明以不同方式解釋螺牙部直徑可以分別得到4.4°、5.0°、5.8°的旋風車刀頭傾斜角。第三欄為切削後螺牙斷面之寬度，d。第四欄為切削後螺牙斷面之深度，e。比較d值與刀具之寬度a值可知其差異皆小於1%或0.004mm，同時e值與刀具之深度b值之差異亦小於1%。此差異在工程上是可以忽略的。由上述分析可得以下結論：

- 1.旋風切削時，螺牙部直徑取螺牙外徑或取根徑其影響皆在1%之內，但一般取外徑與根徑之平均值。
- 2.當調整旋風車刀頭傾斜角時，若發生±0.5°的誤差，仍不會影響加工精度。
- 3.由於刀具輪廓與螺牙斷面差異極小，在設計刀具時螺牙斷面將直接用來作為刀具輪廓，而不需要經過校正。當然此狀況僅適用於低傾斜角時，當傾斜角較大時，刀具的輪廓並非牙根設計圖之螺牙斷面，兩者之間需經一轉換步驟，方能切削出正確的螺紋外形。圖五為針對IM07規格的人工牙根的螺牙部所設計的旋風切削刀具。

表一 以不同方式表示螺牙部直徑所得到旋風車刀頭傾斜角對切削結果的影響
(使用刀刃之寬度 $a = 0.65\text{mm}$ · 刀刃之深度 $b = 0.4\text{mm}$)

| D | A | d | e |
|-------------------|------------|-----------|-----------|
| (螺牙部直徑 · mm) | (旋風車刀頭傾斜角) | (螺牙斷面之寬度) | (螺牙斷面之深度) |
| 3.3(取 D_o) | 4.4° | 0.6519 | 0.40019 |
| 2.9(取 D_{avg}) | 5.0° | 0.6525 | 0.40025 |
| 2.5(取 D_i) | 5.8° | 0.6533 | 0.40033 |

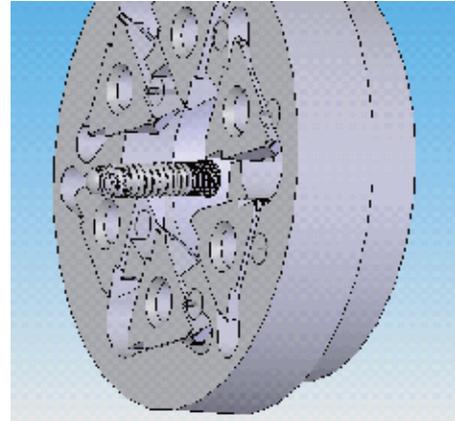


圖五 旋風切削刀之設計圖

由於國外刀具製造廠商並未提供相關尺寸，許多基本尺寸須經由使用三次元量測儀(CMM)量測相類似之旋風切削刀及旋風車刀環後，再經由逆向工程的方式得到。每一刀片具有三刃，上面並要編號，且要求刀具製造商在研磨刀刃時，必須先將不同刀片上同一編號之刀刃依序研磨後，再研磨下一編號之刀刃，以減少相同編號刀刃間之差異。由於每一旋風車刀環需安裝6片刀，相同編號刀刃差異較小時可得到最佳效能。

在圖五之前視圖中可見刀刃處具 7° 的逃角。在局部放大圖中，刃尖處的尺寸取自IM07螺牙的斷面，其原因已在之前解釋過。由於工件原尺寸為 $\varnothing 5$ ，而螺牙之外徑為 $\varnothing 3.3$ ，刀刃不僅需切削螺牙，亦須將多餘材料去除，因此刀尖往下延伸 2mm 且須

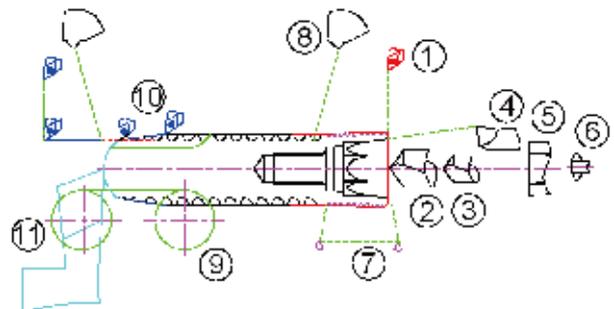
具備切削能力。故而右側視圖上標註：逃角 7° 、長 2mm 。圖六之3D圖可以更清楚瞭解旋風車刀與工件之間的相互關係。



圖六 旋風切削時刀刃與工件相對位置的3D圖

2.2 加工流程及CAD/CAM之導入

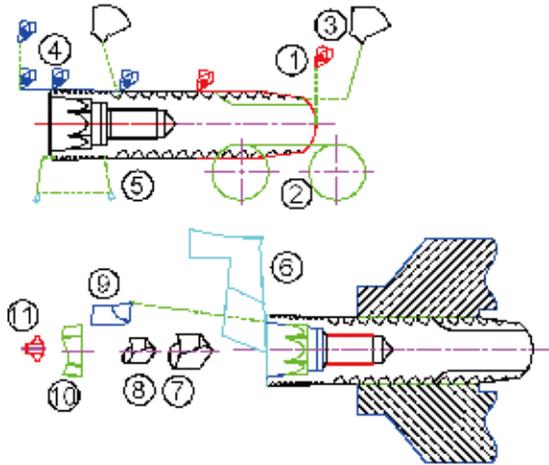
加工人工牙根之流程需使用多種不同的加工程序，以人工牙根IM07為例，可以規劃加工程序如圖七所示，所有的加工皆使用前軸。圖中的數字號碼表示加工之先後順序，其依序為車端面及外徑(1、facing and external turning)、鑽孔(2、3、drilling)、鏜椎度孔(4、boring)、插削(5、Broaching)內六角孔、內牙加工(6、internal thread whirling)、車細牙(7、threading)、旋風切削螺牙(8、external thread whirling)、銑削加工溝槽(9、milling)、車外徑(10)、及切斷(11、cut-off)。由於所有製程都在前主軸完成，若工件更為複雜，可能發生刀具太多而無足夠刀架可以安裝刀具的情況，且加工時間較長。



圖七 以車銑複合機加工人工牙根IM07之流程(一)

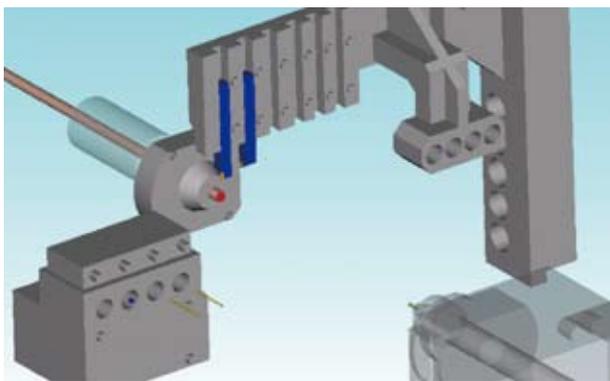
人工牙根IM07也可以規劃加工程序如圖八所示。加工順序依序為使用前主軸完成順序1-6的加工，製程分別為：車端面及外徑(1、facing and external turning)、銑削(2、milling)、旋風切削(3、external thread whirling)、車外徑(4、external turning)、車牙(5、threading)。之後由後主軸承接

工件作切斷(6、cut-off)。再以後主軸完成加工順序7-11，分別為：鑽孔(7、8、drilling)、鏜孔(9、boring)、插削內六角孔(10、Broaching)、及內牙加工(11、internal thread whirling)的加工順序。由於前後主軸可以同時加工，當後主軸加工時，前主軸可以進行下一個工件的前段加工。如此加工時間大約可以減半，且較不易發生刀架不足的狀況。唯加工程式碼較不易撰寫。



圖八 以車銑複合機加工人工牙根IM07之流程(二)

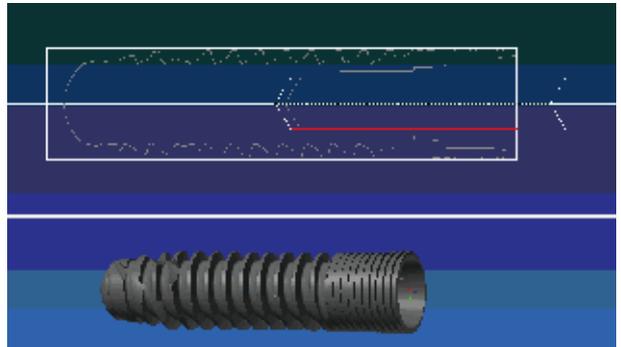
本研究經評估後認為PartMaker為最適用於車銑複合加工的軟體[8]。圖九為使用PartMaker模擬Star SR-20R刀軸與刀塔的配置。圖中鈦材由左方送入，車刀裝於正上方，共可裝六把。水平圓孔為放置鑽孔刀具，可用於前後軸加工。垂直圓孔可裝置動力刀具，用於前軸加工。另有四孔用於裝置後軸加工刀具。後軸主軸顯示於右下方。



圖九 模擬Star SR-20R刀軸與刀塔的配置

所有製程經規劃及模擬加工後，再經由客製化的後處理程式(Post processor)處理，即可產生NC碼。圖十為設定人工牙根鑽孔加工時的加工模擬圖。儘管CAM能取代繁瑣的手動編寫NC碼的過程，產生之NC碼可用與否，仍有賴於操作者對車銑複合加工的瞭解，某些基本功是不能廢除的。有些特

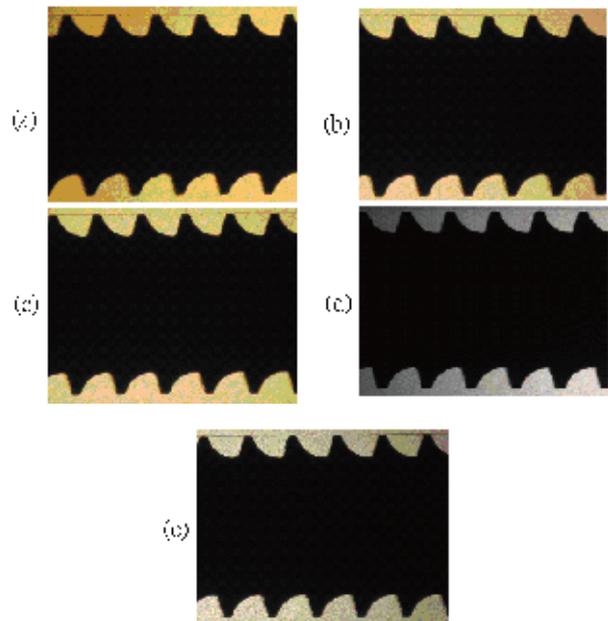
殊的加工程序無法在CAM上進行模擬，例如旋風車削，或插削(Broaching)內六角孔，此時就有賴使用者以手動方式補足。



圖十 設定人工牙根IM07的鑽孔加工(以副軸夾持)

三、結果與討論

圖十一為以旋風車刀座使用不同傾斜角實際切削的結果。其傾斜角分別為 3° 、 4.4° 、 5° 、 5.8° 、及 7° 。對照算式(4)-(6)之結果可知設定它們的原因。圖中螺牙之外徑為3.3mm，由圖可觀察到傾斜角對螺牙輪廓影響不大。表二是以投影機對五種螺牙量測的結果。其螺牙寬度及與螺牙深度與理論值相差皆在2%之內。因此證明本論文所推導的公式與實際加工吻合。圖十二為利用車銑複合機加工之人工牙根成品。



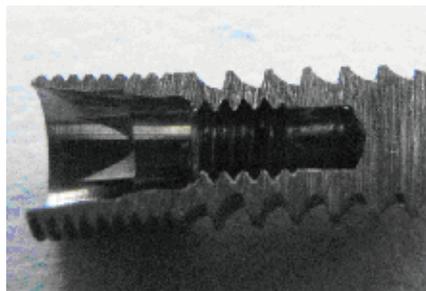
圖十一 使用不同傾斜角對螺牙輪廓的影響
(a) 3° , (b) 4.4° , (c) 5° , (d) 5.8° , (e) 7°

表二 使用不同傾斜角對螺牙寬度、深度、及節徑的影響

| Tilt angle | Width of thread (mm) | Depth of thread (mm) | Pitch of thread (mm) |
|------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 3.0° | 0.65 | 0.392 | 0.805 |
| 4.4° | 0.658 | 0.393 | 0.801 |
| 5.0° | 0.649 | 0.391 | 0.802 |
| 5.8° | 0.663 | 0.389 | 0.801 |



(a)



(b)

圖十二 IM07人工牙根成品 (a)外觀 (b)內部

四、結論

本研究已達成以下的目標：(一)車銑複合機之操作技術方面，經過持續的操作與試加工，已能掌握機器的加工特性。(二)旋風車削刀具的設計與開發。本研究發現當旋風車刀頭傾斜角在 $\pm 0.5^\circ$ 的誤差範圍內，仍不影響加工精度，而對於低傾斜角之螺紋，於設計刀刃時，若採用螺牙斷面作為刀刃輪廓，可不需要經過修正，車削出的螺牙斷面寬度及深度，尺寸誤差均在容許值內。現已完成兩套旋風刀具之設計與製作，並搭配車銑複合機進行加工，結果十分理想。(三) CAD/CAM技術的導入方面，經過評估，考量加工機台功能特性及工件加工步驟的需求，決定PartMaker較適合用於走心式車銑複合機。因此本研究導入此一軟體，並使用其完成加工機器與工件幾何模型之建立，且利用其模擬規劃人工牙根加工程序，以確認整個加工程序之正確性。現已完成一套製作鈦合金人工牙根時各加工刀具路徑的安排，並成功產生NC程式碼。經結合各種基本

刀具與旋風刀具的使用，再搭配Star車銑複合機使用之後處理器，將其整合入鈦合金人工牙根的加工技術中，並成功製作出尺寸正確的人工牙根成品。

誌謝

本研究承蒙經濟部「南科高雄園區齒科醫療器材研發計畫」經費補助(計畫編號：98-EC-17-A-04-04-0835)，並由金屬工業研究發展中心提供Star SR-20R走心式車銑複合機及人工牙根設計圖支援本研究之進行，謹此誌謝。

參考文獻

1. Ezugwu, E.O., Wang, Z.M., Titanium Alloys and Their Machinability — A Review, *Journal of Materials Processing Technology*, 68:262-274, 1997.
2. Watanabe, I., Kiyosue, S., Ohkubo, C., Aoki, T., and Okabe, T., Machinability of Cast Commercial Titanium Alloys, *J. Biomed. Mater. Res. (Appl. Biomater.)* 63:760-764, 2002.
3. Rahman, M., Wong, Y.S., and Zareena, A.R., Machinability of Titanium Alloys, *JSME International Journal, Series C*, Vol. 46, No. 1, p. 107-115, 2003.
4. Rahman, M., Wang, Z.G., and Wong, Y.S., A Review on High-Speed Machining of Titanium Alloys, *JSME International Journal, Series C*, Vol. 49, No. 1, p. 11-20, 2006.
5. Thread Whirling — One of the Oldest New Products in Town, 2002, <http://www.productionmachining.com/articles/>
6. Thread Whirling Makes All the Difference, *DECO Magazine*, 4/2005, <http://www.tornos.com/dnld/deco-mag/tornos-deco-mag-35-uk.pdf>
7. The Thread Whirling Process in the Hands of the Surgeon, *DECO Magazine*, <http://www.tornos.com/dnld/app/tornos-ap-md-twp-threadwhirling-uk.pdf>
8. PartMaker SwissCAM User Manual, Delcam plc.