

# Progressive Watermarking on Progressive 3D Meshes

Hung Kuang Chen<sup>1</sup> Yung-Hung Chen Guan-Nan Hu

<sup>1</sup>National Chin-Yi University of Technology, Taichung, Taiwan, R. O. C.,

hank@ncut.edu.tw

## 摘要

此篇論文中，我們將提出一個在三維漸進式多邊形網格上嵌入多重解析浮水印的作法。利用改進的嵌入法，配合漸進式網格的點分裂/還原結構，可將三維的漸進式浮水印資訊依漸進式網格的簡化/還原次序依序嵌入模型中。如此，浮水印在之後取出時，會隨著模型解析度不同，而得到不同解析度的浮水印圖形。此外我們的提出的作法，稍經修改後，除了可將多重解析的影像資訊嵌入外。我們的做法經實驗證實具有極佳的強健性，可抗多種攻擊，並能以少數的資訊即時萃取出明顯的浮水印。

**關鍵詞：**漸進式網格，版權保護，資訊隱藏，數位浮水印

## Abstract

Traditional researches on watermarking mostly focus on the protection of videos, images, and acoustic contents. Owing to the rapid development in 3D technologies, the 3D digital multimedia applications are thriving in recent years, which introduces the needs to protect 3D digital contents. In this paper, we propose a novel approach to embedding a secret watermark on a 3D polygonal mesh. With our new method, one can embed a progressively encoded watermark, either as a wavelet-transformed 2D image or as a progressive mesh of another 3D object, on the

protected 3D object. Through experimental results, we have found that the new method is robust and efficient.

**Keyword :** Progressive mesh, Copyright protection, Information hiding, Digital watermarking, Wavelet transformation

## 1. 前言

空間域的嵌入技術多是將浮水印資料嵌入模型的空間資料，諸如點座標、法向量，或其拓樸結構中。如 O.Benedens [13]使用改變表面法向量的做法來嵌入浮水印、R.Ohbuchi 等 [14][16][17]利用模型的幾何結構，結合 TSQ(Triangle Similarity Quadrature)及 TVR(Tetrahedral Volume Ratio embedding)的方法在頂點座標上嵌入浮水印。其餘還有使用 TSPS(Triangle Strip Peeling Symbol Sequence)、PSP(Polygon Stencil Pattern)在拓樸資料上嵌入浮水印等做法。本論文則參考 M. G. Wagner 等人的做法 [11]經由改變 ring 的中心點座標，將資訊隱藏入改變的座標中，如此改變幾何形狀做資訊嵌入的方法，亦屬空間域的三維模型浮水印嵌入技術。頻率域的嵌入方法，則是將浮水印嵌入模型計算出來的頻率資訊中。E.Praun 等人 [12]針對多解析模型找尋適合浮水印嵌入的低頻核心，並宣稱其做法可抵抗模型簡化的攻擊。R.Ohbuchi 等人 [15]藉由頂點連結性(vertex connectivity)，建立一個 kirchhoff

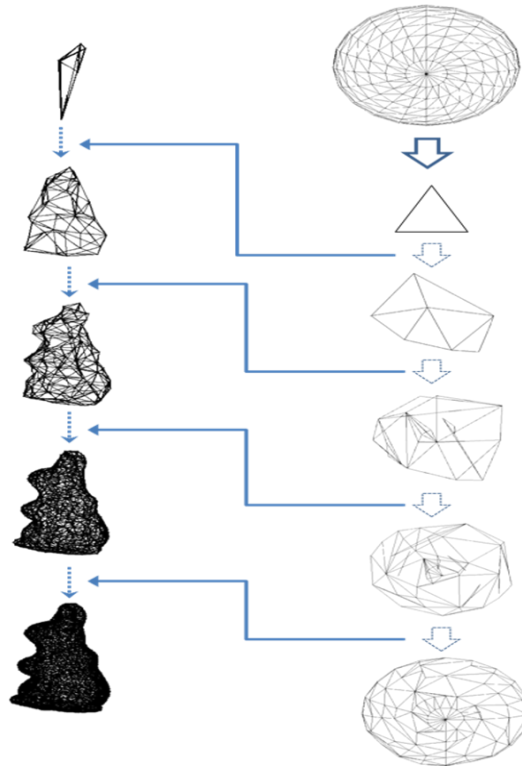


圖 1. Progressive mesh 嵌入 progressive mesh 示意圖。

矩陣並將它做特徵值分解，得到特徵向量 (eigenvector) 即為轉換域所使用的基底，並將浮水印資訊隱藏入模型的底頻中。本論文主要使用的嵌入方法，是類似 Kanai, et al[18] 的概念，他是將三維模型做多層解析小波轉換後，再將浮水印嵌入模型的底頻中，與本論文不同的地方在於，本篇是利用漸進式網格的方法，來達到模型不同頻率的轉換，將模型做不同權重的資料處理，然後再使用 M. G. Wagner 的資訊嵌入方法，將浮水印隱藏在模型的點座標中。

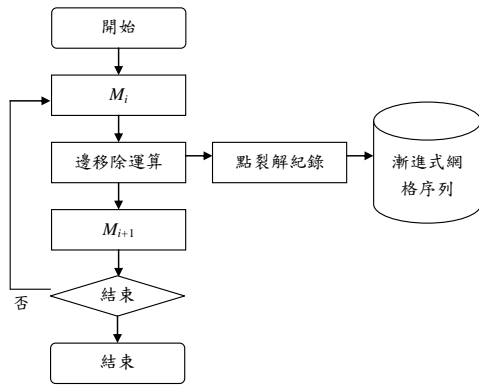
在本論文中，我們將提出一個應用於漸進式網格[5-7]上的浮水印方法。這個新的方法，不只可以對抗座標轉換、裁切、簡化攻擊，即使偽裝的三維模型遭到破壞，亦可以解譯出在視覺上權重相當高的浮水印。此外，這個改良的嵌入方法，除了將一般二維的影像當作浮水印嵌入外，還可以隱藏更為複雜的數據資料，如另一個三維的模型資料，在偽裝模型中。

## 2. 多解析浮水印嵌入之作法

如圖一所示，在考慮將三維浮水印嵌入三維物件的多邊形網格 (polygon mesh) 時，我們同時將三維浮水印以及三維物件的多邊形網格轉換為漸進式網格 (progressive mesh) 的格式，並將轉換後的浮水印由低頻製高頻依序嵌入漸進式網格的基礎網格 (base mesh) 與點分裂 (vertex split) 資料中。

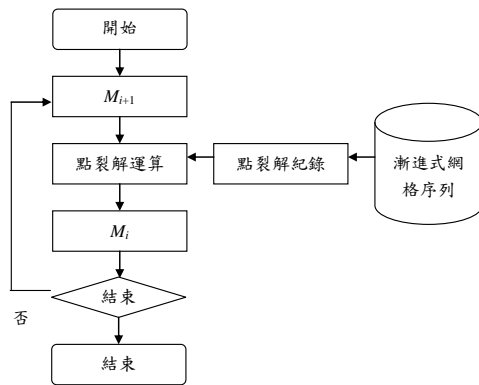
### 2.1. 三維模型的簡化與多重解析度處理

本論文中，我們要保護的目標物件為三維物件的多邊形網格。為了能達成呈現多重解析浮水印的效果，我們採用了 Hugues Hoppe 所提出之漸進式網格[5]。令輸入的網格為  $M_0$ ，經  $n$  次邊移除運算產生之最終產生的基礎網格為  $M_n$ ，製作及還原方式請分別參考圖二、圖三。



圖二：漸進式網格式序製作流程。

在經過轉換為漸進式網格式序的處理後，就可以根據點裂解紀錄的前後次序，依序的將模型做還原的動作。



圖三：漸進式網格式序還原流程。

## 2.2. 浮水印資料嵌入三維模型之作法

在考慮浮水印嵌入的問題時，首要的考量是：嵌入的浮水印，有否可能經得起基本的幾何轉換，如位移、旋轉、與放大縮小等攻擊。如何能於遭遇此類攻擊後，就算不能將浮水印完整的資訊解譯出，仍能取出足夠的資訊，表現原本嵌入圖形的特徵，以證明此模型的著作權。此外，亦當考量模型於嵌入浮水印之後，外觀是否會有明顯的失真。

將浮水印嵌入三維模型的作法，我們採用類似 Michael G. Wagner 等人的作法 [11]。在 Michael G. Wagner 的方法中，將浮水印打散分布在三維模型中，使得資料量不具有連續性，而其平均值嵌入方法，使三維模型能有更高的抵

抗攻擊能力。

Michael G. Wagner 的方法中，假設  $m+1$  是模型  $M$  上的點總數量 ( $0 \leq i \leq m$ )，要嵌入浮水印數量為  $k+1$  ( $0 \leq j \leq k$ )，浮水印資料為  $W = \{W_0, W_1, \dots, W_j, \dots, W_k\}$ 。給定模型上某一個點  $i$  及其 vertex ring,  $S_i$ ，我們可以計算一個由中心點到所有相鄰點，的平均向量  $n_i$  如下：

$$n_i = \frac{1}{|S_i|} \sum_{j \in S_i} (P_j - P_i) \quad (1)$$

其中  $P_i$  是 ring 的中心點， $P_j$  代表  $P_i$  的所有相鄰點， $S_i$  代表以  $i$  為中心點的 ring， $|S_i|$  代表 ring 中  $P_j$  的數量。

藉由算出模型上每個點的  $n$ ，利用所有的  $n$  可以算出一個全域的  $d$  值。

$$d = \frac{1}{m+1} \sum_{i=0}^m \|n_i\| \quad (2)$$

要將  $W$  集合完全嵌入  $M$  的步驟如下，首先設定  $j=0$ ，並且自訂一個  $c$  值，做為浮水印嵌入時錯誤控制調整，並且為浮水印取回時，金鑰計算的依據。

步驟 1. 找尋一個可以嵌入的 ring  $S_i$ ，利用  $d$ ，和  $n_i$  的長度量  $\|n_i\|$ ，可以計算出一個比值  $L_i$ ：

$$L_i = \frac{\|n_i\|}{d} \quad (3)$$

步驟 2. 因為  $L_i$  會是較小的數值，所以利用一個使用者傳入的  $c$  值，將  $L_i$  放大，目的是要將浮水印嵌入  $L_i$  的低位元，所以將 (3) 修改成：

$$L_i = \text{round}\left(\frac{\|n_i\|}{d} c\right) \quad (4)$$

步驟 3. 要將浮水印  $W_j$  嵌入  $L_i$  的方法為，在  $L_i$  裡面選取足夠儲存  $W_j$  的位元數  $b$  (bits)，較好的方法是，從  $L_i$  較低的位元中，選擇較少數量的  $b$ ，這樣會影響嵌入後的模型，幾何錯誤較小。之後，將由  $L_i$  選取的位元資料替換成  $W_j$ ，以得到嵌入浮水印的  $L'_i$ 。

步驟 4. 最後由  $L'_i$ ，反推得到  $S_i$  新的 ring 中心點座標  $P'_i$ ，就完成了對  $S_i$  的資料嵌入。

$$n'_i = L'_i \frac{d}{c} \frac{n_i}{\|n_i\|} \quad (5)$$

$$n'_i = \frac{1}{|S_i|} \sum_{j \in S_i} (P_j - P'_i) \quad (6)$$

$$P'_i = \left( \sum_{j \in S_i} P_j - |S_i| \times n'_i \right) \times \frac{1}{|S_i|} \quad (7)$$

步驟 5. 將  $j$  遞增 1， $j = j + 1$ ；若  $j \leq k$  判斷為 true，則回到步驟 1，並將要嵌入資料  $W_j$  嵌入該 ring 中，反之，繼續步驟 6。

步驟 6. 此時  $W$  集合已經完全嵌入模型  $M$ 。在每個  $S_i$  嵌入資料後，會改變它的中心點座標，所以，若要將浮水印取回，由(1)可計算出嵌入後的  $n'_i$ ，只需要將  $n'_i$  帶入(2)，求得嵌入後的全域  $d'$  值，另外，還需要一個嵌入後的  $c'$ ，來記錄嵌入前後  $d$  和  $d'$  的比值變化：

$$c' = c \frac{d'}{d} \quad (8)$$

如此，將嵌入後的資訊  $d'$ 、 $c'$  和  $n'_i$ ，帶入(4)求得正確的  $L'_i$ ，再依照當初嵌入的位元數量，取出  $L'_i$  的低位元，就可得到當初嵌入的浮水印資料。

### 2.3. 圖形和模型的認證方式

取出藏入的浮水印後，進一步就是要認證這個浮水印是否正確。本論文使用正規劃關連值(normalized correlation,NC)[19][22]的方法，來

偵測萃取出的浮水印和原來浮水印資料，相似程度的衡量工具，作為浮水印的有效認證。統計的好處在於，有一定的容錯性與客觀性。公式如下：

$$NC = \frac{\sum_i \sum_j W(i, j) W'(i, j)}{\sum_i \sum_j [W(i, j)]^2} \quad (9)$$

當萃取出的浮水印和原始的浮水印完全契合時，NC 值等於 1；當萃取出的浮水印黑點和原始的浮水印黑點不一致時，NC 值會降低。NC 值的大小僅作為萃取浮水印品質好壞的參考，並不表示每個人以肉眼觀察都有相同的認同。

### 2.4. 模型比較工具

在模型嵌入浮水印前後，可以用各種比較方法，來檢測原始模型和偽裝模型之間的相異程度。本論文使用計算 NC 值的方法、計算 PSNR 的方法及使用 Metro 工具來做檢測。要計算模型 PSNR 值，和二維圖傳入計算的資料有些許不同，本篇將計算 PSNR 公式，稍微修改為計算三維模型之 PSNR 如下。

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{B^2}{MSE} \right) \text{dB} \quad (12)$$

其中， $B$  為模型 bounding box 的對角線長度，在公式(11)中， $(\alpha_{ij} - \beta_{ij})$  為原始模型和嵌入浮水印模型之間，相對印點的誤差距離。

此外，我們也採用了 Visual and Computer Graphics Library 提供的 Metro[23]，來測量二模型之間的相似程度，做為評量的準則。在 Metro 比較二模型之間的相異程度後，會產生一個 hausdroff 值，數值越小表示二模型越相似。

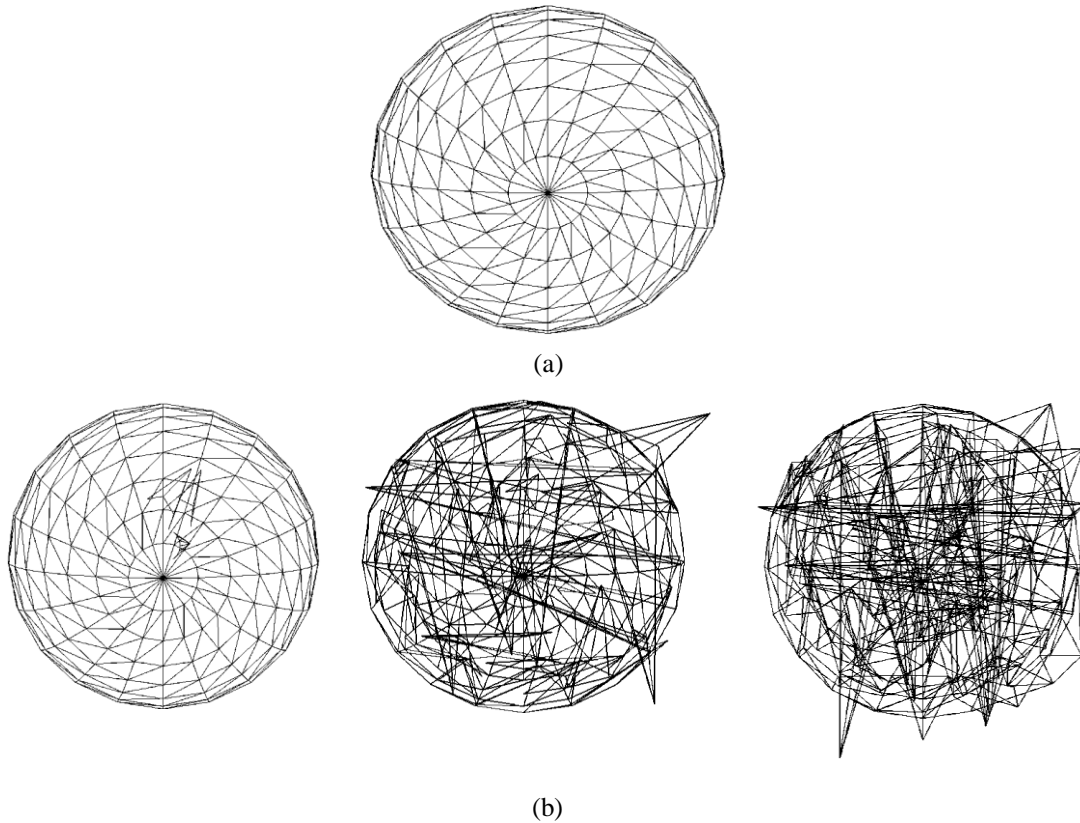
## 3. 實驗結果

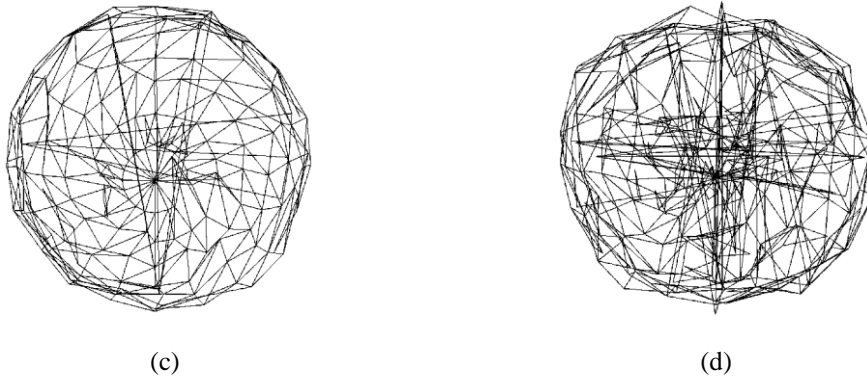
浮水印在嵌入模型的步驟中多少都會對原始模型造成破壞，我們的實驗中，首先會探討浮水印在各種嵌入條件下，對原始模型的破壞程度。其次是浮水印在不同嵌入條件下，取出的精確度。本次實驗嵌入的浮水印為二維影像，我們將探討在不同的設定值下，嵌入浮水印後，模型的變形程度，以及浮水印的強韌性和對原始模型的破壞程度之間的關係。此外，還有浮水印在縮放、旋轉和位移與雜訊(noise)攻擊下，浮水印之強韌性。本實驗用來測試的浮水印圖形，為 3D 模型，浮水印資料為 382 個點座標的圓形，如圖四 (a)，資料量為 1146 個筆，如圖四。將此模型轉換為漸進式網格後，得到一個基礎網格與點裂解紀錄。我們將此筆浮水印資訊，嵌入在點裂解紀錄中。

點，本章實作一些對於模型的基本攻擊，並測試在此類攻擊下，多解析模型浮水印的強韌性高低。對於基本的幾何轉換 RST 攻擊，因為 Wagner[11]的做法能夠有效的抵抗此類攻擊，所以浮水印取出的結果強韌性無庸置疑。接下來探討三維多解析模型浮水印對於 noise 攻擊的抵抗力，在本實驗設定  $c$  為 100000， $b$  為 10bits，在模型還原的 11460 個 VSplite sequence 不同位置做浮水印嵌入，VSplite sequence 由接近 base mesh 的位置開始到最後，代表模型由低頻到高頻的位置。實驗做法是將模型還原到 11460 個 VSplite，並在前 1146 個 VSplite 還原做浮水印嵌入，之後對偽裝模型 90% 表面做 noise 攻擊，借以檢測浮水印資料量多寡，對於 noise 亂數攻擊的閃避能力。由圖四 (b) 可看出，在同樣設定值的 noise 攻擊下，因為三維模型的資料量較少，所以能夠避開 noise 攻擊的機率較大。

### 3.1. 浮水印的強韌性

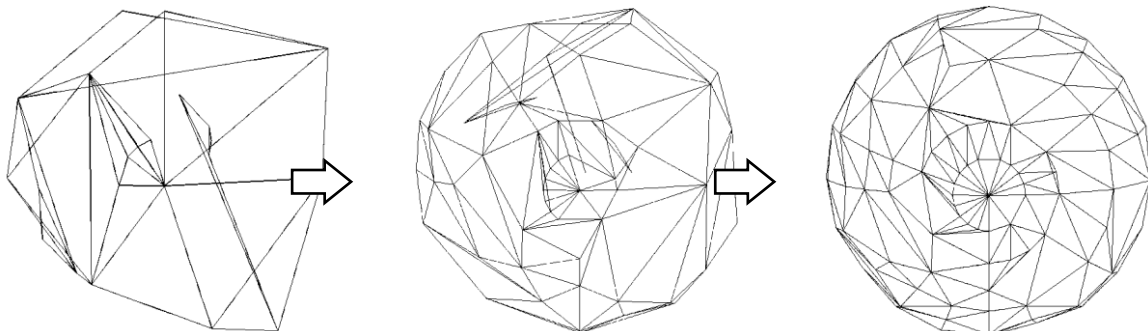
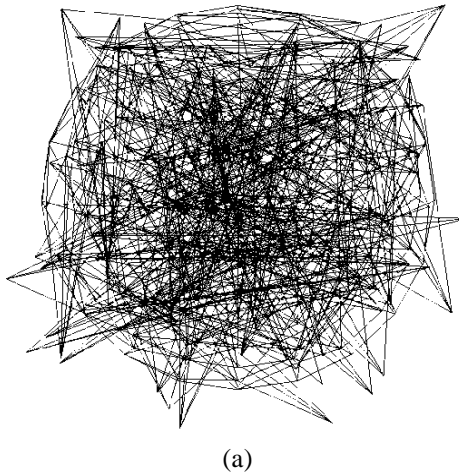
基於上述各種使用模型作為浮水印的優

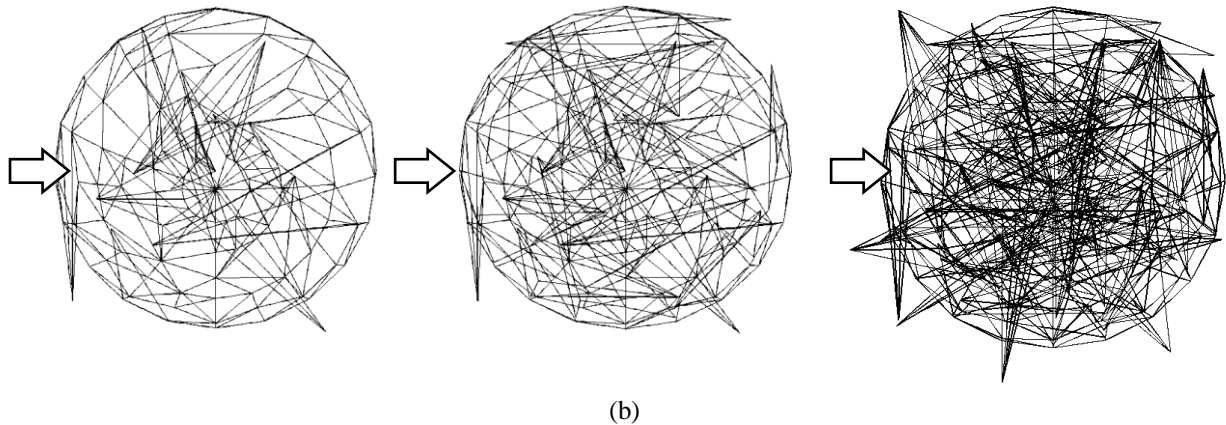




圖四:三維模型浮水印對 noise 攻擊的閃避能力。(a)原始浮水印模型。(b)在同樣設定值的 noise 攻擊下，取出的三維多解析模型浮水印。不同 noise 強度下所取出的三維多解析浮水印。(c) noise 振幅強度為 ring 長度的 0.01 倍。(d) noise 振幅強度為 ring 長度的 0.05 倍。

在 noise 振幅強度為 ring 長度的 0.01 倍和 0.05 倍的攻擊下，取出的三維多解析浮水印的外觀。由圖四可以看出，在較小的 noise 振幅強度下，取出的模型浮水印破壞較小，在越大的 noise 振幅強度攻擊下浮水印失真多。由於三維模型的點座標是浮點數的型態資料非常複雜，所以在 noise 攻擊之後，之前嵌入的三維多解析模型浮水印很容易受到破壞，尤其是越高頻的地方影響越大，在還原到最後的資料表現形狀，往往都是千瘡百孔，如圖五(a)。但是，若是將取出的浮水印，由還原的順序一一觀察可以發現，三維多解析模型浮水印在低頻的部分並未受到嚴重的破壞，大部分都是受到高頻較多破壞的影響，而影響到浮水印的表現，如圖五(b)。由此可以得知，新的嵌入方法不但可以將模型嵌入模型，並且將模型較重要的低頻部分，隱藏入另一模型的低頻部分，還兼具了強韌性。





圖五:受 noise 攻擊後取出的三維浮水印解析圖。(a)由 noise 攻擊後的模型，取出的三維多解析浮水印還原最後結果。(b)將取出的多解析三維浮水印漸進還原。

#### 4. 結論

本論文提出的作法，簡而言之就是模型嵌入模型的製作，希望能將浮水印的低頻嵌入到模型的低頻中，來達到增加強韌性的效果。因為本論文使用的浮水印，是以三維模型的表現型式為主，所以對於三維模型高低頻的分析，主要還是使用 progressive mesh 的作法。因此，做法的細節是將 progressive mesh 嵌入到 progressive mesh 中，可增加浮水印的強韌性，此外，利用 Wagner[11]的嵌入方法，同樣能夠抵抗基本的幾何轉換攻擊，更多詳細步驟，如下所示：

1. 首先將要做為浮水印嵌入的三維模型，將模型上所有的點座標，正規化至一個固定範圍，如-1~1之間，這樣方便之後將模型的點座標做量化，並取得每個點座標 x,y,z 的索引值，之後便是將這些索引值，做為嵌入的資料。
2. 將正規化後的浮水印模型做 progressive mesh 處理，如此，可以得到浮水印模型較重要到不重要的部份。
3. 最後，便可將浮水印較重要的低頻部份，隱藏到目標被嵌入模型較重要的部份，原理如同，離散小波圖形將較重要的部份，嵌入到模型較重要的部份，因為嵌入方法加入 progressive mesh 的特性，所以可以由

大模型的低頻開始做嵌入，同理，小模型也是由它 progressive mesh 的低頻，嵌入到大模型低頻中，所以較不會受攻擊的低頻部分，保護了浮水印較重要的低頻部分，可以增加浮水印的強韌性。

缺點是取回浮水印時，需要額外漸進式網格點分裂的序列，才能得知如何從嵌入的模型中，取回浮水印的順序，並且模型拓樸結構必須和原始模型一致，若是模型拓樸結構被更改，必須做重新取樣的動作，才能順利做漸進式網格還原，並取回浮水印資料。對於上述缺點的改進，若是模型對於漸進式網格簡化的步驟，尋找簡化順序的方法，能夠有一致性，就可以在取回浮水印時，直接做漸進式網格簡化，不需要紀錄之前還原的順序。但是，對於模型拓樸結構被攻擊的情況來說，還是必須要將模型還原到原始的拓樸狀態，才能有效的作漸進式網格簡化。上述缺點，還是本論文有待改進的地方，還有待之後對相關問題加以研究，得到新的改進方法。此外，我們使用漸進式網格的做法，對模型拓樸結構的依賴性較大，所以相對的重新取樣的動作就很重要，若是模型拓樸結構有改變，漸進式網格會無法正確的演算，就無法取出浮水印圖形，對重新取樣依賴性太強，也是有待改進的地方。

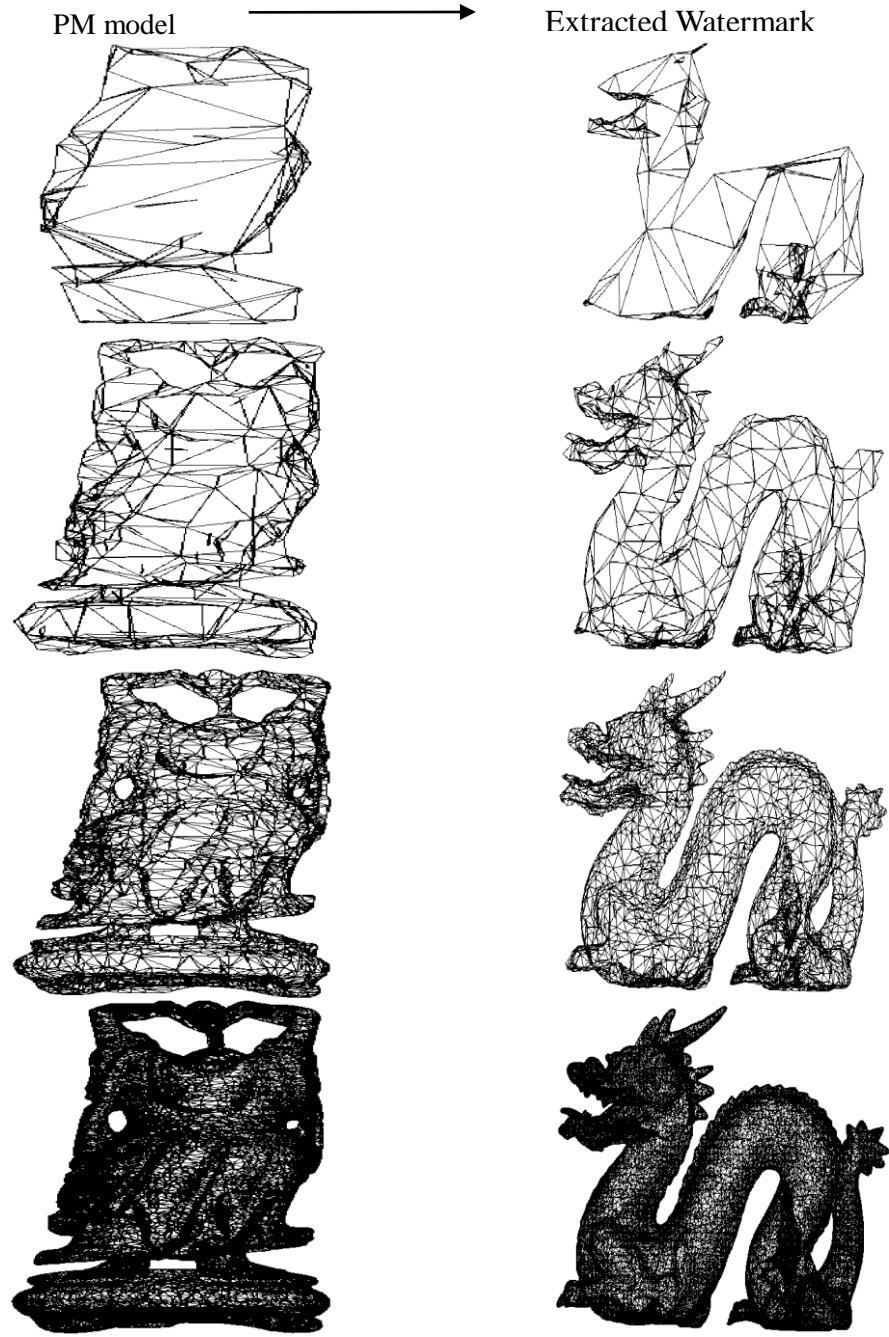
#### 參考文獻

- [1] I.J.Cox, J.Kilian, T.Leighton and T.Shamoon, "Secure Spread Spectrum Watermarking for Multimedia", IEEE Transactions on Image Processing, Vol.6, No.12, 1997, pp.1673-1687.
- [2] I.J.Cox and M.L.Miller, "A review of watermarking and the importance of perceptual modeling", Proc.SPIE Conference on Human

- Vision and Electronic Imaging II, Vol.3016, February 1997, pp.92-99.
- [3] S. H. Low, N. F. Maxemchuk, "Performance Comparison of Two text Marking Methods," IEEE JSAC, vol. 16, no. 4, May 1998, pp. 561-572.
- [4] W. Bender, D. Gruhl, N. Morimoto and A. Lu, "Techniques for data hiding", IBM Systems Journal, Vol.35, Nos.3&4, 1996, pp.313-336.
- [5] H. Hoppe, "Progressive meshes", ACM SIGGRAPH 1996 Conference Proceedings, 1996, pp. 99-108.
- [6] H. Hoppe, "Efficient implementation of Progressive meshes", Computers and Graphics, Vol. 22, No. 1, 1998, pp. 27-36.
- [7] H. Hoppe., "View-Dependent Refinement of Progressive meshes", Computer Graphics (SIGGRAPH'97 Proceedings), 1997, pp.189-198.
- [8] H. J. Wang and C. C. J. Huo, "A multi-threshold wavelet coder (MTWC) for high fidelity image compression", IEEE Proceedings International Conference on Image Processing, Vol. 1, 1997, pp. 652-655.
- [9] J. M. Zhong, C. H. Leung and Y. Y. Tang, "Wavelet image coding based on significance extraction using morphological operation," IEEE Proceedings Image and Signal Processing, Vol. 146, No. 4, Aug. 1999, pp. 206-210.
- [10] M. Craizer, E. A. B. D. Silva and E. G. Ramos, "Convergent algorithms for successive approximation vector quantization with application to wavelet image compression," IEEE Proceedings-Vision Image and Signal Processing, Vol. 146, No. 3, Jun. 1999, pp. 159-164.
- [11] M. G. Wagner, "Robust Watermarking of Polygonal Meshes", Proc. Geometric Modeling & Processing 2000, Hong Kong, April 10-12, 2000, pp. 201-208.
- [12] E. Praun, H. Hoppe, and A. Finkelstein, "Robust mesh watermarking", Microsoft Technical Report TR-99-05.
- [13] O. Benedens, "Geometry-base Watermarking of 3D Models", IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.19(1), pp.46-55.
- [14] R. Ohbuchi, H. Masuda and M. Aono, "Embedding Data in 3D Models", in: Steinmetz et al. (eds.), Lecture Notes in Computer Science No.1309 (Proceedings of the IDMS'97, Darmstadt, Germany, September 1997), Springer, Berlin, Germany, 1997, pp.1-11.
- [15] R. Ohbuchi, A. Mukaiyama, and S. Takahashi, "A frequency-domain approach to watermarking 3D shapes" Computer Graphics Forum, Vol.21, No.3, 2002, pp.373-382.
- [16] R. Ohbuchi, H. Masuda and M. Aono, "Watermarking Three-Dimensional Polygonal Models Through Geometric and Topological Modifications", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol.16, No.4, 1998, pp.551-560.
- [17] R. Ohbuchi, H. Masuda and M. Aono, "Data Embedding Algorithms for Geometrical and Non-Geometrical Targets in Three-Dimensional Polygonal Models", Computer Communications, 1998.
- [18] S. Kanai, H. Date, and T. Kishinami, Digital Watermarking for 3D Polygons using Multiresolution Wavelet Decomposition, Proc. Sixth IFIP WG 5.2 GEO-6, Tokyo, Japan, December 1998, pp. 296-307. (<http://minf.coin.eng.hokudai.ac.jp/members/kanai/wml-geo6.pdf>)
- [19] 陳同孝、張真誠、黃國峰，數位影像處理技術，旗標出版股份有限公司，2004。
- [20] J. M. Shapiro, "Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients," IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 41, No. 12, Dec. 1993, pp.3445 - 3462.
- [21] A. Munteanu, J. Cornelis, G. V. D. Auwera and P. Cristea, "Wavelet image compression - the quadtree coding approach," IEEE Transactions on Technology in Biomedicine, Vol. 3, No. 3, Sept. 1999, pp. 176-185.
- [22] C. T. Hsu and J.L.Wu, "Hidden digital watermarks in images," IEEE Transactions on Image Proceeding, Vol.8, Jan. 1999, pp.58-68.
- [23] Visual and Computer Graphics Library, <http://vcg.sf.net>



PM  
模型  
還原



圖六:由不同解析度的偽裝模型中取出不同解析度的浮水印模型。