

明新科技大學 校內專題研究計畫成果報告

3D 動畫模型之幾何壓縮 Geometric Compression for 3D Animation Models

計畫類別： 整合型計畫 個人計畫

計畫編號：MUST - 97 資工 - 02

執行期間：97 年 3 月 1 日 至 97 年 9 月 30 日

計畫主持人：曾俊霖

共同主持人：

計畫參與人員：曾柏文、陳晉弘、陳暄晴

處理方式：除涉及專利或其他智慧財產權外得立即公開，
唯必要時本校得展延發表時限。

可立即對外提供參考

(請打√) 一年後可對外提供參考

兩年後可對外提供參考

執行單位：明新科技大學 資訊工程系

中 華 民 國 97 年 10 月 31 日

中文摘要

3D 物件壓縮的主要目的在於降低 3D 模型之儲存成本，一個 3D 動畫模型往往是由許許多多的 3D 靜態模型來加以組成，因此，為了呈現出真實的動畫模型，我們通常需要許多的三角片資訊。大量的三角片資訊雖然可以較為真實地呈現出該 3D 模型，然而，也相對地增加了較高的儲存成本，為了降低高儲存的成本，我們通常會利用漸進式壓縮來減少描述該模型所需之三角片量，但相對地隨著三角片資訊的減少，當然也會造成失真的情形，為了在這兩者之間取得平衡，本計畫提出了 Temporal Discrete Shape Operator (TDSO) 概念，利用 TDSO 來減少描述 3D 動畫模型所需的三角片量，並適度地減緩壓縮所造成的失真現象。在本計畫中，我們進行相關的研究實驗，並與在壓縮領域上極為著名之 Principal Component Analysis (PCA) 方法進行比較，驗證本計畫所提出壓縮法之優越性，另外，在失真的測量上本計畫則以 Root Mean Square (RMS) 來進行量化比較。經過比較實驗後可知，本計畫所提出之 TDSO 方法較 PCA 更能在壓縮的過程中減緩失真的情形。

關鍵字：計算機圖學、Temporal Discrete Shape Operator、漸進式壓縮、表面分析

Abstract

The goal of 3D object compression is to reduce the storage cost of 3D models. A 3D animation model comprises many 3D static models. Hence, in order to display a realistic animation model, many triangles are required. However, the higher storage-cost models have higher computational costs. Progressive compression is exploited to reduce the storage cost and computational cost of 3D models. However, progressive compression easily leads to the distortion of the 3D models. This study proposes a feature-sensitive progressive compression method to compress the 3D models. This method uses the temporal discrete shape operator (TDSO) to analyze the animated surface variations. It can reduce the number of triangles in the 3D animation models, and simultaneously it does not increase the distortion caused by compression. Experimentally, this study compares root mean square (RMS) errors in this method with those of the principal component analysis (PCA) compression method. Experimental results show that our approach can preserve more contour features than the PCA approach at the same compression ratio.

Keyword: computer animation, temporal discrete shape operator, progressive compression, surface analysis

目錄

中文摘要	II
Abstract	III
目錄	IV
圖目錄	V
表目錄	VII
第一章 簡介	1
第二章 主成分分析壓縮法	3
第三章 Temporal Discrete Shape Operator	12
第四章 實作結果與分析	17
第五章 結論與未來之展望	24
參考文獻	25

圖目錄

圖 1、主成分分析法涵蓋率示意圖	5
圖 2、主成分分析利用SVD進行主成分萃取之示意圖	7
圖 3、SVD分解示意圖	8
圖 4、主成分分析壓縮法在不同基底數的壓縮效果	9
圖 5、主成分分析法壓縮後所造成的變形現象	11
圖 6、Shape Operator示意圖	12
圖 7、估計點p的Shape Operator之示意圖	13
圖 8、利用Discrete Shape Operator分析模型表面的結果	14
圖 9、Discrete Shape Operator在 3D camel動畫序列之不同影格模型上的變化	15
圖 10、利用Temporal Discrete Shape Operator萃取 3D動畫序列中高運動量的部位	16
圖 11、針對 camel之 3D動畫序列進行主成分分析法以及TDSO法進行壓縮的比較圖。 在主成分分析法方面，本計畫針對 3 bases、5 bases以及 7 bases分別進行失真誤 差量測並比較。	18
圖 12、針對 camel之 3D動畫序列進行主成分分析法進行壓縮後的結果。	19
圖 12、針對 camel之 3D動畫序列進行TDSO進行壓縮後的結果(壓縮到僅具 30%的資料 量)。	19
圖 14、針對 cat之 3D動畫序列進行主成分分析法以及TDSO法進行壓縮的比較圖。在主 成分分析法方面，本計畫針對 3 bases、5 bases以及 7 bases分別進行失真誤差量 測並比較。	20
圖 15、針對 cat之 3D動畫序列進行TDSO進行壓縮後的結果(壓縮到僅具 30%的資料 量)。	21
圖 16、針對 horse之 3D動畫序列進行主成分分析法以及TDSO法進行壓縮的比較圖。在	

主成分分析法方面，本計畫針對 3 bases、5 bases 以及 7 bases 分別進行失真誤差量測並比較。22

圖 15、針對 horse 之 3D 動畫序列進行 TDSO 進行壓縮後的結果(壓縮到僅具 30% 的資料量)。23

表目錄

表 1、TDSO與PCA壓縮方法的壓縮效果比較(camel 模型之 3D動畫序列)	17
表 2、TDSO與PCA壓縮方法的壓縮效果比較(cat 模型之 3D動畫序列).....	20
表 3、TDSO與PCA壓縮方法的壓縮效果比較(horse 模型之 3D動畫序列).....	21
表 4、TDSO的壓縮失真改善程度(對camel、cat、horse 模型之 3D動畫序列).....	23

第一章 簡介

3D(Three Dimension)技術的研討隨著硬體技術的日新月異，在近幾年來是個相當熱門的話題。由於架構在 3D 環境上的虛擬實境(Virtual Reality)技術日趨成熟，幾乎到處都可以見到 3D 技術的影子。虛擬實境與網路多媒體技術可說是目前最熱門的話題，例如在網路中呈現 3D 模型的場景；而應用在 3D 圖形的表現上，最常見的莫過於建築物的導覽，如虛擬博物館、樣品屋導覽等。由於這類的 3D 幾何圖形大多以三角片構成，為了視覺可見度，模型必須控制在一定的精細度，所以三角片的數目往往都非常的大，若想在虛擬實境下即時的描繪物件，可以說是相當不容易。

虛擬實境是另一個 3D 幾何圖形常被應用到的領域。在精細度要求的考量之下，這些 3D 幾何圖形的多邊形數目通常很大，例如醫療、航空、汽車等。由於互動是虛擬實境中最重要的因素之一，若要將這些大量的 3D 模型即時地描繪出來，實在不太容易。由於 3D 模型的多邊形數目愈大，將導致其顯像速度相對地降低，因此要達到即時呈現的互動畫面實在很困難。所以對這些巨大的資料量要達到互動，常常需要用精確度去換取速度。

在 3D 電腦圖學應用，多邊形模型常常被使用來表示單一物件和場景。物件主要的構成元件(primitive)通常是三角片，因為它們對於顯像是比較簡單且有效率。由於現今硬體與軟體的顯像都以三角片來呈現 3D 模型，所以三角片在 3D 電腦圖學仍然是一個重要的模型物體元件。

模型以三角片來顯像是個優點但卻也是個缺點。在工業上的設計和科學上的視覺化領域的環境，將常使用大量的三角片去表示一個平滑的表面，而這將造成千萬或億或者更多的三角片。雖然專業的圖學硬體可以非常快速的顯像物件，但是值得注意的是，似乎 3D 圖學硬體顯像系統效能增加的速度沒辦法比得上產生精細和逼真的 3D 多邊形模型的需求和能力。

由於模型容量的逐漸變大，所以去研究一個比較好的壓縮方法，在計算機圖學當中仍然是一個重要的問題。3D 幾何壓縮技術依據失真結果可分成無失真壓縮技術與失真壓縮技術兩種。所謂的無失真壓縮技術是指在壓縮完成後透過解壓縮程序，可完全地

還原原本的 3D 模型資訊，此類壓縮技術雖可完全還原原本的 3D 模型資訊，但是其壓縮率也會因此而大打折扣。而所謂的失真壓縮技術則是在可忍受的誤差範圍內進行資訊壓縮，此類方法會造成失真的情形發生，但也因此可以盡可能地提高壓縮比例，降低描述 3D 模型的資料量。而本計畫之研究主要是定位在後者。

在本研究計畫中，我們提出了一個嶄新的壓縮方法來降低 3D 動畫模型的三角片個數，本方法利用 Temporal Discrete Shape Operator (TDSO)來分析 3D 動畫模型外表判斷此頂點所在的表面是否為平坦的，若是則將頂點刪除，然後重新三角化，進而產生比原來還少的三角片數目。為了驗證本計畫所提出 TDSO 壓縮法的壓縮成效，在研究實驗中，本計畫與最為人所熟知的主成分分析法(Principal Component Analysis; PCA)進行壓縮比較，從實驗的結果中得知，主成分分析法在抽出的基底數(Base)較少時，容易產生不正確的動畫模型姿勢，亦比較容易產生扁平外型的壓縮結果，而本計畫所提出之壓縮法則改善上述所言之不良壓縮結果，並進而降低壓縮所造成的失真誤差。

在其餘的章節結構中，我們將在第二章說明主成分分析法的壓縮過程，並探討該壓縮方法會發生的相關問題。第三章將細述本計畫所提出的壓縮演算方法。第四章將呈現本研究之實驗結果及數據。最後，第五章則為結論。

第二章 主成分分析壓縮法

主成分分析一種來自於統計學學理上的分析技術，此方法原本用來將多個相依的變數簡化成少數獨立的主成份(Principal Components)，利用這些少數獨立的主成份來描述原始的資料集合，此方法通常會利用線性組合來逼近描述原來的變數欄位。近幾年來，主成分分析被廣泛的應用，甚至有學者提出主成分分析可以套用在影像處理的辨識技術，目前已經有相當不錯的成果。

Alexa 和 Müller 在 2000 年首先提出以主成分分析為基礎來對 3D 動畫進行壓縮。此方法對所有的影格模型(Frame Model)進行特徵值(Eigen Values)計算，並針對所計算而得之特徵值進行大小排序，並取其中具有較大特徵值之影格模型來呈現原有的動畫內容，以達到降低資料量的目的。經過 Alexa 和 Müller 的實驗驗證，主成分分析的技術在 3D 動畫模型的壓縮上有極優異的表現，在壓縮所造成的誤差上，主成分分析法仍能在維持在一定水準以下。相關的進一步研究還包括了 Karni 與 Gotsman 在 2004 年所提出的 Local Principal Component Analysis (LPCA)壓縮法，此方法進一步改良了 PCA 的方法，Local Principal Component Analysis 加入了二階線性預測(Second Order Linear Prediction)，透過二階線性預測與 PCA 的結合，進一步改善壓縮的成果。再者，在 2005 年，Satter 及 Sarlette 也相繼提出 Clustered Principal Component Analysis (CPCA)壓縮法，此壓縮法利用影格模型中，點的移動軌跡來進行分析，將具有相似特徵的點叢集在一起，再分別對各個集合進行 PCA 壓縮，使得各個集合所需要的主成份減少，並且可以獲得更低的失真誤差。

事實上，主成份分析是一種找尋能夠解釋原始資料最大變異數方向、次大變異數方向等的統計方法，其主要的目的乃是希望能用較少的變異數來解釋原始資料中的大部份變異情形。轉換許多相關性很高的原始資料為彼此互相獨立的變異數，即所謂的主成份，而這幾個選擇的主成份就成為我們用來解釋資料的綜合性指標。因此主成份分析所著重的在於如何『轉換』原始變數使之成為一些綜合性的新指標，而其關鍵在『變異數』選取問題。以下將針對主成份分析的特性做一些探討：

定義一：主成分(Principal Components)

假設有 p 個欲分析的變數 x_1, x_2, \dots, x_p ，經過奇異值分解(Singular Value Decomposition, SVD)可以得到 p 個主成份 y_1, y_2, \dots, y_p ，且第 j 個主成份為

$$y_j = a_j' x = a_{j1}x_1 + \dots + a_{jp}x_p$$

其中， a_j 是第 j 個特徵值 λ_j 所相對應的特徵向量

根據主成分分析的定義，其包括幾個主要的特性：

1. 各主成份(Principal Components)亦即進行奇異值分解後之各特徵向量(Eigen Vector)。
2. 各主成分彼此之間必兩兩正交(Orthogonal)。
3. 主成份的變異數即為其相對應的特徵值。
4. 所有主成份的變異數和等於所有變數的變異數和。
5. 主成份的解釋能力即為所佔全體主成份的比例， $\lambda_1 / \sum_{i=1}^F \lambda_i$ 。

主成份分析的幾何意義：

如下圖所示，假設圖中的點表示欲分析之資料點，由於各主成分分析所萃取出之軸向彼此互相正交，因此，若以兩個主成分分析軸來描述，便為一橢圓形狀，而其中，橢圓之長軸為第一主成分之軸向，而短軸即為第二主成分之軸向，此二軸所包含的橢圓形範圍則為其可描述範圍，該範圍所能涵蓋的比例即為此二主成分之涵蓋率，若涵蓋率越大，表示以此主成分進行壓縮的效果越好。

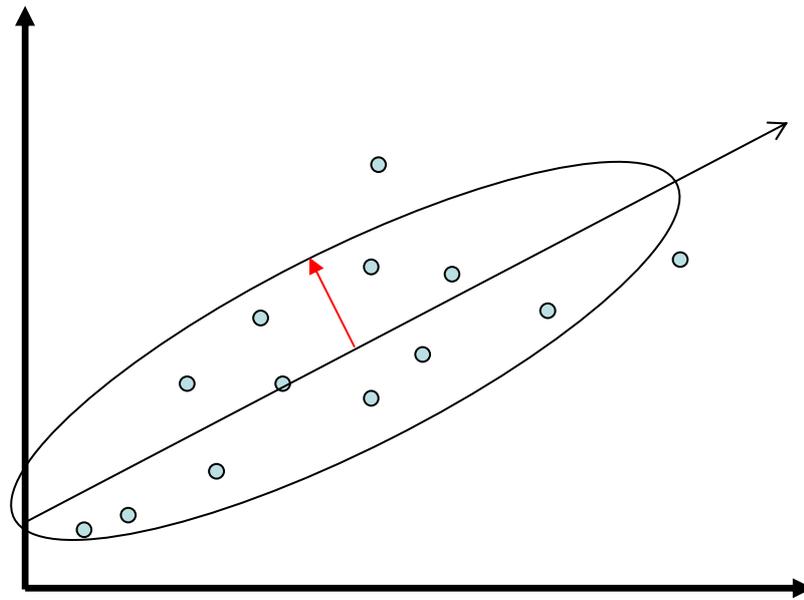


圖 1、主成分分析法涵蓋率示意圖

從資料分析的角度來看，主成分分析的概念是將資料中多個相關的變數欄位簡化成少數幾個彼此之間相依性低(亦即彼此間獨立性高)的主成份變數欄位資料，換句話說，透過找出主成分分析變數欄位的線性組合，使其對整體資料具有最大的代表性。從3D 動畫模型壓縮的角度來看，這裡所謂的變數欄位便是動畫序列中的每一個影格模型(Frame Models)。透過主成分分析來找出幾個最具代表性的特徵影格模型(Eigen Frame Model)，亦即利用少數的幾個影格模型資料來描述整體的動畫資料，以達到資料壓縮的目的。

萃取主成分的程序：

- (1) 將分析資料以矩陣方式呈現(假設資料矩陣為A)。
- (2) 對資料矩陣A計算進行奇異值分解。

所謂的奇異值分解為正交矩陣分解法 $A = B \cdot S \cdot V^T$ ，其中，矩陣S為一對角矩陣，其值為特徵值並依大小排列，矩陣B為相對應特徵值的特徵向量，矩陣V則為其偏移量。

- (3) 選擇主成份個數

當所選擇的主成份過多，其所展出的範圍越廣，其代表性的能力就愈高，但其資料壓縮的效果就越差，當所選擇的主成分量與原資料欄位一樣多時，相當於完全不壓縮，從 3D 動畫模型壓縮的角度來看，亦即每一個影格模型皆為特徵模型；相反地，如果選擇的主成份量太少，其壓縮率雖高，但通常會發生代表性不足，導致壓縮失真的結果。所選擇出來的主成份亦稱為基底(base)，亦即為欲表達原始資料的欄位個數。透過奇異值分解後所產生的特徵值會由大到小排列，而這些特徵值表示該相對主成分之代表性的強度。

主成分分析可壓縮資料量，但仍有其限制：

1. 主成份分析非單位不變量。
2. 若原始資料中各欄位變數間的相依性較低時，主成分分析的效果將會比較差。
3. 主成份的奇異值分解需要龐大的計算量，且會隨著矩陣資料量的增加而急速升高。

Alexa 和 Müller 在 2000 年提出以主成份分析為基礎來對 3D 動畫進行壓縮的方法。此方法首先對所有的影格進行分析，找到一個影格模型(Frame Model) B_1 ，使得 B_1 滿足其對所有影格模型之均方根誤差(Mean Square Error)為最小，而 B_1 即為第一個參考影格(Reference Frame)，然後，找出下一個參考影格 B_k ，且仍須滿足 A 與 B_1 至 B_{k-1} 之均方根和誤差最小，且使得 $A=B_1+B_2+B_3+\dots+B_N$ ，其中 N 為 3D 動畫序列中影格模型的數量，且 B_k 的均方根誤差小於 B_{k+1} 。

在數學運算上，SVD 分解可以滿足如此的需求。不僅可以求到 B_1 ，更可以藉由奇異值來求到均方根誤差的大小，分出個別的權重；若奇異值越大，代表均方根誤差越小。於是我們可以改寫 3D 動畫的表達方式為：

$$A = B \cdot S \cdot V^T$$

S 為一對角矩陣，對角的值即為奇異值(Singular Values)，並且由大到小排列。 B 為 $n \times k$ 的矩陣，代表的是對應奇異值的基底向量(Base Vector)，稱為基底(Base)；其

中 n 為影格模型上之頂點個數, k 為基底個數; 若基底為全部影格, 則 k 將以 f 取代。 V^T 為 $k \times f$ 的矩陣, 表示相對應奇異值的影格資訊, 由下圖可看到雞動畫序列進行 SVD 分解的結果, 換句話說, 此方法可以藉由減少基底的數量來求出近似原始的動畫。主成分分析在數學上的意涵為減少維度量, 針對原始資料(維度為 N) 的線性空間, 找出維度為 k 的子空間 ($k \leq N$), 利用此 k 個基底向量作線性組合以期能近似原始資料。換句話說, 以主成分分析為主的 3D 動畫研究目的在找出特徵值較大的 k 個主要成分, 根據 $Ax = \lambda x$ 來近似原始資料, 以期達到降低資料量與保持誤差的目的。

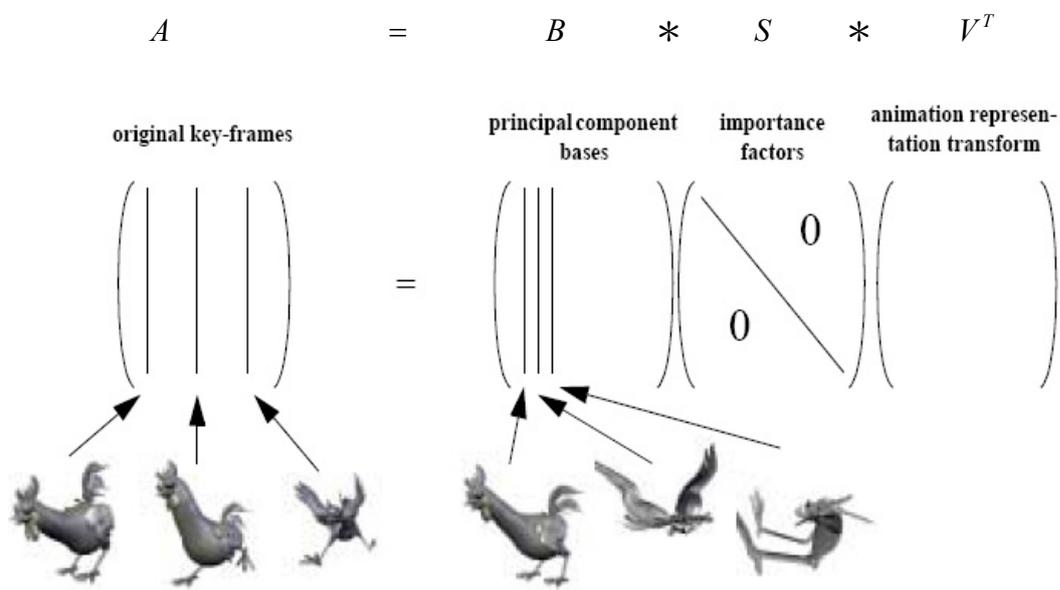


圖 2、主成分分析利用 SVD 進行主成分萃取之示意圖

換句話說, 我們可以將 Principal Component Analysis 如何被使用來進行 3D 動畫壓縮的程序, 細列下列數個步驟。假設欲進行 Principal Component Analysis 之 3D 動畫模型有 N 個影格模型(Frame Model), 表示為 M_1, M_2, \dots, M_N , 且每個 M_i 都有 m 個頂點(Vertex)以及相同的三角片資訊。

1. 取出 M_1, M_2, \dots, M_N 之點座標矩陣 a_1, a_2, \dots, a_N , 並將之描述為資料矩陣 A , 如下

$$A = \begin{bmatrix} \begin{matrix} | \\ a_1 \\ | \end{matrix} & \begin{matrix} | \\ a_2 \\ | \end{matrix} & \cdots & \cdots & \begin{matrix} | \\ a_N \\ | \end{matrix} \end{bmatrix}$$

$$\text{其中, } a_i = \begin{bmatrix} x_{i,1} & y_{i,1} & z_{i,1} \\ x_{i,2} & y_{i,2} & z_{i,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{i,m} & y_{i,m} & z_{i,m} \end{bmatrix} \text{ 為影格模型 } M_i \text{ 之頂點矩陣, 而 } a_i \text{ 矩陣中 } (x_{i,1},$$

$y_{i,1}, z_{i,1}$)、 $(x_{i,2}, y_{i,2}, z_{i,2})$ 、 \cdots 、 $(x_{i,m}, y_{i,m}, z_{i,m})$ 為 M_i 模型上的 m 個頂點座標。

2. 將資料矩陣 A 進行 SVD 分解

$$A = B \times S \times V^T$$

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \cdots & \cdots & a_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & \cdots & \cdots & b_N \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & & \\ & \lambda_2 & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & \lambda_N \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \\ \\ \\ \\ \end{bmatrix}$$

圖 3、SVD 分解示意圖

步驟 1 中所表示出來的矩陣 A 為原始動畫模型中各影格模型的頂點資訊，經過 SVD 分解之後可得到 B、S、以及 V 等三個部分，而其中的 B 矩陣便是所謂的主成分，N 個影格模型經過分解後可以得到 N 個主成分，亦即 b_1 、 b_2 、 \cdots 、 b_N 等，而 S 矩陣為一對角化矩陣，其中 λ_1 、 λ_2 、 \cdots 、 λ_N 則為相對各主成分之奇異值，此奇異值將依序由大到小排列，也就代表矩陣 B 中個主成分之代表能力。

3. 依據失真程度與壓縮率選擇主成分基底個數

當選擇矩陣 B 中的所有主成分基底來描述 3D 動畫序列，則可完全不失真的狀況下完整描述此 3D 動畫序列，為了降低資料量，我們通常會從中選擇部分較具代表性的主成分基底來描述原本的 3D 動畫序列，如此一來便可降低資料量，當然也會有失真的狀況出現。以具有十個影格模型的 3D 動畫序列而言，若我們選擇十個主成分基底，則可完整不失真地描述原有的 3D 動畫序列；若選擇七個主成分基底來描述原有的 3D 動畫序列，則減少約 30%的資料量，只要用約 70%的資料量便可描述原來的 3D 動畫序列，當然，失去了三個主成分基底的描述，也會造成部分模型失真的情形，在此，我們通常可以利用誤差量測(Error Measure)的方法來量化失真的程度；相同地，若我們僅選擇三個主成分基底來描述原有的 3D 動畫序列，我們就可以減少 70%的資料量，當然也會增加因失去七個主成分基底的描述所造成的失真情形。



圖 4、主成分分析壓縮法在不同基底數的壓縮效果

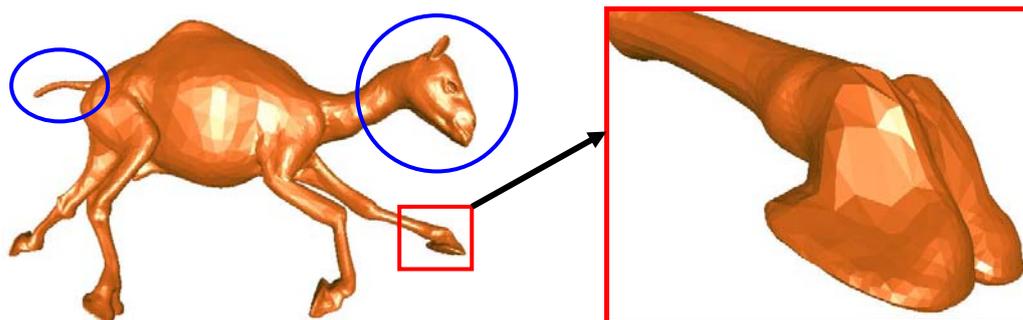
為了量化壓縮後所造成失真的結果，我們通常會利用下式來進行失真計算。在下式中， E_f 表示第 f 個影格模型在進行壓縮之後所造成的誤差值， $(x_{f,i}, y_{f,i}, z_{f,i})$ 表示影格模型 M_f 中頂點 i 的座標位置， $(x'_{f,i}, y'_{f,i}, z'_{f,i})$ 則表示原影格模型 M_f 中頂點 i 經過壓縮後的新座標位置。

$$E = \frac{\sum_{j=1}^N E_f}{N}$$

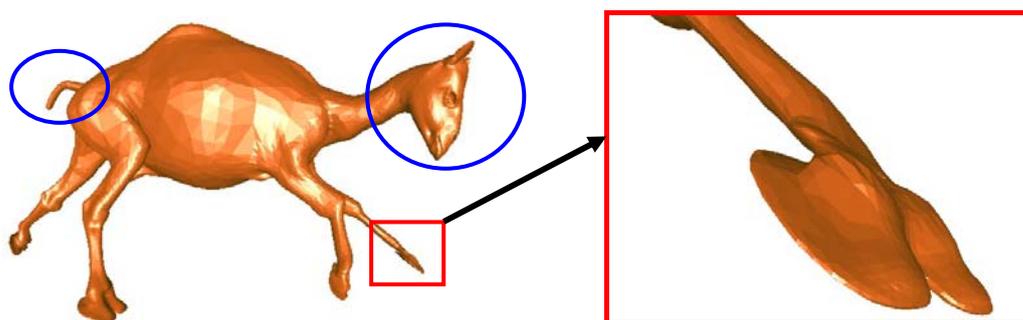
$$E_f = \sum_{i=1}^m \sqrt{(x'_{f,i} - x_{f,i})^2 + (y'_{f,i} - y_{f,i})^2 + (z'_{f,i} - z_{f,i})^2}$$

本計劃根據主成分分析壓縮法的壓縮程序進行 3D 動畫模型的壓縮後，發現經過主成分分析壓縮法進行 3D 動畫模型的壓縮可能會發生以下幾個問題：

1. 經過主成分分析法進行壓縮後，可能會造成模型本身的變形。如下圖所示，原本的 camel 模型經過壓縮後，該模型雖仍能辨識該模型之外觀，但其頭部、腳部、尾巴等，都有相當嚴重的變形現象。
2. 主成分分析法容易受到基底數的影響而造成壓縮率的限制。譬如，一個有十個影格模型的 3D 動畫模型，其選擇基底的個數僅能一個、二個、三個、...、十個，換句話說，主成分分析法僅能選擇 10%、20%、30%、...、90%、100% 等壓縮率，並不能由使用者自行選擇 15%、37%、72% 等任意的壓縮率。
3. 主成分分析法對多數為相似模型的動畫有較好的壓縮結果，換句話說，對於動畫姿勢變化較為劇烈的動畫序列，通常需要較多的基底數來加以描述，否則容易造成壓縮效果急遽下降的情形發生。



(a) 原始模型的外表



(b) 經過主成分分析法進行壓縮後的效果

圖 5、主成分分析法壓縮後所造成的變形現象

第三章 Temporal Discrete Shape Operator

定義二：Shape Operator

假設 p 是一表面 M 上的點，對表面 M 上點 p 的每一個切線向量 v ，定義點 p 在該切線向量 v 上之 Shape Operator S_p 為

$$S_p(v) = -\nabla_v U$$

其中， U 為表面 M 上在點 p 鄰近區域之 Normal Vector Field

S_p 為在表面 M 上點 p 針對 U 微分所導出之 Shape Operator

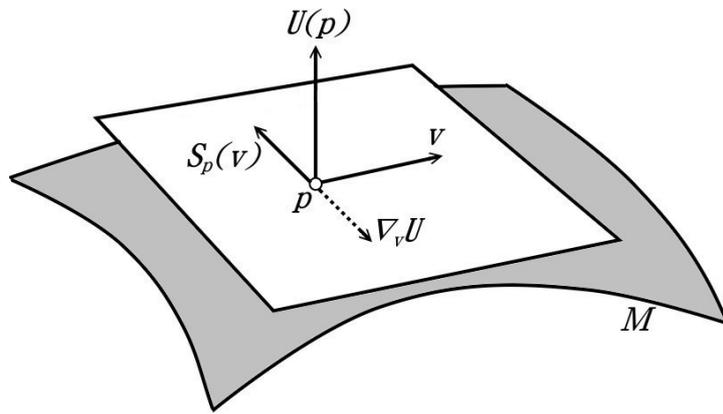


圖 6、Shape Operator 示意圖

根據定義二，我們知道 Shape Operator 為點 p 在表面 M 上對 Normal Vector Field 在向量 v 方向上之變化，為了計算點 p 所在鄰近區域之局部表面變化情形，我們必須將 Shape Operator 推廣到以面為基礎，而不再只是以單一方向來思考。

假設點 p 有 k 個相鄰點(Neighbor Point)分別為 $p_1, p_2, p_3, \dots, p_k$ ，而在點 p 上有一切平面(Tangent Plane) TP_p ，透過 $\overrightarrow{pp_1}$ 、 $\overrightarrow{pp_2}$ 、 $\overrightarrow{pp_3}$ 、 \dots 、 $\overrightarrow{pp_k}$ 在切平面 TP_p 上投影來取得所需之切線向量 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_k$ ，並進一步利用 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_k$ 這些切線向量來計算點 p 在這些方向上的 Shape Operator 值 $S_p(t_1), S_p(t_2), S_p(t_3), \dots, S_p(t_k)$ ，取得 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_k$ 這些方向上的 Shape Operator 值之後，便可透過這些 Shape Operator 值來進行該區域表面上的整

體 Shape Operator 值 $DSO(p)$ ，我們將此稱為 Discrete Shape Operator，其意涵為利用離散的概念來估計連續型的 Surface Shape Operator 值。

$$DSO(p) = \frac{\sum_i \|\overrightarrow{pp_i}\| \cdot S_p(t_i)}{\sum_i \|\overrightarrow{pp_i}\|}$$

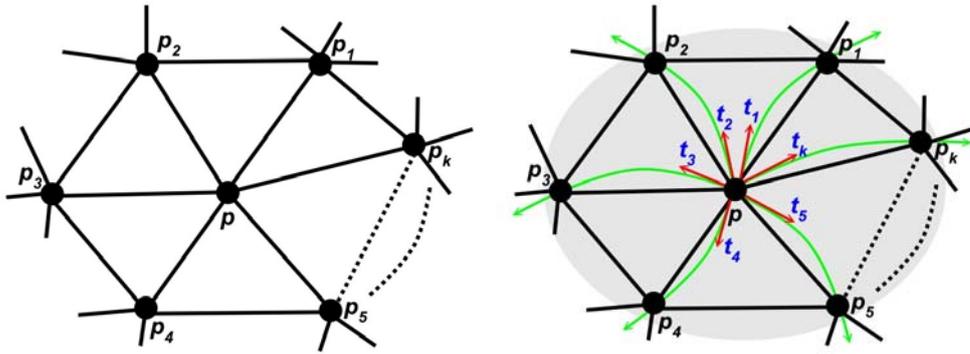


圖 7、估計點 p 的 Shape Operator 之示意圖

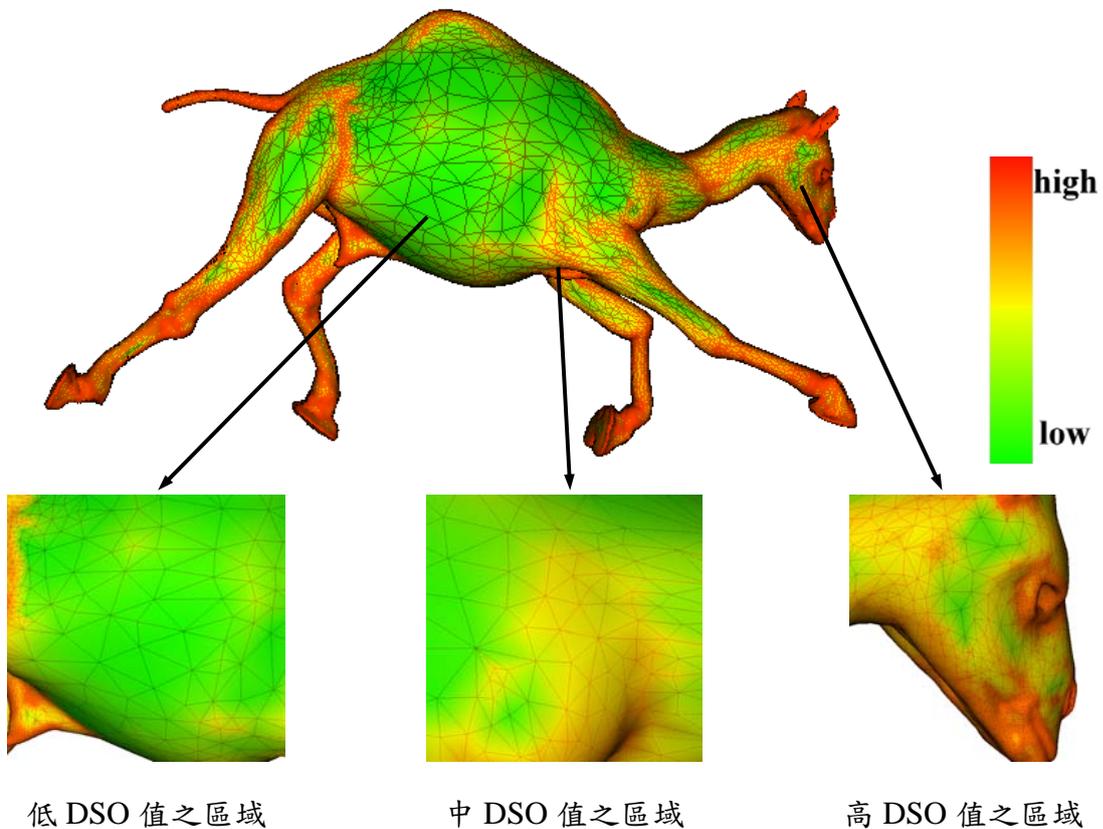
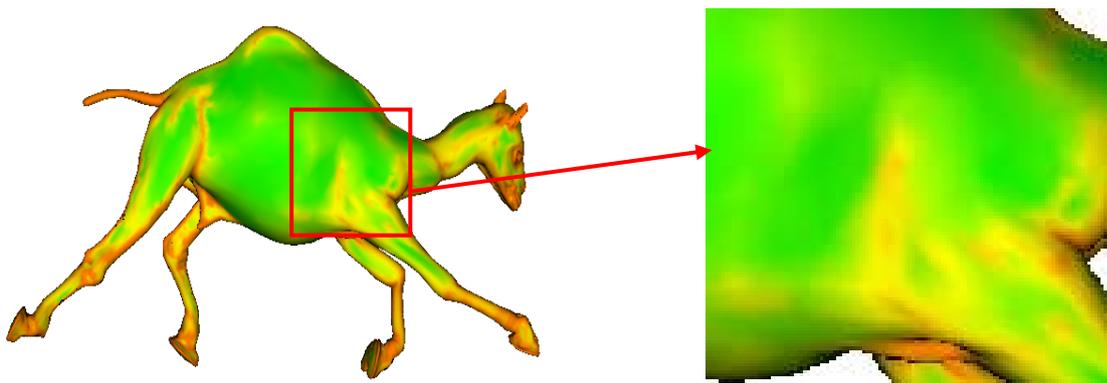


圖 8、利用 Discrete Shape Operator 分析模型表面的結果

根據 DSO 的估計方法，我們可以計算出 3D 模型上每一個區域之表面高低起伏變化。如下圖，以 camel 模型為例，其肚子部位通常是既平滑又較為平坦，而其眼睛、嘴巴部位則表面高低起伏較為劇烈，透過 DSO 的計算，我們可以判斷出該模型中，表面變化較為平緩的肚子部位，以及表面變化較為劇烈的特徵部位-頭部，如圖中所示，紅色部位表示為表面變化較大的區域，綠色表示表面變化較為平緩的區域，而黃色澤表示居中。

物件壓縮可以有效地減少描述 3D 動畫模型的三角片數量，然而這也相對地容易導致物體特徵的失真情形，為了在盡可能保留 3D 動畫模型的外型特徵的前提下，減少描述 3D 動畫模型所需之三角片量。由於 Discrete Shape Operator 可以量測出該模型外型中哪些區域是外凸而哪些區域是內凹，因此，可以協助我們萃取出高起伏的表面區域，進而盡可能避免在物體壓縮時造成 3D 模型外表動作姿勢的破壞。過去，我們也曾將 Discrete Shape Operator 應用在物體的壓縮技術上，也確實有不錯的壓縮效果，然而，Discrete Shape Operator 僅只運用在靜態物體上，並未針對 3D 動畫模型的壓縮進行探討。然而，Discrete Shape Operator 值是會隨著 3D 物體的外型改變而有所變化，事實上，隨著物體外型的變化越大，Discrete Shape Operator 的值也會相對增加。



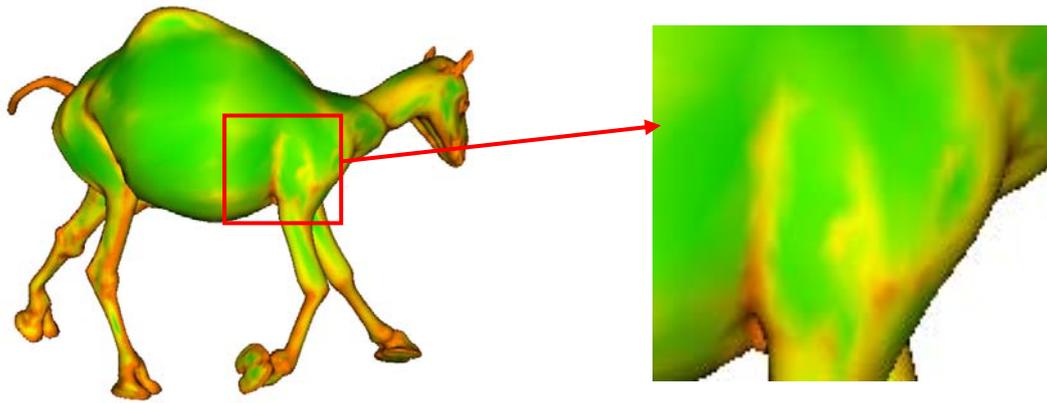


圖 9、Discrete Shape Operator 在 3D camel 動畫序列之不同影格模型上的變化

以一運動中的 camel 模型為例，連接身體的大腿部位通常有較大的運動變化，如圖所示，我們計算兩個不同影格的 camel 模型上個別的 Discrete Shape Operator 值，因此可以確認這兩個模型在連接身體的大腿部位有著顯著不同的 Discrete Shape Operator 值，為了觀察並記錄整個動畫模型的外型變化，本計畫針對動畫模型上每一個頂點在該動畫序列上的 Discrete Shape Operator 值的變化進行計算，而這便是本研究計畫所提出之 Temporal Discrete Shape Operator (TDSO)。

本計畫所提出的壓縮方法包含兩個主要的步驟，首先，是針對 3D 動畫模型中的每一個影格模型進行 Discrete Shape Operator 的計算，透過 Discrete Shape Operator 的計算，我們可以辨別出哪些區域是特徵區域(Feature Regions)，而哪一些是平坦的表面；第二個步驟是以第一步驟中計算所得之 Discrete Shape Operator 做為輸入值，並進一步利用下式估計出 Temporal Discrete Shape Operator 值。

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_j (DSO_{i,j} - \overline{DSO}_i)^2}{N}}$$

其中， $DSO_{i,j}$ 表示頂點 i 在影格 j 之 DSO 值

\overline{DSO}_i 表示頂點 i 在整個動畫序列(Animation Sequence)之 DSO 平均值

N 表示該動畫序列之影格總數

由於 σ_i 表示在動畫序列中頂點 i 的 Discrete Shape Operator 值的變化，因此，本計劃利用上式來量測動畫模型中每一個端點的外形變化程度，如下圖所示，綠色區域表示該點所在鄰近區域在運動過程中幾乎沒有變化，而紅色區域則表示該點所在鄰近區域在整個運動過程中有很大的變化，而這些紅色區域也正是在運動過程中需要較多的三角片來加以描述的部位，為了在運動的過程中避免嚴重的失真，本研究利用 Temporal Discrete Shape Operator 在物體壓縮的過程中有效保留紅色區域(包括 camel 模型的眼睛、耳朵、腳部以及尾巴等)所需之三角片數量，如圖所示。

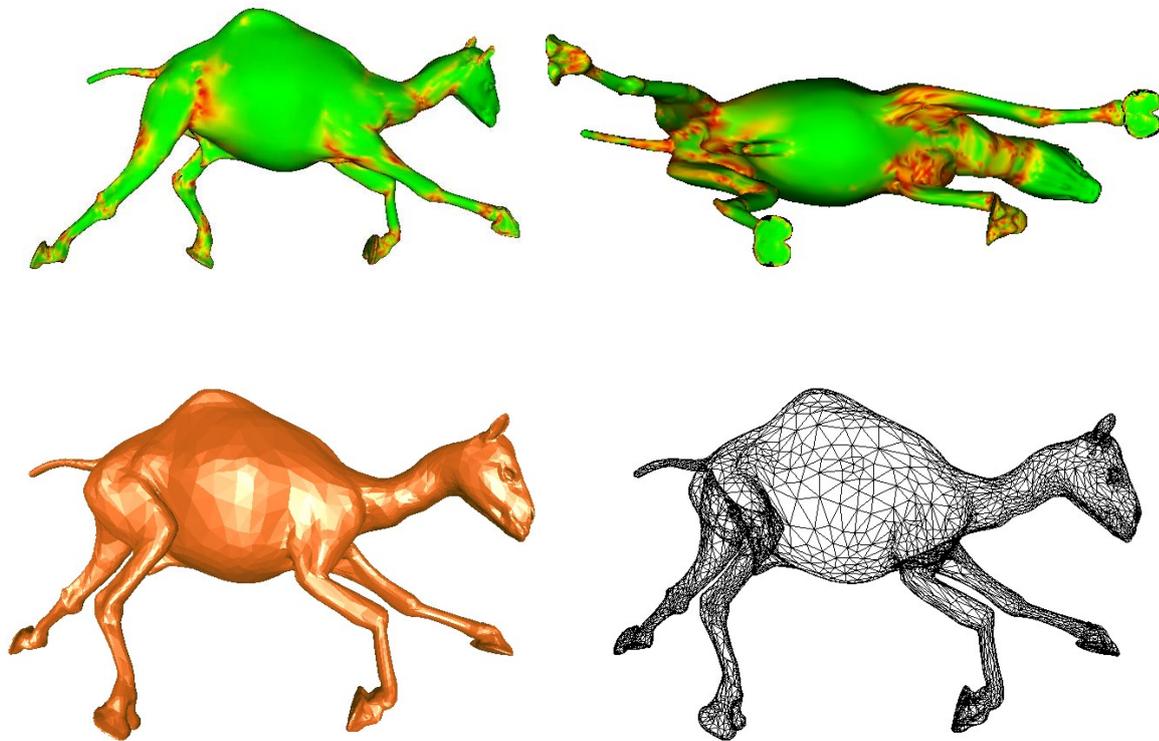


圖 10、利用 Temporal Discrete Shape Operator 萃取 3D 動畫序列中高運動量的部位

根據 Temporal Discrete Shape Operator 的概念，本計劃所提出壓縮演算法包括下列八個主要的步驟：

1. 對 3D 動畫模型上的每一個頂點 i 計算其 TDSO 值 σ_i
2. 對 3D 動畫模型上每一個頂點 i 在其所有影格模型上的二次誤差矩陣(Quadric

Error Metric) $Q_{m,i}$

3. 計算每一的頂點之總和二次誤差矩陣(Summed Quadric Error Metric)

$$Q_i = \sigma_i \cdot \sum_m Q_{m,i}$$

4. 針對每一個點對(Vertex Pair)計算其最小誤差值
5. 從步驟 4 中取出最小誤差的點對(p, q)
6. 對(p, q)進行壓縮，並計算其壓縮後的新點 r ，其中， $Q_r = (Q_p + Q_q)$
7. 更新在動畫模型上所有與頂點 p 或頂點 q 相鄰的資訊
8. 重複上述步驟，直到壓縮到所需的三角片數

第四章 實作結果與分析

為了驗證本計劃所提出的壓縮方法，在本實驗中我們利用了三種最為人熟知的實驗模型，包括 camel 動畫模型、cat 動畫模型以及 horse 動畫模型。每一個動畫模型我們都取 10 個影格模型來進行實驗分析。而 Principal Component Analysis 壓縮法則各取出 3 bases、5 bases、7 bases 來進行實驗比較。為了比較其誤差，本研究利用 Root Mean Square 來計算其壓縮後之誤差值。而在 Temporal Discrete Shape Operator 方面，由於 Principal Component Analysis 的 3 bases 壓縮大約會將原動畫模型壓縮至 30% 的資料量，因此，為了在相同的基準點上進行比較，本實驗也利用 Temporal Discrete Shape Operator 壓縮法將原模型壓縮至 30% 的資料量，以便進行實驗比較。

在 camel 動畫模型的壓縮實驗上，隨著 base 數的增加，Principal Component Analysis 的壓縮方法可以逐漸壓低其因壓縮所造成的誤差，然而，不管是利用 3 bases、5 bases、7 bases 的方式來進行壓縮，從實驗數據上可見，Temporal Discrete Shape Operator 的做法，在 camel 動畫模型的壓縮誤差上，皆顯然優於 Principal Component Analysis 的方法。

表 1、TDSO 與 PCA 壓縮方法的壓縮效果比較(camel 模型之 3D 動畫序列)

Frame No.	PCA	TDSO
-----------	-----	------

	3bases	5 bases	7 bases	
Frame 1	0.020743	0.00806	0.003417	0.000099
Frame 2	0.019758	0.012951	0.005361	0.000098
Frame 3	0.040032	0.010825	0.002335	0.000098
Frame 4	0.034024	0.009191	0.007562	0.000098
Frame 5	0.018471	0.013091	0.006297	0.000097
Frame 6	0.015367	0.011362	0.007009	0.000098
Frame 7	0.023072	0.00977	0.004604	0.000098
Frame 8	0.029845	0.017402	0.004257	0.000098
Frame 9	0.018192	0.009868	0.003891	0.000098
Frame 10	0.025487	0.011105	0.005573	0.000097

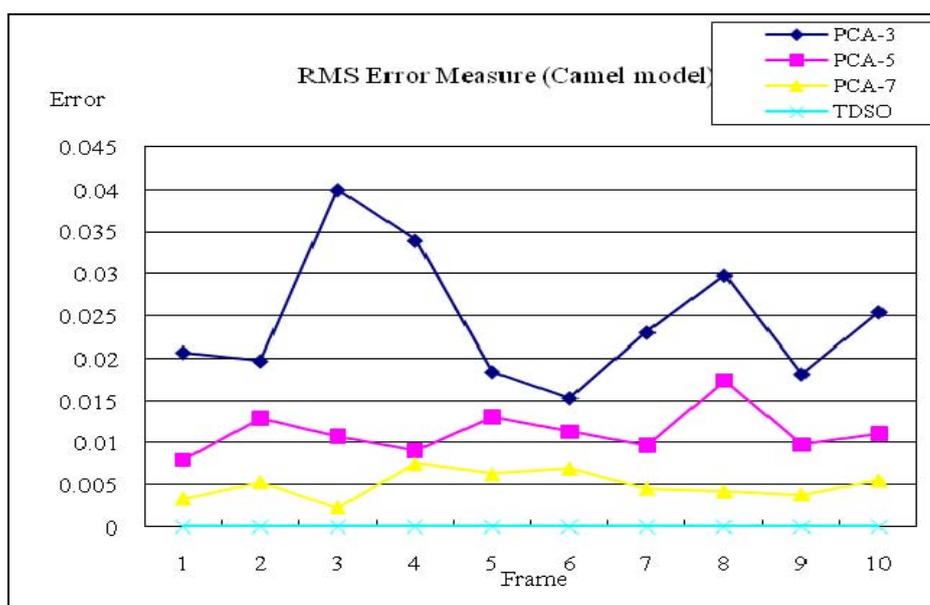
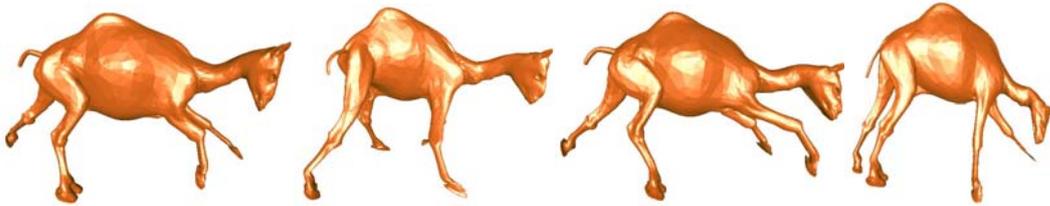


圖 11、針對 camel 之 3D 動畫序列進行主成分分析法以及 TDSO 法進行壓縮的比較圖。在主成分分析法方面，本計畫針對 3 bases、5 bases 以及 7 bases 分別進行失真誤差量測並比較。



(a) camel 在其 3D 動畫序列中原始模型



(b) 經過主成分分析法進行壓縮後的 camel 動畫序列 (以 3 個基底來進行壓縮)



(c) 經過主成分分析法進行壓縮後的 camel 動畫序列 (以 7 個基底來進行壓縮)

圖 12、針對 camel 之 3D 動畫序列進行主成分分析法進行壓縮後的結果。



圖 13、針對 camel 之 3D 動畫序列進行 TDSO 進行壓縮後的結果(壓縮到僅具 30%的資料量)。

在 cat 動畫模型的壓縮實驗上，隨著 base 數的增加，Principal Component Analysis 的壓縮方法可以逐漸壓低其因壓縮所造成的誤差，然而，不管是利用 3 bases、5 bases、7 bases 的方式來進行壓縮，從實驗數據上可見，Temporal Discrete Shape Operator 的做法，在 cat 動畫模型的壓縮誤差上，皆顯然優於 Principal Component Analysis 的方法。

表 2、TDSO 與 PCA 壓縮方法的壓縮效果比較(cat 模型之 3D 動畫序列)

Frame No.	PCA			TDSO
	3bases	5 bases	7 bases	
Frame 1	0.016324	0.014296	0.004148	0.00017
Frame 2	0.010959	0.007277	0.004778	0.000161
Frame 3	0.027015	0.008848	0.004969	0.000152
Frame 4	0.022716	0.006103	0.004988	0.000175
Frame 5	0.018957	0.011378	0.003606	0.000154
Frame 6	0.016615	0.010688	0.00484	0.000154
Frame 7	0.018996	0.01056	0.003832	0.000177
Frame 8	0.010905	0.010486	0.006502	0.000168
Frame 9	0.016875	0.011556	0.00443	0.000173
Frame 10	0.01243	0.010447	0.010074	0.000143

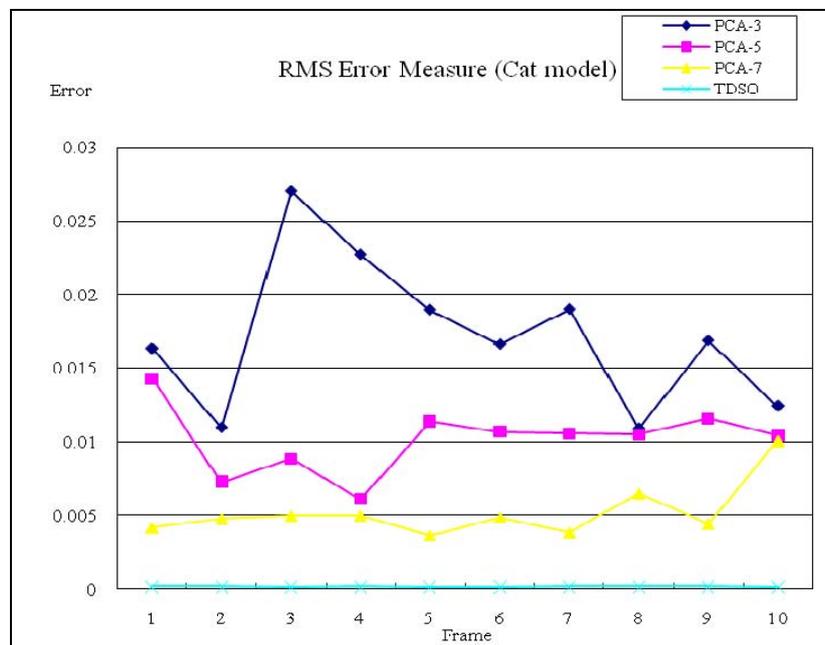
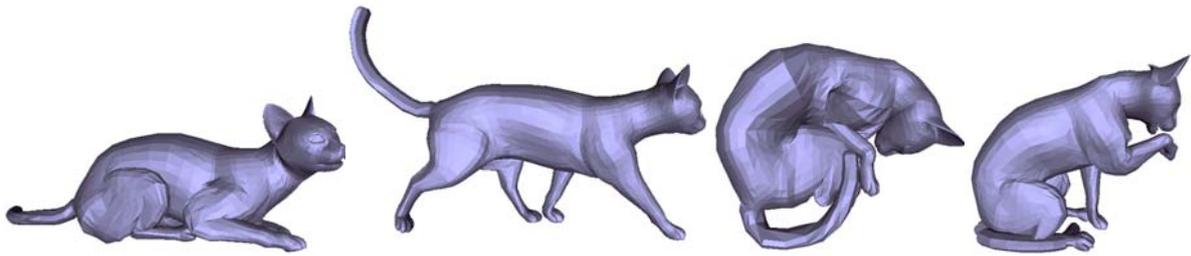
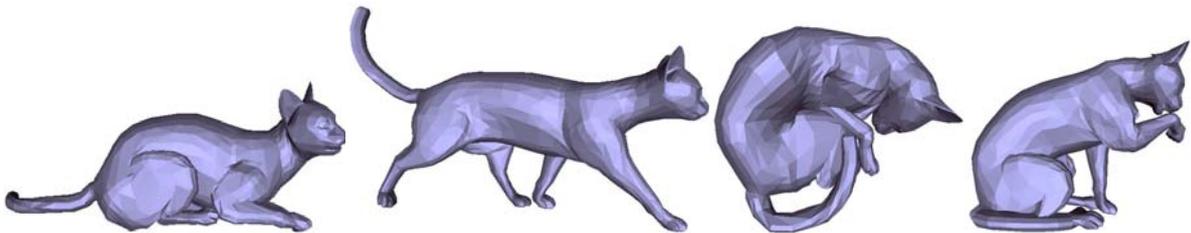


圖 14、針對 cat 之 3D 動畫序列進行主成分分析法以及 TDSO 法進行壓縮的比較圖。在主成分分析法方面，本計畫針對 3 bases、5 bases 以及 7 bases 分別進行失真誤差量測並比較。



(a) cat 在其 3D 動畫序列中原始模型



(b)利用 TDSO 壓縮後的結果

圖 15、針對 cat 之 3D 動畫序列進行 TDSO 進行壓縮後的結果(壓縮到僅具 30%的資料量)。

在 horse 動畫模型的壓縮實驗上，隨著 base 數的增加，Principal Component Analysis 的壓縮方法可以逐漸壓低其因壓縮所造成的誤差，然而，不管是利用 3 bases、5 bases、7 bases 的方式來進行壓縮，從實驗數據上可見，Temporal Discrete Shape Operator 的做法，在 horse 動畫模型的壓縮誤差上，皆顯然優於 Principal Component Analysis 的方法。

表 3、TDSO 與 PCA 壓縮方法的壓縮效果比較(horse 模型之 3D 動畫序列)

Frame No.	PCA			TDSO
	3bases	5 bases	7 bases	
Frame 1	0.008064	0.00175	0.000666	0.000265
Frame 2	0.003529	0.002081	0.001315	0.000265
Frame 3	0.006094	0.002133	0.00111	0.000275
Frame 4	0.007722	0.003527	0.000775	0.000281
Frame 5	0.005194	0.003438	0.000937	0.00028

Frame 6	0.004997	0.003218	0.001042	0.000283
Frame 7	0.005249	0.002917	0.001122	0.000276
Frame 8	0.004175	0.003257	0.00155	0.000267
Frame 9	0.004499	0.002861	0.00207	0.000273
Frame 10	0.004766	0.003599	0.001432	0.000273

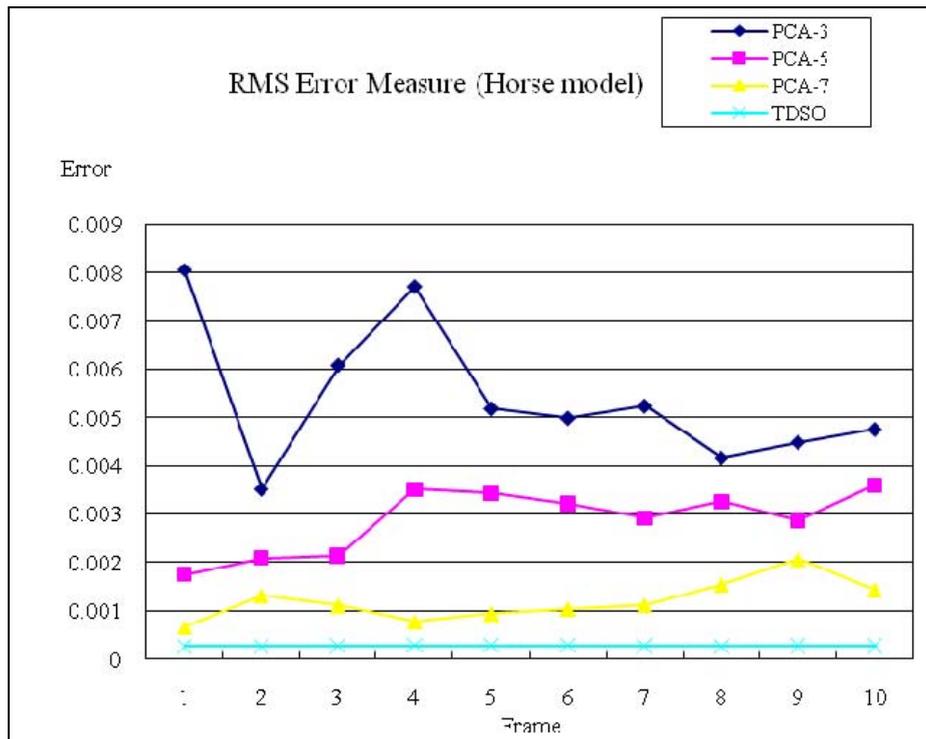
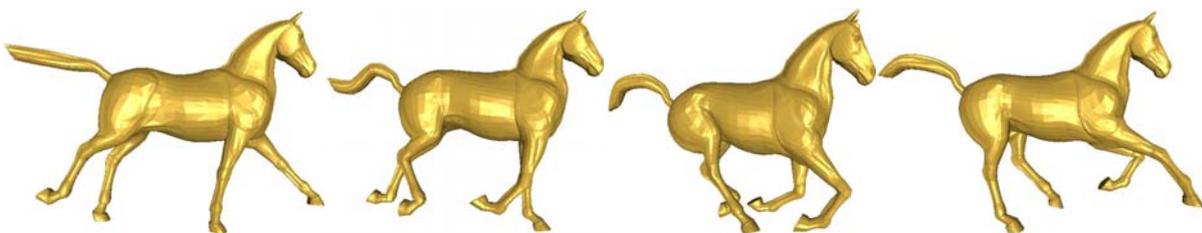
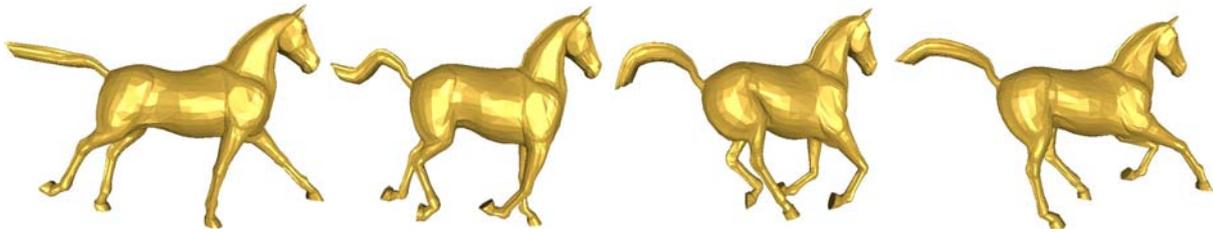


圖 16、針對 horse 之 3D 動畫序列進行主成分分析法以及 TDSO 法進行壓縮的比較圖。在主成分分析法方面，本計畫針對 3 bases、5 bases 以及 7 bases 分別進行失真誤差量測並比較。



(a) horse 在其 3D 動畫序列中原始模型



(b)利用 TDSO 壓縮後的結果

圖 17、針對 horse 之 3D 動畫序列進行 TDSO 進行壓縮後的結果(壓縮到僅具 30%的資料量)。

表 4、TDSO 的壓縮失真改善程度(對 camel、cat、horse 模型之 3D 動畫序列)

Model	PCA		TDSO	Improved Ratio
Camel	3 bases	2.45×10^{-2}	9.8×10^{-5}	99.6%
	5 bases	1.13×10^{-2}		99.14%
	7 bases	5.03×10^{-3}		98.05%
Cat	3 bases	1.72×10^{-2}	1.63×10^{-4}	99.05%
	5 bases	1.02×10^{-2}		98.40%
	7 bases	5.22×10^{-3}		96.88%
Horse	3 bases	5.43×10^{-3}	2.74×10^{-4}	94.96%
	5 bases	2.88×10^{-3}		90.49%
	7 bases	1.20×10^{-3}		77.22%

第五章 結論與未來之展望

主成分分析壓縮法是目前最知名的 3D 動畫模型壓縮方法之一，此方法利用 SVD 分解分析出各主成分基底，透過選擇部分主成分基底來描述原 3D 動畫序列，然而此方法卻有幾個難以解決的問題，包括(1)少基底數的壓縮會嚴重造成壓縮後模型的變形；(2)基底數容易造成壓縮率的限制；(3)主成分分析法偏好對多數相似影格模型的 3D 動畫序列進行壓縮，對於動作變化劇烈的 3D 動畫序列，則表現出一籌莫展的窘況；(4)在寄宿效能上，SVD 分解的效能完全受到模型上頂點個數的影響，當頂點個數相當多時，其所需花費的時間成本則急速增加。

為了改善主成分分析法所發生的問題，本計劃提出了利用 TDSO 來加以壓縮的方法，此方法針對 3D 動畫序列上每一個影格模型的每一個頂點，計算該點所在局部表面 (Local Surface) 的 Shape Operator 值，透過每一個時間點影格模型上 Shape Operator 值的變化，整合成 Temporal Discrete Shape Operator (TDSO)，依據該 TDSO 值來減少 3D 動畫序列中每一個影格模型的三角片數，藉以降低資料量的目標，達到資料壓縮的目的。

經過數個動畫模型上的實驗，本計劃驗證了本計劃所提出的 TDSO 壓縮方法，有效地降低了描述 3D 動畫序列的資料量，並且在壓縮後模型的外表上比主成分分析壓縮法更為優異。在未來，本研究團隊將更進一步地向前繼續研究，期望能在不久的未來能提出壓縮效率更好的壓縮方法。

參考文獻

- [1] B. S. Jong, J. L. Tseng, and W. H. Yang, “An Efficient and Low-Error Mesh Simplification Method Based on Torsion Detection,” *The Visual Computer*, vol.22, no.1, pp.56-67, 2006.
- [2] B. S. Jong, J. L. Tseng, W. H. Yang, and T. W. Lin, “Extracting Features and Simplifying Surfaces using Shape Operator,” *International Conference on Information, Communications and Signal Processing* pp.1025-1029, 2005.
- [3] F. Payan and M. Antonini, ”Wavelet-based compression of 3d mesh sequences,” *Proceedings of IEEE ACIDCA-ICMI’2005*, Tozeur, Tunisia, november 2005.
- [4] I. Guskov and A. Khodakovsky, “Wavelet compression of parametrically coherent mesh sequences,” *Proceedings of the ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, 2004.
- [5] J. E. Lengyel, ”Compression of time-dependent geometry,” *Proceeding of ACM symposium on Interactive 3D graphics*, 1999.
- [6] J. H. Yang, C.S. Kim, and S.U. Lee, “Compression of 3-d triangle mesh sequences based on vertex-wise motion vector prediction,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol.12, no.12, pp.1178–1184, December 2002.
- [7] J. Zhang and C. B. Owen, “Octree-based animated geometry compression,” *Proceedings of IEEE on Data Compression*, pp. 508–517, 2004.
- [8] L. Ibarria and J. Rossignac, “Dynapack: space-time compression of the 3d animations of triangle meshes with fixed connectivity,” *ACM SIGGRAPH/ Eurographics symposium on Computer Animation*, 2003.
- [9] M. Alexa and W. Müller, “Representing animations by principal components,” *Computer Graphics Forum*, Vol.19, No.3, 2000.
- [10] M. Sattler, R. Sarlette, and R. Klein. “Simple and efficient compression of animation sequences,” *ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer Animation*, pp. 209–217, 2005.

- [11] P. F. Lee, C. K. Kao, J. L. Tseng, B. S. Jong and T. W. Lin, "3D Animation Compression using Affine Transformation Matrix and Principal Component Analysis," *IEICE Transactions on Information and Systems*, vol.E90-D, no.7, pp.1073-1084, July 2007.
- [12] R. Amjoun and W. Straßer, "Efficient Compression of 3D Dynamic Mesh Sequences," *The 15th WSCG International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision*, 2007
- [13] Z. Karni and C. Gotsman, "Compression of soft-body animation sequences," *Computer & Graphics*, Vol.28, pp.25-34, 2004.

