

應用於虛擬實境的快速顯像技術之研究

Research on Fast Rendering Techniques For Virtual Reality Applications

計畫編號：NSC 87-2213-E-009-057

執行期限：86/08/01-87/07/31

主持人：莊榮宏 交通大學資訊工程系

一、摘要

中文摘要：

(A) 複雜場景的快速顯像

幾何式與影像式 (Image-based) 顯像技術之結合可以利用 frame 與 frame 之間的 coherence 讓原來是複雜的幾何資料用影像快取 (Cache Image) 來顯像。我們的方法在空間的水平面切割成許多與軸平行大小一致的小空間 (Cell)，結合只需整數運算之 view culling 演算法及可視度排序方法，依據小空間中的多邊形個數與投影於視平面上所佔大小 (與視點的距離) 來判斷其是否應繪製成快取影像，以重複使用這快取影像而省了重新顯像的時間；因為有了可視度的順序，可以用來安排顯像的資源，即較近的空間有較高的優先權得到顯像資源，所得的結果是越近的小空間有越高的更新率，最後看到的顯像品質也較逼真，且可維持一穩定的顯像速度。因為快取影像的小空間一多就需要大量的記憶體，所以我們使用調適性階層式的空間分割，亦即越遠的空間越大減少快取影像所需的記憶體。

(B) 動態環境陰影計算

在動態環境中，陰影的處理除了可以強化視覺效果外，最主要可以加強整個環境的空間感。本計劃希望針對物體和物體間的硬陰影 (hard shadow) 提出一個適合動態環境下的作法。首先，我們試圖去找出物體相對於光源的輪廓，為有效陰影輪廓 (effective shadowing contour)。利用該輪廓建立陰影容積 (shadow volume)。然後利用類似陰影鋪面法 (shadow tiling) 和畫家演算法 (painter's algorithm) 的作法建立物體間的遮擋關係。最後我們利用 stencil buffer 來做陰影處理。此外，我們針對動態環境提出一些加速的方法，包括局部變動的遮擋關係建立、使用法向量遮罩 (normal mask) 來加速多邊形面向/背向光源的測試、利用 frame coherence 來減少有效陰影輪廓計算以及使用 occlusion culling 的方法來減少多邊形陰影處理的量。由實作後的結果我們可以得知，用 stencil buffer 來處理陰影比陰影容積二元空間切割樹 (SVBSP tree) 相關的作法更有效率。另外，我們比較三個應用 stencil

buffer 處理陰影的方法，並試著找出一個較好的架構。

英文摘要：

(A) Fast rendering techniques for complex scenes

Image-based rendering exploits frame coherence to render a complex scene with cached images. Our method uniformly divides a scene into x-z-axis-aligned cells, with which integer-based view-culling and visibility sorting can be easily performed. The projected size of a cell and its geometric complexity are used to determine if the image of the cell's geometry should be cached. Since the visibility order is available, the rendering resource can be allocated according to the distance from the cells to the viewer. By that, more realistic image and a steady frame rate can be obtained. Moreover, we apply adaptive hierarchical space subdivision such that the cell size can be adjusted according to its distance to the viewer and, in consequence, the total cache size can be reduced.

(B) Shadow computation for dynamic Environments

In dynamic environments, shadows not only improve the image quality of the scene, but also enhance the perception of spatial relationships. In this thesis, we propose an object-based hard shadow computation method for dynamic environments. First, we attempt to find the contour (silhouette), called effective shadowing contour (abbreviate ESC), for each object and each point light source. The shadow volumes are constructed by the effective shadowing contours. Next, we find occlusion relationships between objects in the scene by some methods similar to shadow tiling algorithm and painter's algorithm. Finally, we use stencil buffer to generate shadows. Moreover, we propose speed-up methods for dynamic environments, such as local update of scene change, normal mask for light-face/back-face testing, frame coherence exploration for ESC computation, and occlusion culling for reducing the number of the polygons needed for shadow computation. According to our experiments, the stencil buffer based method is more efficient than shadow volume binary

space partition tree (SVBSP tree) based algorithm. We also compare three stencil buffer based methods, and try to conclude with a suitable architecture for shadow computations. .

二、計劃緣由與目的

(A) 複雜場景的快速顯像

在虛擬實境應用中，爲了要讓虛擬實境的場景精緻，多邊形的數目就必須增加，圖學的硬體加速卡雖在技術與速度上有不錯的進展，但場景一複雜，仍難達到令人滿意的速度。綜觀最近圖學虛擬實境的發展，都有將幾何式顯像與影像式顯像結合來克服這問題的趨勢，影像式顯像的好處是顯像的時間只與影像的大小(size)或解析度(resolution)有關，與其中的幾何資料的複雜度無關。

Hierarchical Image Caching [Shade96] 利用將場景以 BSP 之形式來分割成許多的小空間，因爲影像式顯像中影像的記憶體需求甚大，若利用小空間與視點之距離來做調適性的空間分割，將可有效的減少記憶體的使用量，但 BSP 的架構不易於建構調適性的空間切割(Adaptive space subdivision)。我們在這計畫中利用 uniform space subdivision 的空間切割方式，再由下而上建構出調適性空間切割的階層架構。這種空間切割法有許多的好處，一是空間切割方式容易，任何場景都可處理，也易於處理碰撞偵測；再者，可用整數運算就完成大部分的 view culling 動作，且同時能很有效率地將小空間對視點的先後次序一併排出；如此一來有了小空間對視點的先後次序，便可以將電腦的運算資源 (computing resource) 以此次序加以有效地分配，以維持一穩定的顯像速度。而在顯像時小空間的快取影像或幾何資料也可依據這個先後次序由後往前顯像。

(B) 動態環境陰影計算

陰影的產生是因爲物體對光會產生遮擋作用，當光照射到(不透明)物體時，物體會阻擋光的前進使得有一部份區域不會被光源直接照射，而落在此區域的物體就會產生陰影。陰影的產生可以加強物體與光源及物體與物體之間的關係，以表現出更真實的空間感。

目前在即時動態互動式應用上，以使用局部照明法(local illumination)爲主。局部照明法只考慮光對物體的影響，對於物體與物體間對光的關係並不考慮，也就是說局部照明法本身無法處理陰影計算。因此有一些關於局部照明法的陰影演算法的研究。然而我們發現真正實用的演算法並不多。本論文希望就即時動態互

動式環境中陰影產生演算法加以研究探討，並希望能提出一個較合適的陰影產生法

三、研究方法與成果

(A) 複雜場景的快速顯像

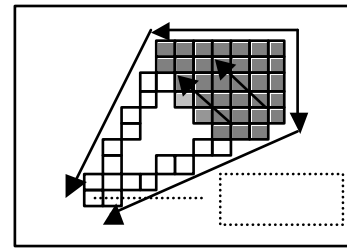
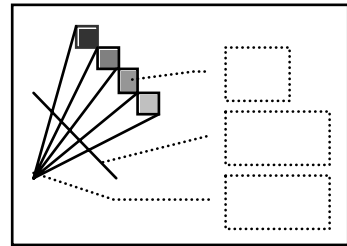
我們的空間分割方式是與軸平行(axis-align)及大小一致的空間切割法(Uniform space subdivision) 將場景分成 $2^l \times 2^l$ 個小空間 (l 爲空間切割的層數)，可利用 Bresenham 的演算法用整數運算方式算出 view culling 的邊界，再以斜率之絕對值爲 1 ($|m|=1$) 的直線次序，如圖 Fig.1，顏色的深淺是顯像的次序，由

右圖就可看出在此直線 ($|m|=1$) 上的小空間(有顏色的小方塊)所顯像到視平面沒有重疊的情形，故即使顯像的先後次序不同仍可得到相同的顯示結果，以此斜線由遠而近就可將所有在這 view volume 中的小空間求出並得一近似於由遠而近的顯像次序，如圖 Fig.2。

整個 view culling 的演算法都可用整數運算完成。而且這個方法同時做了可視度的次序的排序 (visibility ordering)，這個

次序也是分配運算資源的順序 (resource allocation order)，有了這個分配的次序，我們可依據前一次繪製影像快取所花的時間來有效的分配運算與顯像資源使得離視點較近的小空間獲得較多的資源 (高重繪率或高影像品質)，較能維持一個對虛擬實境而言相當重要的穩定的顯像速度。

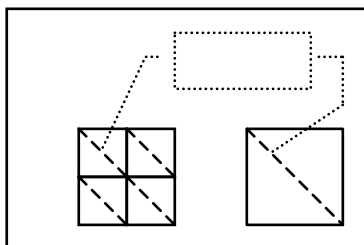
我們的空間切割法爲了避免由於幾何資料切割所造成額外的記憶體需求及大量運算，因此只利用分割面 (clipping plane) 在繪製時做截取，而不做幾何資料的切割。因爲在空間切割後幾何小空間 (geometry cell: 用幾何資料顯像的小空間) 與影像小空間 (image cell: 用影像資料顯像的小空間) 的鄰接處會有裂縫產生，爲了避免這個裂縫的產生，較有效率的方式是使用較大的 clipping volume [Schauffler96a]。因爲切割平面有硬體支援 (hardware clipping plane)，且 clipping plane 只需在影像小空間與幾何小空間之相接面上才



需設立，故對整體的顯像速度並不會有太大影響，實測結果也是如此。而不真正切割多邊形的好處是可以節省記憶體使用量，又可以用較大的 clipping volume 來避免裂縫的產生。

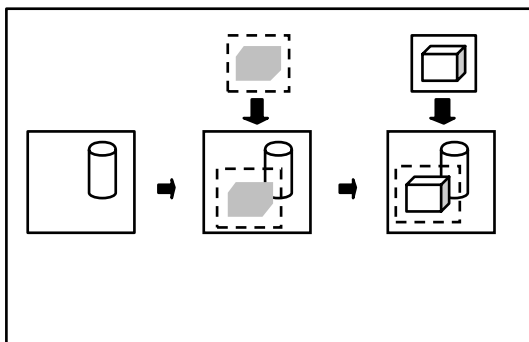
若我們將較遠的四個小空間組成一較大的空間(quad-tree)，將可讓快取影像的記憶體使用量減少約一半如圖 Fig3 所示。且在顯像時所需的時間也會減半，但是當這個大空間需重繪時，所

需的時間就會相當長，導致顯像速度不穩定，解決的方法可利用下層之小空間的



快取影像來組成此較大空間的快取影像，以避免整張重繪的時間花費；另外，亦可結合 LOD；當小空間合成大空間時此空間中的物體就用較粗糙的幾何來表示，因為這與當物體較遠時用較粗糙的 LOD 不相衝突，但有可能對某一物體會出現在相鄰的兩個不同階層的空間(階層值差一)使用不同的 LOD。

在快取影像的部份，除了儲存整張快取影像的色彩外，還須將影像上之像素分佈圖(Stencil Buffer) 儲存起來，此乃由於相較於幾何資料，影像資料乃是矩形區域，繪製時連未有物體所在的區域亦會遮蓋，故將幾何資料在快取影像上的分佈儲存起來，在顯示上不致產生錯誤，如 Fig4 所示；其他快取影像的實作



[Shade96]，則是使用透明度的技術(alpha-blending)來處理這個問題；但像素分佈圖(Stencil map)可以單位元(bit-wise)方式儲存，相較於透明度(alpha value)須以一位元組(Byte)以上處理每個像素來說，我們的方法在記憶體的花費上較有效率，且因為 alpha-blending 需硬體支援，且為浮點運算，而我們的方法為位元邏輯運算，在硬體的支援下更是快上許多。

處理快取影像的擷取時，須先開啓圖案分佈測定(Stencil Test)，再將欲擷取的單一小空

間中，所有幾何資料，根據現在的視點位置繪製至一暫存的顯示記憶體(temperature Frame Buffer)，根據此小空間在螢幕座標系中之範圍，將暫存記憶體中的色彩顯示、圖案分佈圖(Stencil Buffer)以單張的方式儲存起來。若當小空間中有動態物體存在時，另外須將影像深度圖儲存(Depth Buffer, or Z-Buffer)[Schauf1er96a]，以維護動態物體與空間影像之間的正確顯像。

針對快取影像的繪製，我們採用中心點對齊的原則；使顯示中小空間的中心點，與原先儲存快取影像中，空間的中心點吻合，再根據所須之影像大小，對快取影像做放大縮小的動作。

系統中動態物體是以幾何資料存在的物體，或是有深度的影像資料[Schauf1er97]；而欲將此兩種形式之動態物體繪製至空間影像，而又要求維持其顯示上次序的正確，須先將現在顯示的深度資料設定為事先儲存的空間影像深度圖，再根據此一深度資料將欲繪製之動態物體，做深度比較測試，若物體較已有之深度為近則繪製，若較其為遠則否

(B) 動態環境陰影計算

我們可以利用z-buffer與stencil buffer來實作 Crow 的陰影演算法[Heid91]。整個運作的流程基本上可分為三個步驟。

步驟 1: 以環境光描繪場景建立場景的 z-buffer 資料以及初始的顯像結果。

步驟 2: 將陰影多邊形丟到硬體做 stencil buffer 測試，計算每個 pixel 的 stencil 值。每當碰到一個正向陰影多邊形，stencil 值就加 1；遇到背向陰影多邊形，則 stencil 值減 1。最後若是 pixel 對應的 stencil 值為 0，表示該 pixel 不在陰影容積之內；反之則表示該 pixel 是在 shadow volume 之內。

步驟 3: 處理陰影區的降色或是非陰影區的增色處理。

本計劃中的陰影產生法分為四個步驟：

1. 建立物體間的遮擋關係。
2. 找出面向光源的多邊形。
3. 建立物體的有效陰影輪廓。
4. 計算陰影。

以下提供各步驟的作法：

由於我們是使用類似陰影鋪面法的架構來找物體間的遮擋關係，因此我們可以用[Chy96]中所提到的動態處理陰影鋪面法的方法。我們可以導入一些有關加速 back-face culling 的演算法。 [ZH97]提出將多邊形的法向量根據法

向量空間(normal space)來做分堆，利用法向量遮罩(normal mask)來處理 culling 動作。由於[ZH97]的架構較簡潔，很容易和其他架構做整合，因此我們認為此做法會比較好。計算有效陰影輪廓的方法是將所有的輪廓迴圈投影到以光源建立視平面上來處理。當面向光源/背向光源多邊形分佈有發生異動時，如果變異不是很大，我們不需要每次都重算有效陰影輪廓。此外，我們可以以光源當作視點，來作類似 occlusion culling 的處理，把沒有被遮擋的多邊形過濾出來建立陰影容積。在[HMC+97]的方法是用選凸多面體來建陰影容積。我們的做法是用物體的 bounding box 來建立陰影容積。利用此陰影容積來和被遮擋物的階層式 bounding volume 作測試。

四、結論與討論

(A) 複雜場景的快速顯像

根據我們實作的結果，驗證了快取影像在處理龐大場景的顯示時，確能加快純粹幾何資料繪製速率。而 Uniform Space Subdivision 的空間分割法也確能產生不錯的影像顯示。

空間分割的階層式架構在我們的實作中尚未完成，預估此技術的完成可將顯示的速率做再進一步的提昇；另外，場景中加入動態物體及碰撞偵測將是本系統未來發展的技術。

裂縫問題可能需再加上幾何變形的技術，將影像小空間旁的幾何小空間中的幾何資料依據影像資料加以變形處理來避免裂縫產生，這也是值得我們深入研究的。

(B) 動態環境陰影計算

我們首先用非排序陰影容積二元空間切割樹的作法來和我們的方法作比較。我們用了兩個三角形數目分別為 912 和 3432 的測試場景，結果切割樹作法所達到的 frame rate 分別為 4.1 和 2.9 frames/sec，而我們的作法達到了 75.8 和 30.1 frames/sec 的 frame rate。

如果我們把整個計算時間分為 CPU 的處理時間以及圖形處理的時間。在非排序陰影容積二元空間切割樹的作法中，陰影的計算都是由 CPU 來運算。在找出所有的陰影之後，將這些陰影的多邊形和整個場景的多邊形再由圖形硬體做顯像。而我們的作法中，CPU 主要是計算有效陰影輪廓、建立物體間的遮擋關係以及建立陰影容積的陰影多邊形。接下來依據 stencil buffer 處理陰影的三個 pass 來建立最後的影像。從結果可以明顯看出，使用非排序

陰影容積二元空間切割樹的作法在效率上並不理想。其整個陰影計算需要較多的 CPU 運算資源。而我們的方法中，在 CPU 的運算量上相對於非排序陰影容積二元空間切割樹的作法，顯然是少的很多。由於非排序陰影容積二元空間切割樹測試系統在二元空間切割樹處理部分並未完全最佳化，因此我們認為程式經過改善之後速度應會有所提升。然而就其整個演算法來看，用二元切割樹處理複雜的動態場景的計算量相對於我們的做法會比較大。

我們尚且比較了三種同樣使用 stencil buffer 的陰影計算作法：(A)直接使用輪廓邊界製造陰影容積，不找出有效陰影輪廓，基本上為 Corw 的作法[Crow77]，(B)將多邊形投影到以光源為視點的視平面上，用聯集的方式找出有效陰影輪廓[Heid91]，(C)是我們的作法，投影輪廓邊界來找出有效陰影輪廓，且做物體間遮擋關係的加速運算。

比較同樣是找有效陰影輪廓的方法(B)和(C)，(B)在找有效陰影輪廓是把物體的多邊形投影到以光源為視點建立的視平面，因此當物體的多邊形量很多時效率會大幅降低，以多邊形數量分別為 510, 2010, 5410, 8010 的場景來測試，結果(B)的 frame rate 分別為 25.7, 8.4, 3.6, 1.9 frames/sec，而(C)的 frame rate 可達到 98.1, 5.0, 27.4, 16.7 frames/sec，加上了 frame coherence 的利用之後更可達到 116.2, 58.8, 31.8, 19.6 frames/sec，由測試結果可以看出(C)用輪廓迴圈的作法在建立有效陰影輪廓的作法比較有效率，在(A)與(C)的比較上，相同的測試場景，(A)得到 175.4, 68.9, 32.3, 18.6 frames/sec 的 frame rate，以這些有限數目的測試數據，似乎看不出(C)做了有效陰影輪廓及加速動作之後所得到的利益。

五、成果自評

本計畫兩項子項之研發結果皆符合預期目標。複雜虛擬場景的快速顯像部分，我們已驗證均勻空間分割法及快取影像能很有效地加速顯像。目前嘗試用階層式空間分割架構及引進幾何變形技術，以期能在加速與品質上獲取更好的效果。動態環境的陰影計算方面，我們則確認非排序陰影容積二元空間分割數的作法不合適動態環境的陰影計算。另外，以有效陰影輪廓本身的計算負擔使得其應得的加速效果不明顯。目前嘗試只利用物體的輪廓邊(而不用整個輪廓迴圈)，加上物體間遮擋關係的加速運算及 frame coherence 之利用，預期可達到更好的效果。

六、参考文献

- pp.227-236.
- [Aliaga96] Aliaga, D. G., Visualization of Complex Models Using Dynamic Texture-based Simplification. IEEE Visualization '96, pp.101-106.
- [Chry96] Y. Chrysanthou, "Shadow Computation for 3D Interactive and Animation", PhD thesis, Dept. of CS, Queen Mary and Westfield College, University of London, January 1996
- [Crow77] F. Crow, "Shadow Algorithms for Computer Graphics", Computer Graphics, (Proc. SIGGRAPH77) 11(3):242-248, July 1977.
- [CS95] Y. Chrysanthou and M. Slater. "Shadow Volume BSP Trees for Fast Computation of Shadows in Dynamic Scenes", In Proceedings of the ACM Symposium of Interactive 3D Graphics, pages 45-50, Monterey, California, March 1995.
- [Heid91] Tim Heidmann, "Real shadows, real time", Iris Universe, 18:28-31, 1991. Silicon Graphics, Inc.
- [HMC+97] Tom Hudson, Dinesh Manocha, Jonathan Cohen, Ming Lin, Kenneth E. Hoff III and Hansong Zhang, "Occlusion Culling using Shadow Frusta", Proceedings of 13th Symposium on Computational Geometry, June, 1997. <http://www.cs.unc.edu/~walk/papers/index.html>
- [Kil97] Mark Kilgard, "OpenGL-based Real-Time Shadows", 1997 <http://reality.sgi.com/opengl/tips/s/>
- [Lengyel97] Lengyel, J. and Snyder, J., Rendering With Coherent Layers, SIGGRAPH '97, pp.233-242.
- [McMillan95] McMillan, L., and Bishop, G., Plenoptic Modeling: An Image-Based Rendering System. SIGGRAPH '95, pp.39-46.
- [Schaufler96a] Schaufler, G. and Struzlinger, W., A Three Dimensional Image Cache for Virtual Reality. Eurographics '96 Proceedings,
- [Schaufler96b] Schaufler, G., Exploiting Frame to Frame Coherence in a Virtual Reality System. VRAIS '96, pp.95-102.
- [Schaufler97] Schaufler, G., Nailboards: A Rendering Primitive for Image Caching in Dynamic Scenes. In Proceedings of the 8th Eurographics Workshop on Rendering '97, pp.151-162.
- [Shade96] Shade, J., Lischinski, D., Salesin, D., DeRose, T., and Snyder, J., Hierarchical Image Caching for Accelerated Walkthroughs of Complex Environments. SIGGRAPH '96, pp.75-82.
- [ZH97] H. Zhang, K. E. Hoff III "Fast Backface Culling Using Normal Masks", Symposium on Interactive 3D Graphics, 1997