

多變化之夜景演算法

A Varied Rendering Algorithm for Images of Night Scenes

張藝英

國立勤益技術學院電子工程系講師

tony@chinvi.ncit.edu.tw

黃明隆

國立勤益技術學院電子工程系

sk8board@ms34.hinet.net

摘要

如何藉由影像處理技術將白天所拍攝的影像轉換成類似於夜間拍攝之影像，已成為近年來在影像處理上一個重要的研究主題。Thompson[17]提出一個白天影像轉換至夜晚影像的方法，但其方法著重於夜晚特徵的討論，但並未考慮時間於夜景的變化有深入的探討。本文提出以時間為基礎的多變化夜景演算法。本演算法將時間的變化對影像之影響納入考量，我們認為時間因子(Timing factor)是影響景象變化的重要因素。具體言之，我們的演算法以時間因子(Timing factor)的變化為分類的依歸，其包含晝因子(day-scalefactor)與夜因子(night-scalefactor) 兩個部分，另外，並將夜間時間的變化推展成為多變化的夜景影像 (Scotopic Images)。根據實驗結果顯示：我們所提的演算法的確能產生較符合真實經驗的夜景影像。

關鍵字：夜景影像 (Scotopic Images)、時間因子 (Timing factor) 、晝因子 (day-scalefactor)、夜因子(night-scalefactor)

一、簡介

2002年Thompson提出了一個以空間域為主的空間後處理演算法(spatial post-processing algorithm) [17]。

Thompson所提出的演算法中對影像的處理包含：1. 色彩空間轉換 (Color Space Transformation)、2. 晝景至夜景轉換 (Day to Night Conversion)、3. 夜景濾光器 (Night Filter) 及4. 高斯雜訊器 (Gaussian Noise) 等四項處理步驟。Thompson認為在觀測真實夜景時，先前研究者皆忽略兩個重要的夜景特性：模糊後失去的邊緣資訊 (Loss of Acuity) 及可視雜訊 (Visible Noise)。因此，為了使夜景影像達到擬真的視覺感受，Thompson在所提出的夜景演算法中考慮上述兩因素的影響，嘗試將所產生的夜景影像更符合於吾人經驗上已知的夜景特性。就我們所知，此演算法已被學界咸認為解決此類夜景問題的最佳方式。

然而，Thompson的演算法並未考慮夜間時間的變化情形。因此本文據此對Thompson的夜景演算法做更進一步的提昇。我們提出一個考慮時間變化的夜景演算法，藉由時間的變化，得到不同程度的夜景影像。從實驗結果得知，我們的演算法產生的夜景影像更近似於視覺經驗的影像，透過我們的演算法所產生的夜景影像比利用Thompson提出的演算法產生的夜景影像包含更多的夜景特性，也更近似於真實的感覺。

本文架構如下：第2節敘述Thompson所提出的夜景演算法，以便於對目前的夜景演算法處理過程有清楚的概念。第3節詳述桿狀體對於夜景光適應的變化。第4節詳述我們如何考

慮「時間」的因素對夜景影像的影響，進而所提出的多變化的夜景演算法。第5節分析試驗數據並展示以時間變化為考量的夜景影像。最後，第6節總結本論文並提出未來之研究方向。

二、文獻回顧

2002年，Thompson提出一個夜景演算法[17]。Thompson強調從先前的研究成果中，發現研究者都忽略了模糊後失去的邊緣資訊及夜間可視雜訊兩個重要的特性。因此，Thompson提出了一個考慮“可視邊緣”及“可視雜訊”影響的夜景演算法。這個演算法包含四項步驟：色彩空間轉換、晝景至夜景轉換、夜景濾光器(Night Filter)及高斯雜訊(Gaussian Noise)，如圖1所示。

色彩空間轉換為Thompson提出的演算法中的第一個步驟，假設目前輸入的影像為可顯示的彩色RGB影像並非是高動態範圍(High Dynamic Range)的影像，我們稱此RGB影像為 $IRGB$ 。由於我們需要將RGB影像轉換為夜間照度下的亮度影像，首先我們可以利用標準轉換矩陣(方程式1)將RGB影像轉換到XYZ的色彩空間，其中，轉換後的影像稱為 I_{XYZ} ：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5149 & 0.3244 & 0.1607 \\ 0.2654 & 0.6704 & 0.0642 \\ 0.0248 & 0.1248 & 0.8504 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1)$$

透過經驗法則導出的方程式2可求出近似的夜間照度 V ，其中，轉換後的影像稱為 I_V ， V 值的範圍約在[0, 4]。

$$V = Y \left[1.33 \left(1 + \frac{Y+Z}{X} \right) - 1.68 \right] \quad (2)$$

藉由方程式1及方程式2的轉換， I_V 上的每一個點目前為單一數值，代表該點影像在夜間的

亮度值。

第二個步驟為由晝景轉換至夜景，這個步驟僅單純將 I_V 轉換為尚未經過模糊處理的“夜間影像”，稱為 I_{night} 。這個步驟可分解為 I_V 乘上一個藍灰值(C_{blue})，再乘上一個 k 值，如方程式3所示：

$$I_{night} = k \times I_V \times C_{blue} \quad (3)$$

其中， k 值為由經驗法則所選取的常數，可以藉由調整 k 值而得到明暗度不同的夜景影像，然而Thompson在論文中並未提及結果圖例中使用的數值，以我們的經驗而言，為了達到類似於Thompson結果圖例的明暗度，可以選擇 k 值為[0.3, 0.6]。Thompson在論文中建議 C_{blue} 值大約可以選擇白點之下近似(0.03, 0.03)的藍色值。以我們的經驗而言，這樣的數值並不能達到滿意的結果，故我們採用了“Chromaticity”的觀念[2]，以常態化白點的色彩來表示亮度，基於這樣的考量，我們選擇 C_{blue} 值為一常數RGB-vector(1.05, 0.97, 1.27)。

誠如Thompson論文中所述，透過這樣處理產生的影像將偏向藍灰色，要使影像呈現藍灰狀的原因是由於視覺成像系統中的柱狀體對藍色的敏感度高於綠色及紅色所致。按我們的想法處理影像到這個步驟，這張“夜間影像”基本上已初步符合我們夜間視覺經驗中影像呈現藍灰狀的特性。

第三個步驟為夜景濾光器(Night filter)。在Thompson的方法中Night filter是利用Gaussian filter建構而成的difference-of-Gaussian，經過濾光器處理後即可得到Thompson文中具有模糊以及雜訊的夜景影像 I_{Tnight} 。

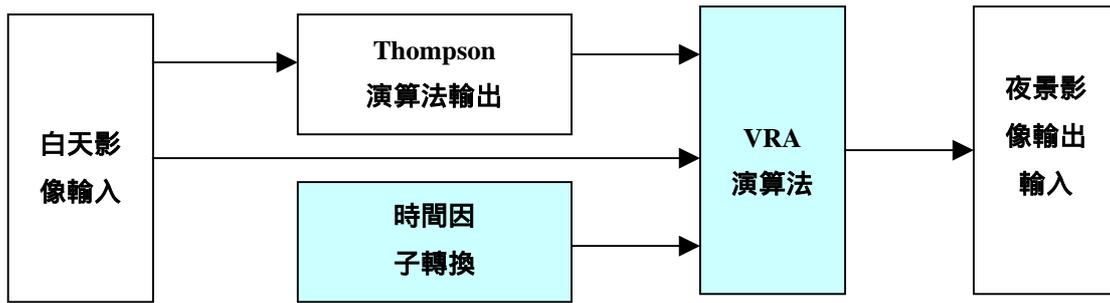


圖1 多變化夜景產生的步驟

三、桿狀體系統對光適應之物理模型

眼睛對於光的適應度，不是一瞬間的就發生的；例如，我們到電影院去看電影，初進電影院時，我們的環境是由明亮處進入到較暗處，眼睛在一瞬間，似乎看不見任何物件，但經過一小段時間後，就可以較清楚地看見物件的位置如座椅及走道；相同地，當我們要離開電影院時，也會遇到相同的情況，只是環境變成由暗轉為亮。我們稱此一現象為眼睛的光適應(Light adaptation)，這是因為人類眼睛中桿狀體(Rod receptor)與錐狀體(Cone receptor)對於光的敏感度的不同所產生的現象；如圖 2 為桿狀體對於光適應與時間的變化關係曲線圖 [1]。

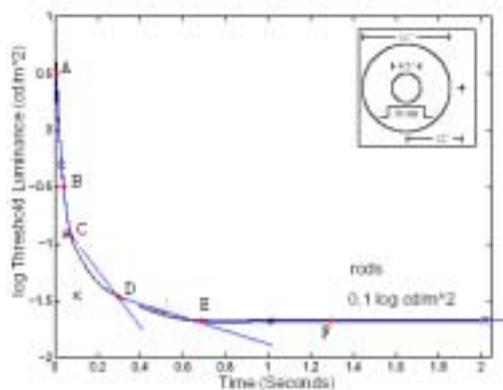


圖 2. 桿狀體光適應與時間的變化曲線圖 [1]

對於我們的實驗，我們嘗試將此曲線分段地線性化，如圖 2.中 AB、BC、CD、DE、EF 線段，我們得到以下的近似方程式，我們以 $RTL(t)$

代表此方程式(Rod Threshold Luminance)，方程式定義如下：

$$RTL(t) = \begin{cases} -20t + 0.5, & t < 0.05 \\ -8t - 0.1, & 0.05 \leq t < 0.1 \\ -3t - 0.6, & 0.1 \leq t < 0.3 \\ -0.5t - 1.35, & 0.3 \leq t < 0.7 \\ -1.7, & t \geq 0.7 \end{cases} \quad (4)$$

我們的演算法即以方程式 3 為理論基礎，在時間為因素的考量下，產生可以影響影像顯示的參考值。

四、多變化之夜景演算法

在不考慮四季變化的前提下，我們一天之中所看到的每一種物件，對於人類的視覺而言，會隨著時間的不同而呈現出不一樣的景緻，地球如同是一間暗室，然而太陽就是這間暗室中的光源，當太陽東昇時，有像我們開啟電燈，太陽西落時，就如同一盞慢慢熄滅的燈。

由另一個角度思考，人類視覺對自然環境中景緻的改變，可視為由物體所反射回來不同程度的亮度，經由瞳孔進入眼睛，在人類眼睛的運作機制中，有桿狀體與錐狀體兩種組成細胞，其中桿狀體對於較暗的環境較為敏感，錐狀體則對於較亮環境較為敏感。基於這個特性，我們便利用桿狀體對於適應較暗環境的反應時間來實現我們的想法，在這篇論文中，我們主要討論夜景的變化，實驗顯示我們實現以下午六點鐘為主軸的多變化夜景。換句話說，也

就是較暗環境中亮度的變化。

我們認為，夜景可細分為初夜 (early night)、中夜 (middle night) 以及深夜 (midnight) 三個部分；所謂初夜即是景象剛由晝時間變換為夜時間，但是在人眼中仍然可以較清楚地辨識出物件及色彩；所謂中夜即是景象已經過初夜的變化過程，物件在人眼中已經無法清楚地辨識出其色彩，但依然可以辨識出物件的外型；所謂深夜即是景象已經過初夜及中夜的變化過程，物件在人眼中已經無法清楚地辨識出其色彩及外型，僅僅依稀感覺有物件的存在。我們基於這樣的一個觀點，來實現不同時間在自然環境中夜晚的景緻。

我們可將一天的變化分為白天與夜晚兩個部分，隨著時間的變化，景象的改變是肇因於明暗之間做著不同程度的變化，因此，我們認為時間因子(Timing factor)是影響著景象變化的重要因素，這個因子包含晝因子(day-scalefactor, dsf)與夜因子(night-scalefactor, nsf) 兩個部分，也就是說夜景的變化，即是晝因子的成分漸低，而夜因子的成分漸高，反之，晝景的變化，即是夜因子的成分漸低，而晝因子的成分漸高，因此我們利用桿狀體對於光適應的時間變化來產生我們的時間因子；在這裡，白天的時間因子定義為 dts (day time scalefactor)，夜晚的時間因子定義為 nts (night time scalefactor)，如下：

$$dts = (10.0^{RTL(t)} + 0.0001)/10.0 \quad (4)$$

$$nts = 10.0 \left(\left| RTL(t) \right| + 1.0 \right) \quad (5)$$

夜景的形成是由不同程度的白天成分與夜晚成分彼此混合而成，因此我們以Thompson的方法所產生具有夜景特徵的影像為基礎，及原來所輸入的白天的影像與利用我們提出的時間因子做運算，藉以得到不同變化

的夜景，我們稱此演算法為“多變化夜景演算法”(Varied Rendering Algorithm, VRA), 其定義如下：

$$I_{vra_night} = wef \left[\frac{I_{T_night}}{nts} + I_{day} dts \right] \quad (6)$$

其中， I_{vra_night} 為經由我們的演算法所產生的夜間影像， I_{T_night} 為運用 Thompson 的方法像的影響因素。依據我們的實驗結果，值選取在 1.845 為影像的最佳狀態，其對夜景的形成可以有更細膩的表現，進而使影像的呈現更接近於夜景的實際環境。

五、實驗結果

我們使用 C++ 語言來實作我們所提出的演算法，測試平台為 AMD Duron(tm) 600MHz，記憶體為 640MB，所採用的影像格式為容易取得的 RGB 檔案格式。

本文以 Thompson 的論文中所使用的卡車影像為主要實驗影像，在試驗的過程中，我們發現其實有很多方法可以去實行 Thompson 文中產生的偏藍灰色的影像，這些方法的差異性只是在於與實際夜景影像的接近程度。我們運用 Ward[16]所提出的 scalefactor 的觀念來實作夜間影像，其作法如下：

$$L_s = m(l)L_{observer} \quad (7)$$

式中， $m(l)$ 即為 Ward 所提出的 scalefactor 函數； $L_{observer}$ 為影像中的亮度值。 $m(l)$ 使用到一全域的平均亮度值為主要參數，但因為此全域值乃適用於 HDRI 影像格式，並不適用於 RGB 影像格式，因此，我們採用影像中亮度的最大值來取代全域值，然後我們將所得到的值代入方程式(3)中，得到初步的夜間影像後，再讓其經過夜景濾光鏡(Night filter)步驟加以

處理，即可得到 Thompson 文中所謂的“夜景影像”。此夜間影像再經由我們所提出的演算法(VRA)加以處理，即可得到不同程度變化的夜景景緻。

我們的演算法是以人眼中桿狀體對光適應與時間的變化做為基礎，因此，我們所使用的測試數據直接採用圖 2.桿狀體光適應與時間的變化曲線圖上所得到的測試時間數據，圖 3 及圖 4 為兩組在不同環境下所得到的測試結果，在測試時間 $t = 0.012$ 秒時，所得平均亮度值圖 3-(b) = 47.8304 cd/m^2 與圖 4-(b) = 46.2818 cd/m^2 ，與 Lee[10]，在實際環境下實驗所得到的亮度平均值在 $50 \log \text{ cd/m}^2$ 左右的數據相差無幾，因此可將測試時間 $t = 0.012$ 秒時

所獲得的影像定義為下午六時左右的一個參考影像。依據 Andrew [1]，對於每一天不同背景的明視度的參考值(twilight=3, very dark day=30, overcast day =[30, 100])，與運用我們的演算法所得到的影像平均亮度值相對照，其結果與實際環境中影像，在夜晚時的亮度值其實相去不遠[1]。

綜觀上述結果以及吾人對自然環境變化的體驗，證實我們演算法的準確性，基於桿狀體對時間的光適應的物理反應，我們可以將結果看成是時間的一種延伸，使其時間延伸對應至下午六時左右到深夜十二時左右的夜景變化。(詳細變化如圖 9-(a)~(h))

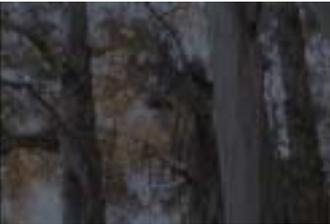
	
圖 3-(a). Thompson 文中原圖，平均明視度： 133.639 cd/m^2	圖 3-(b). 執行結果：時間(t)：0.012 秒，平均明視度： 53.94 cd/m^2
	
圖 4-(a). 平均明視度： 129.598 cd/m^2	圖 4-(b). 執行結果：時間(t)：0.012sec, 平均明視度： 46.2818 cd/m^2

表 1. 實驗數據表

多變化之夜景演算法(Thompson 文中原圖)								
圖 9.	a	b	c	d	e	f	g	h
時間(秒)	0	0.012	0.026	0.05	0.1	0.3	0.6	1.1
平均明視度(cd/m^2)	85.47	53.94	34.83	15.49	9.09	5.20	4.70	4.55
對數明視度(cd/m^2)	1.93	1.73	1.54	1.19	0.96	0.72	0.67	0.65

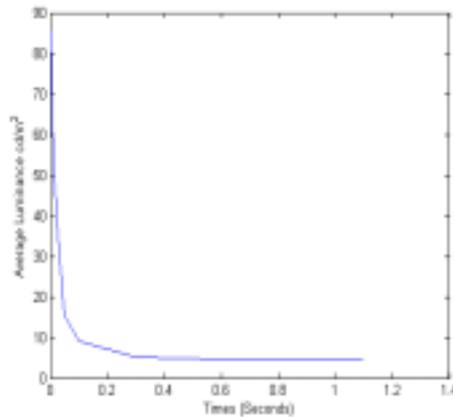


圖 5. 實驗數據曲線圖；明視度呈現非線性關係，符合真實自然環境明視度之變化。

在圖 6，影像的整體背景環境已轉換成偏藍灰的夜間景色，已具備初夜的基本特徵，且眼睛依然可以大致上地辨識出物體的色彩，如卡車的車身及地面上的草；圖 7 則表現出影像的背景環境色彩比圖 6 更為深藍，眼睛只能辨識出大型物件的形體，如卡車，對於較為小型體的物件，僅依稀可見，但是地面上的草眼睛卻已無法辨識出其色彩；圖 8 則顯示深夜的背景，在幾乎沒有任何光源的情況下，人類視覺系統，僅能感受到一片偏於黑色的深藍，對於遠方的物件，如遠山，眼睛已無法得知其變化，對於較近的物件，必須與人眼接近到某個一定的程度，眼睛才能感受到物件的存在，就像圖中的卡車。

性、而且更近似於真實自然環境下觀測的夜景。此外，我們的結果使其時間延伸對應至下午六時到深夜十二時左右的夜景變化，這個結果可以提供一模擬自然環境在夜間變化的轉換機制，與研究夜景變化要注意的細節。



圖 6. 初夜影像。



圖 7. 中夜影像。

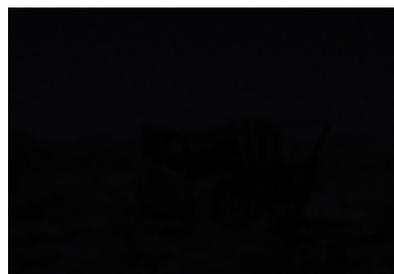


圖 8. 深夜影像。

六、結論

在電視媒體或是動畫的製作上，以往只是單純地將影像轉成不同程度的藍灰色，以達到夜景的效果。我們提出的多變化夜景演算法除了擴展 Thompson 夜景演算法之外，我們也提出了時間因子(Timing factor)是影響著景象由晝景變化成夜景的重要因素，這個因子包含晝因子 (day-scalefactor, dsf) 與夜因子 (night-scalefactor, nsf) 兩個部分，其不但使夜景影像包含更多視覺經驗與時間變化的特

七、參考文獻

- [1] Andrew S. Glassner, "Principles of Digital Image Synthesis" , Volume one, Morgan Kaufmann Publishers, Inc.1995.
- [2] F. Durand and J. Dorsey, "Interactive Tone Mapping," In *Eurographics Workshop on Rendering*, pp. 219-230, 2000.
- [3] J. A. Ferwerda, S. Pattanaik, P. Shirley, and D. P. Greenberg, "A Model of Visual Adaptation for Realistic Image Synthesis," In *Proceedings of SIGGRAPH 1996*, pp. 249-258, 1996.
- [4] J. A. Ferwerda, "Elements of Early Vision for Computer Graphics," *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 21, No. 5, pp. 22-33, 2001.
- [5] D. J. Field and N. Brady, "Visual Sensitivity, Blur and the Sources of Variability in the Amplitude Spectra of Natural Scenes," *Vision Research*, Vol. 37, No. 23, pp. 3367-3383, 1997.
- [6] R. F. Hess, "Rod-Mediated Vision: Role of Post-Receptoral Filters," In R. F. Hess, L. T. Sharpe, and K. Nordby (Eds.), *Night Vision*, pp. 3-48, Cambridge University Press, Cambridge 1990.
- [7] R. F. Hess, L. T. Sharpe and K. Nordby, *Night Vision*, Cambridge University press, Cambridge 1990.
- [8] H. W. Jensen, S. Premoze, P. Shirley, W. B. Thompson, J. A. Ferwerda, and M. M. Stark, "Night Rendering," Technical Report, UUCS-00-016, Computer Science Department, University of Utah, August, 2000.
- [9] G. W. Larson, H. Rushmeier, and C. Piatko, "A Visibility Matching Tone Reproduction Operator for High Dynamic Range Scenes," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 3, No. 4, pp. 291-306, 1997.
- [10] E. S. Lee, D. L. DiBartolomeo, "Application issues for large-area electrochromic windows in commercial buildings." *Solar Energy Materials & Solar Cells 71*, pp. 465-491, 2000.
- [11] D. Marr and E. Hildreth, "Theory of Edge Detection," *Proc. Royal Society London, B 207*, 187-217, 1980.
- [12] E. Reinhard, , M. Stark, P. Shirley, and J. Ferwerda, "Photographic Tone Reproduction for Digital Images," In *Proceedings of SIGGRAPH 2002*, pp. 267-276, 2002.
- [13] D. L. Ruderman, "The Statistics of Natural Images," *Network: Computation in Neural Systems*, Vol. 5, No. 4, pp. 517-548, 1997.
- [14] J. Tumblin and H. Rushmeier, "Tone Reproduction for Computer Generated Images," *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 13, No. 6, pp. 42-48, 1993.
- [15] J. Tumblin and G. Turk, "LCIS: A Boundary Hierarchy for Detail-Preserving Contrast Reduction," In *Proceedings of SIGGRAPH*, pp. 83-90, 1999.
- [16] G. Ward, "A Contrast-based Scalefactor for Luminance Display," In P. Heckbert (Ed.), *Graphics Gems IV*, pp. 415-421, Academic Press, Boston, 1994.
- [17] W. B. Thompson, P. Shirley, and J. A. Ferwerda, "A Spatial Post-Processing Algorithm for Images of Night Scenes," *Journal of Graphics Tools*, Vol. 7, No. 1,

pp. 1-12, 2003.



圖 9 原圖, Average Luminance = 133.639 cd/m²



(a). $t = 0.0$, $L_{avg} = 85.47 \text{ cd/m}^2$



(b). $t = 0.012$, $L_{avg} = 53.94 \text{ cd/m}^2$



(c). $t = 0.026$, $L_{avg} = 34.83 \text{ cd/m}^2$



(d). $t = 0.05$, $L_{avg} = 15.49 \text{ cd/m}^2$



(e). $t = 0.1$, $L_{avg} = 9.09 \text{ cd/m}^2$



(f). $t = 0.3$, $L_{avg} = 5.20 \text{ cd/m}^2$



(g). $t = 0.6$, $L_{avg} = 4.70 \text{ cd/m}^2$



(h). $t = 1.1$, $L_{avg} = 4.55 \text{ cd/m}^2$