

驗證利用眼睛掃視之複雜度評估視覺疲勞的可行性

Verification of Utilizing Saccadic Complexity to Evaluate Visual Fatigue

葉芳廷 連品婷 吳立揚 林瑞豐* 江行全

元智大學工業工程與管理系 桃園縣中壢市遠東路 135 號

juifeng@saturn.yzu.edu.tw

摘要

本研究目的在驗證眼睛掃視複雜度與視覺疲勞之間的關係，以便發展評估視覺疲勞的新方法。研究中使用 Chou 等人(2011)與 Lin 等人(2011)探討眩光程度與色溫高低對於辦公室人員影響所量測到的眼睛掃視資料。研究方法是透過多尺度熵計算出複雜度指標後，利用變異數分析兩個實驗中自變項對於複雜度指標的影響。研究結果顯示眩光程度對水平掃視頻率在 0.29 ~ 24.12 Hz 與垂直掃視頻率在 0.10 ~ 22.06 Hz 所求得的複雜度有顯著影響，而不同的色溫則對水平掃視頻率介於 0 ~ 0.20 Hz 與垂直掃視頻率 0.20 ~ 22.45 Hz 所求得的複雜度有顯著，而複雜度指標在眩光值為 26 與色溫為 3000 K 時最低。由於本研究結果與過去的研究結果相呼應，複雜度分析用於評估視覺疲勞的可行性得到初步驗證，研究結果有助於新視覺疲勞評估方法的發展。

關鍵詞：視覺疲勞、複雜度分析、眼睛掃視、眼睛移動

Abstract

This study aimed at studying the relationship between saccadic complexity and eye fatigue, helping developing new evaluation methods of visual fatigue. The saccades data collected by Chou et al. (2011) and Lin et al. (2011) which studied the effects of glare and color temperature of LED lightings were utilized in this study. The method of multi-scale entropy were first utilized to calculate the complexity index of saccades measured under each glare level and color temperature level respectively manipulated in the two studies. An analysis of variance was then performed to verify the relationships between the independent variables and complexity index. The effect of glare was found significant on the complexity index calculated from the horizontal saccades with frequency between 0.29 to 24.12 Hz and the vertical saccades with frequency between 0.10 to 22.06 Hz. The effect of color temperature was found significant on the complexity index calculated from the horizontal saccades with frequency between 0.20 to 22.45 Hz and the vertical saccades with frequency between 0 to 22.5Hz. The lowest values of complexity index were found when glare value was set at 26 and color temperature was set at 3000K. The results showed a consistency to the results reported by Chou et al (2011) and Lin et al (2011), verifying the application potential of saccadic complexity to develop eye fatigue evaluation methods.

Keywords: visual fatigue, complexity index, saccades, eye movement

1. 前言

過去在量測視覺疲勞上雖有許多方法，像是調節力、視力、閃光融合閾值、瞳孔直徑、眼球運動速度、閉眼時間長短和主觀評量法等 (紀佳芬和林房儂, 1998)，但上述方法會因實驗時間長短、外在環境或者自身主觀意見影響，而無法顯著的呈現差異性，因此通常會同時使用上述方法，以提高準確度。

為了發展評估視覺疲勞的新方法以克服上述限制，本研究欲將複雜度分析運用於檢測視覺疲勞上。以往複雜度應用於分析腦波 (Bruhn 和 Hoefl, 2000)、心電圖 (王俊, 2007)等生理現象，生理機能良好時複雜度越高，當身體開始衰退或疲憊時，複雜度也會隨之降低，因此本研究假設視覺疲勞同屬於生理現象，當眼睛掃視的複雜度高時，代表眼睛處於正常功能；反之，隨著工作時間的增長或照明情況不佳而疲勞時，眼睛掃視的複雜度應該也會隨著降低，藉此希望能驗證複雜度對於檢測視覺疲勞之可行性。

2. 文獻探討

2.1 評估視覺疲勞度的方法

紀佳芬和林房儂 (1998)提出七種視覺疲勞評估的方法，這些量測方法雖各具優點，同時也存在著不同的限制，以下為各方法使用限制或條件作說明。

2.1.1 調節力

調節力為水晶體可以隨視距遠近調節曲率的能力，其量測單位為屈光度(Diopter, D)。當產生眼球疲勞現象時，水晶體周圍的睫狀肌可以調節的近端距離會增長，即屈光度會降低，並造成眼球調節力暫時性的衰退 (Jaschinski-Kurza, 1988)，因此調節力雖適合應用在近距離的作業上，但需要長時間刺激以提高敏感度 (Iwasaki 等人, 2005)。

2.1.2 視力

視力衰退的原因可能是水晶體調節力的改變和視覺處理過程的敏感度降低、或是激活的程度降低。Haider 等人(1982)利用蘭氏環(Landholt rings)

測量連續使用視覺顯示終端機工作 3 小時後視力的變化，發現受測者平均視力從 1.08 下降至 0.82，表示隨著時間增加，視力下滑幅度越大。

因此視力雖適合用於評估整體的視覺功能變化，但作業時間必須拉長才可看出顯著的差異，且只能用來評估是否對眼睛造成長久性的影響及後遺症，無法立即評估眼睛是否處於疲勞的狀態 (Haider 等人, 1982)。

2.1.3 閃光融合閾

閃光融合閾值(Critical Fusion Frequency, CFF)的測量方式可分為頻率漸增和漸減模式，漸增模式為眼睛注視一閃爍光源，然後慢慢提高閃爍光源的頻率，直到感覺閃爍光源已不再閃爍，即為能引起融合感覺的最小頻率；反之漸減模式則是由連續光，逐漸降低光源的頻率，直到出現閃爍感覺的最大頻率，則介於閃爍光與連續光之間的臨界頻率，即為閃光融合閾值。

Iwasai 等人(1989)研究不同顏色之閃光融合閾值反應程度，顏色辨別和光源亮暗分別由視網膜上錐和柱狀細胞控制，所以當眼睛疲勞時視覺處理過程的敏感度會變差以致閃光融合閾值發生下降的情形，在高亮度對比或者時間較短的實驗中，敏感度較不顯著。而紀佳芬和林房儂 (1998)在研究指出測試時間在 60 分鐘以上時，在調節力、視力及閃光融合閾值上將會大幅提高的判別視覺疲勞程度的靈敏度，因此在採用調節力、視力及閃光融合閾值作為視覺疲勞量測指標時應拉長視覺觀察時間，否則則無法提高敏感度。

2.1.4 瞳孔直徑、眼睛移動速度及閉眼時間

瞳孔直徑、眼睛移動速度和閉眼時間於靜態的外在環境條件下使用，較無法突顯其變化；在動態資訊進入人眼後才有高度的敏感性，但容易受到外在的因素干擾。

Taptagaporn 和 Saito (1990)認為瞳孔直徑易受外在因素產生變化，如亮度、受測者情緒、資料處理的困難度等，必須將各項變因加以控制方可使用。而張家銓 (2008)也曾以閉眼時間研究駕駛者疲勞

偵測系統，發現眼睛之閉合容易被環境的明亮，與受測者是否有戴眼鏡等外來因素所干擾。

2.1.5 主觀評量

利用受測者主觀評量量測人員的視覺疲勞及作業績效的優點為容易實施，表面效度與時效性也較高，可以快速的處理複雜的變數，且成本低廉，但此方法較易受人的主觀因素所影響，因此主觀評量較難以判斷實際造成視覺疲勞的原因、缺乏診斷性以及使用上也需較多的樣本或次數 (Howarth 和 Fulton, 1990)，且使用主觀評量評比時僅能在作業前或作業後進行量測，不可在作業過程中同步進行。

總觀以上 7 種方法，在使用上都有其缺點，以調節力、視力和閃光融合閾的方式，需長時間的量測，才具有顯著差異性(Iwasaki 等人, 2005; Haider 等人, 1982; 紀佳芬和林房儂, 1998)；以瞳孔直徑和閉眼時間長短等方法檢測視覺疲勞時，則容易受周遭環境影響(Taptagaporn 和 Saito, 1990)；以受測者主觀評比則會受到主觀影響而缺少客觀性，且上述方法有些必須中斷實驗過程才能執行量測。

若能利用眼睛掃視、移動速度及閉眼時間等眼睛移動的訊息發展評估視覺疲勞的方法，將能在不中斷實驗以及不受到外在環境與個人主觀因素的影響下，進行視覺疲勞的量測。

2.2 複雜度分析(Complexity Analysis)

複雜度在過去多用來量測不同生理現象，例如：平衡力 (楊澤宏, 2008)、腦波 (Bruhn 和 Hoefl, 2000) 和心電圖 (Costa 等人, 2005) 等。複雜度可透過物理學的熵(entropy)來表示人體的能量，能量越高複雜度越高，以老人與年輕人為例，年輕時擁有較高的能量和複雜度，但隨年紀增長，能量開始衰退且複雜度逐漸降低 (楊澤宏, 2008)。

求取複雜度有許多方法，一開始 Pincus (1991) 提出了近似熵(ApEn)，但因近似熵容易受資料長度影響，造成分析結果與實際情況不相符，於是 Richman 等人 (2000) 推導出樣本熵，不過由於樣本熵只能在單一尺度下分析，在用於尺度大於一的資

料時，得到的複雜度會有所偏差，因此近年來 Costa 等人 (2003) 更進一步研究發現出多尺度熵 (Multiscale Entropy, MSE) 的計算方法，更能將複雜度的資訊做出正確的呈現。

2.3 多尺度熵 (Multiscale Entropy, MSE)

Costa 等人(2002)研究發現，隨著尺度的增加，雜訊會逐漸降低，因此更能突顯正確的複雜度以降低誤差的產生。MSE (Multiscale Entropy, MSE) 的基本原理是以樣本熵為基礎下將原始資訊進行事前處理轉換成不同尺度的訊號，再進行樣本熵的計算。在給定時序訊號 X_1, X_2, \dots, X_N ，用每個尺度個別的導入樣本熵中去計算其複雜度，得到所有尺度的複雜度值。

王俊等人(2007)利用多尺度熵比較和分析健康人、冠狀心臟病患者與心肌梗塞患者的心電圖複雜度，研究發現健康人心電圖的複雜度高於冠狀心臟病與心肌梗塞患者的複雜度，雖然冠狀心臟病患者的的心電圖複雜度又稍高於心肌梗塞患者，但幾乎呈現接近的狀態，另外也可發現在單一尺度時，三者的複雜度皆很相近，而隨著尺度的增加，健康人的複雜度則明顯的高於兩者，因此可以發現多尺度熵比起樣本熵會有更顯著的差異。

2.4 複雜度指標(Complexity Index)分析

經由 MSE 求得複雜度後，可從複雜度的曲線變化上進行觀察，或將曲線上每個數值加總起來得到複雜度指標並進行分析。

黃瑄詠 (2008)藉由快速演算法算出連續複雜度指標研究禪定對腦波的影響，實驗結果顯示在深度禪定時，腦部動態系統呈現的複雜度指標較高，禪定的品質也比較好，相對而言，初修者的複雜度指標則呈現較低。

相較於多尺度熵的資料型態，透過複雜度指標的運算處理，研究人員能以較快速便利的方式評估研究中自變項與依變項的顯著關係。

2.5 經驗模態分解法(Empirical Mode Decomposition, EMD)

經驗模態分解法的目的在於能夠分析非線性

及非平穩性的數據資料，並能突破舊有的傅立葉分析法限制，而 Huang 等人(1998)為了突破傅立葉分析法的限制，提出以經驗模態分解法為基礎的希伯特—黃轉換(Hilbert-Huang Transform, HHT)，這分解法是利用各種不同時間尺度的能量，將資料分解成本質模態函數(Intrinsic Mode Functions, IMF)，經由分解後每一個 IMF 都適用於希伯特黃轉換，用以求訊號的瞬時振幅與瞬時頻率。

楊澤宏等人(2008)利用多尺度熵方法求取複雜度來比較年輕人與老年人對於站立穩定度之差異，為了得到能量較大的高頻訊號，而導入了經驗模態分解法刪去低頻訊號，只留下能量較大的高頻訊號，在長時間的站立下更能明顯的看出年輕人比老人有較高的複雜度值，表示年輕人站立的穩定度較老年人還要高。

由於現階段分析眼睛疲勞的方法在使用上都有其缺點如實驗必須中斷及敏感度不高等，且尚未有研究以複雜度的角度來探討眼睛疲勞，因此本研究欲驗證視覺疲勞對於眼睛掃視複雜度間的關聯性，若此關聯性存在，便可於日後發展新的評估方法。故本研究將透過複雜度來探討在不同眩光程度與色溫下複雜度分析在視覺疲勞應用上的可行性。

3. 研究方法

本研究為了找出視覺疲勞所反映的眼睛掃視頻率，以經驗模態分解法取高頻(IMF 1)至低頻(IMF 9)來進行探討，評估視覺疲勞在何種頻率下對於眼睛掃視所求得的複雜度會產生疲勞，將取得的本質模態函數導入多尺度熵的計算後，求得每筆訊號的複雜度，再透過複雜度計算加總取得其 CI 值，並探討在不同眩光程度以及不同色溫程度下所產生之視覺疲勞對眼睛掃視複雜度的影響。

3.1 實驗數據

本研究所使用的數據取自於為兩個與 LED(Lighting Emitting Diode)燈相關的研究。第一個實驗為 Chou 等人(2011)研究不同 LED 燈所產生的眩光值對於辦公室人員的影響。實驗中 6 位受測者於 17、24 及 26 三種不同眩光程度(Unified Glare

Ratio, UGR)下進行辦公室作業。第二個實驗為 Lin 等人(2011) 研究不同 LED 燈所產生的色溫值對於辦公室人員的影響。實驗中 8 位受測者於 3000K、4000K、5000K 及 7000K 四種不同色溫程度(Correlated Color Temperature, CCT) 下進行辦公室作業。

兩個研究中受測者所執行的實驗任務相同，受測者在 3 個小時內進行有意義文章打字輸入、在隨機產生的無意義文章中尋找「我」字、無意義文章打字輸入以及辨別圓圈缺口方向四種任務。每一次的實驗流程為實驗說明、舒壓、裝置生理儀器、分別執行四個不同的工作任務以及任務完成後的問卷調查，而每個任務間皆有 5 分鐘的休息時間，每一次實驗全程共計三個小時。

兩個實驗中所量測的依變項除了作業的工作績效外，還包含主觀問卷以及生理值量測。生理值量測項目包含心跳(Heart Rate, HR)、膚電反應(Galvanic Skin Response, GSR)以及閃光融合閾值(Critical Flicker Fusion threshold, CFF)。此外兩個研究中皆使用 ViewPoint Eye Tracker®所設計的眼動儀收集眼睛眨眼時間與眨眼次數資訊用以評估眼睛疲勞。註：本研究所使用眼睛掃視資料雖會與眨眼資料一同收集，但未被兩個研究所分析。

3.2 資料分析方法概述

本研究的資料處理方式可分為六個步驟，包含(1)資料轉換，由於眼動儀為偵測到眼球移動後才截取一次眼球注視位置之資料，故資料間隔時間不一致，因此將取得的數據以 0.02 秒作為轉換的間隔時間，並以十分鐘為一區間(Interval)，因此每個時間間隔內包含 30000 筆數據。Interval 1 表示 0-10 分鐘，Interval 2 表示 11-20 分鐘，而 Interval 3 則代表 21-30 分鐘，且將眼睛掃視軌跡分解為水平方向與垂直方向個別探討；(2)使用 Huang 等人 (1998) 提出的經驗模態分解法將數據拆解；(3)複雜度評估，將拆解後的數據導入 Costa 等人(2002)發展的多尺度熵取得其複雜度值；(4)將每個本質模態函數中前 20 筆複雜度值進行加總，即為複雜度指標；(5)以變異數分析視覺疲勞對本質模態函數的影響；

(6)將有顯著的本質模態函數進行訊號重建後，依上述(3)、(4)、(5)步驟再次分析，並將 IMF 轉換成頻率，接下來對(2)、(3)、(4)、(6)步驟做更詳細的說明。

3.2.1 經驗模態分解法(Empirical mode decomposition, EMD)

由於本研究的數據屬於非線性與非穩態的的資料，適合使用經驗模態分解法來拆解，因此將 Chou 等人(2011)與 Lin 等人(2011)的實驗數據以 0.02 秒截取一次眼球注視的位置做資料轉換，再由 EMD 拆解成多個本質模態函數(Intrinsic mode functions, IMF)，拆解後的 IMF 會由高頻排列至低頻，本研究所截取的資料為 IMF 1 至 IMF 9。

EMD 求取每個 IMF 的過程方法稱為轉移過程，原始訊號經過轉移過程後，會得到一組 IMF，檢查是否符合限制條件，如不符合則繼續拆解進行轉移過程，得到下一組 IMF，反覆進行至符合限制條件，拆解至最後一組 IMF (Huang 等人, 1998)。

3.2.2 複雜度分析(Complexity Analysis)

將拆解出來的 IMF 數據導入多尺度熵求取複雜度值，再將每個本質模態函數中前 20 筆複雜度值加總並進行變異數分析。多尺度熵的基本架構為樣本熵，但樣本熵只考慮在單一尺度下探討複雜度值，並沒有考量多尺度下可能會顯現資料特性隱含的訊息，因此 Costa 等人(2002)研究出多尺度熵，以多尺度下的概念探討複雜度，計算 MSE 的方法同樣是以樣本熵為基礎，進行樣本熵之前，會先對原始資訊進行前處理，主要是取 τ 個時間序列資料後依照其尺度取平均，縮短資料長度在導入 MSE 計算複雜度。

圖 1 表 MSE 前處理概念圖，Scale 1 為原本算出的樣本熵複雜度值；Scale 2 開始將資料每二點取平均，為一筆新資料；Scale 3 則是每三點取平均，成為一筆新資料，多尺度以此概念將資料縮短成為一筆新訊號，將資料縮短完畢後即可將每個 Scale 個別導入公式(1)計算其複雜度值，得出所有 Scale 的複雜度值，即是多尺度熵的概念 (Costa 等人, 2003)。

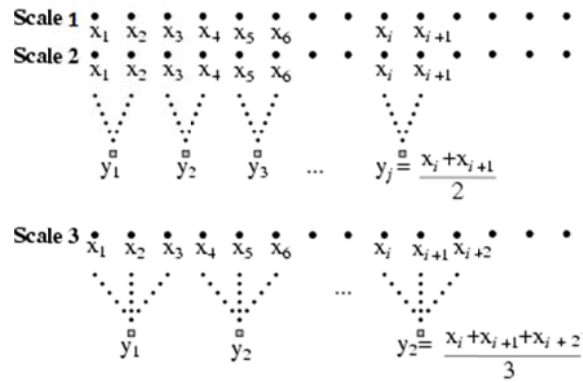


圖 1 MSE 前處理基本架構圖(Costa 等人, 2003)

$$y_j^{(\tau)} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=(j-1)\tau+1}^{j\tau} x_i, 1 \leq j \leq \frac{N}{\tau} \quad (1)$$

3.2.3 複雜度指標(Complexity Index, CI)

在使用多尺度熵計算出複雜度後，可以藉由觀察複雜度曲線趨勢上升或下降，也可利用 Costa 等人 (2007)所提出的複雜度指標(CI 值)進一步的分析與探討，計算方式如公式(2)，其中 $i = \text{scale factor}$ ， $n = \text{total scale}$ ，將每個 Scale 之 SampEn 加總後，所得的值即為複雜度指標 CI 值，圖 2 為複雜度指標加總的示意圖，由於本實驗採取 20 個尺度，將每個 Scale 的 SampEn 加總後，得到曲線下的面積，即是複雜度指標。

$$CI = \sum_{i=1}^n \text{SampEn}(i) \quad (2)$$

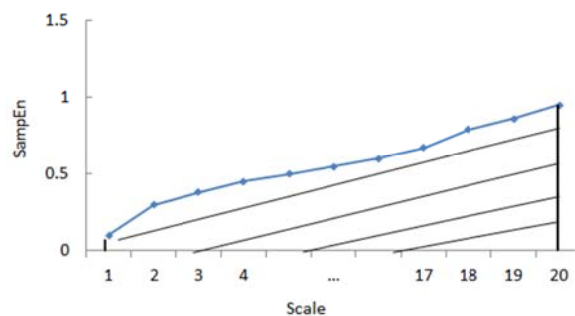


圖 2 複雜度指標示意圖

3.2.4 訊號重建並換算頻率

訊號重建的目的是將拆解後對應視覺疲勞的訊號做整理，以去除和視覺疲勞非相關的雜訊，在本研究中先使用經驗模態分解法將訊號拆解成有

限個本質模態函數，並截取其中的 IMF 1 至 IMF 9。為了提供顯著 IMF 所代表的眼睛掃視頻率範圍，本研究選取第 5 百分位與第 95 百分位作為 IMF 所代表的上界及下界，如下圖 3 兩紅線之間 90% 能量較高的範圍。

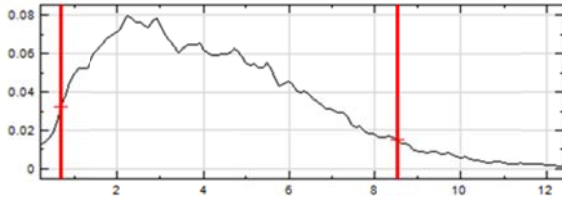


圖 3 頻率範圍選取示意圖

4. 研究結果

資料分析主要分為兩個階段，第一階段以變異數分析評估不同眩光值對於水平與垂直方向的眼睛掃視在九個不同的 IMF 下所求得的 CI 值是否有顯著的影響，第二階段則是延續第一階段所得結果再進行訊號重建，並探討眩光值對於眼睛掃視複雜度是否有顯著的差異。以下分別為兩種實驗數據在第一階段與第二階段變異數分析過後之結果。

4.1 眩光實驗資料分析結果

4.1.1 本質模態函數分解與顯著性分析

將眩光實驗中眼睛掃視資料所求得的複雜度指標以變異數分析眩光的影響顯示不同的眩光對在水平方向的眼睛掃視在 IMF 1 下所求得的 CI 值會有顯著的影響($p\text{-value} < 0.05$)，而不同的眩光對在垂直方向的眼睛掃視在 IMF 1、IMF 2 及 IMF 3 下所求得的 CI 值也有顯著的影響($p\text{-value} < 0.05$)。如圖 4 與圖 5 所示當 UGR 為 26 時，眼睛掃視所求得的 CI 值是最低。

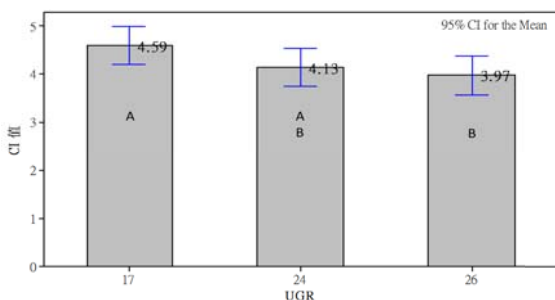


圖 4 三種眩光程度下水平方向眼睛掃視於 IMF 1 所求得的 CI 值

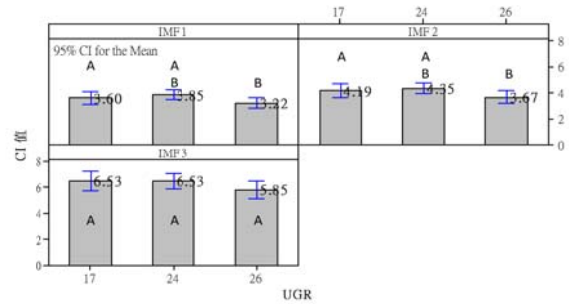


圖 5 三種眩光程度下垂直方向眼睛掃視於 IMF 1、IMF 2、IMF 3 所求得的 CI 值

4.1.2 本質模態函數重建與顯著掃視頻率整理

首先將第一階段對 CI 值有顯著影響的 IMF 進行訊號重建後，在以變異數分析確認後發現，眩光程度仍然對重建後的 IMF 所求得的 CI 值有顯著的影響。重建後的 IMF 所對應的頻率，在水平方向為 0.29~24.12Hz，而在垂直方向為 0.10~22.06Hz。

圖 6 為訊號重建後三種眩光程度下垂直方向眼睛掃視所求得的 CI 值的長條圖，圖中顯示眩光程度為 26 時 CI 值最低的，在使用 Post-analysis 後發現，如圖 6 所示，當眩光值為 17 及 24 時，兩者沒有顯著影響，故將兩者列為同一群組 A；而當眩光值為 24 及 26 時有顯著影響，故兩者被分為群組 A 及群組 B。

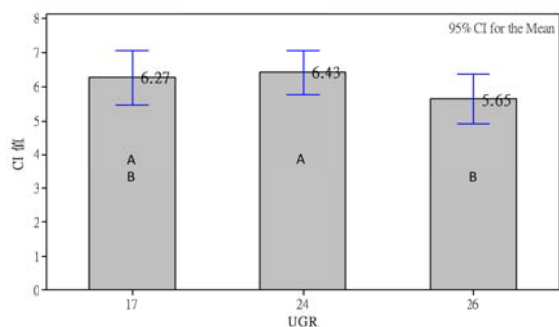


圖 6 訊號重建後三種眩光程度下垂直方向眼睛掃視所求得的 CI 值

4.2 色溫實驗資料分析結果

4.2.1 本質模態函數分解與顯著性分析

將色溫實驗中眼睛掃視資料所求得的複雜度指標以變異數分析色溫的影響顯示不同的色溫對在水平方向的眼睛掃視在 IMF 8 及 IMF 9(圖 7) 下所求得的 CI 值會有顯著的影響($p\text{-value} < 0.05$)，而不同的色溫對在垂直方向的眼睛掃視在 IMF 1 及

IMF 2(圖 8)下所求得的 CI 值有顯著的影響(p-value < 0.05), 如圖 7 與圖 8 所示當色溫為 3000K 時, 眼睛掃視所求得的 CI 值是最低。

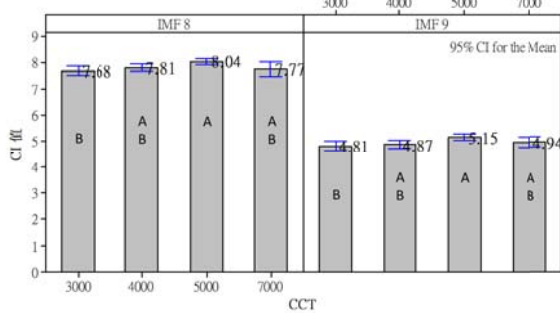


圖 7 四種色溫程度下水平方向眼睛掃視於 IMF 8、IMF 9 所求得的 CI 值

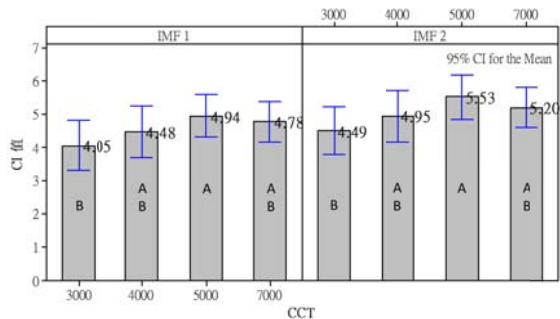


圖 8 四種色溫程度下垂直方向眼睛掃視於 IMF 1、IMF 2 所求得的 CI 值

4.2.2 本質模態函數重建與顯著掃視頻率整理

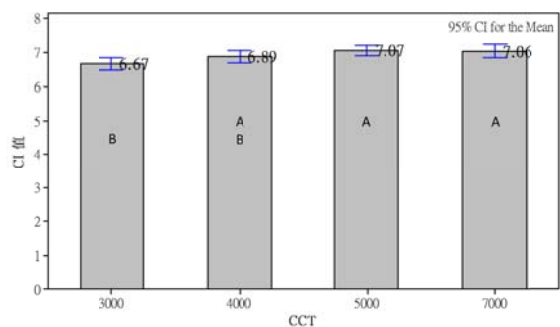


圖 9 訊號重建後四種色溫程度下水平方向眼睛掃視所求得的 CI 值

第二階段將以色溫實驗數據進行變異數分析後有顯著之 IMF 進行訊號重建, 不同 CCT 對在水平方向的眼睛掃視分別在 IMF 8 及 IMF 9 有顯著影響, 而不同 CCT 對在垂直方向的眼睛掃視分別在 IMF 1 及 IMF 2 有顯著影響。接著對重建之後的 CI 值再次進行變異數分析, 發現不同的色溫仍然對重建後 IMF 下所求得的 CI 值有顯著的影響, 並

算出在水平方向有顯著影響的頻率為 0~0.2Hz, 而垂直方向則在 0.20~22.45Hz 中有顯著影響。圖 9 與圖 10 分別為水平方向與垂直方向重建過後的長條圖, 可看出當色溫為 3000K 時 CI 值仍是最低的。

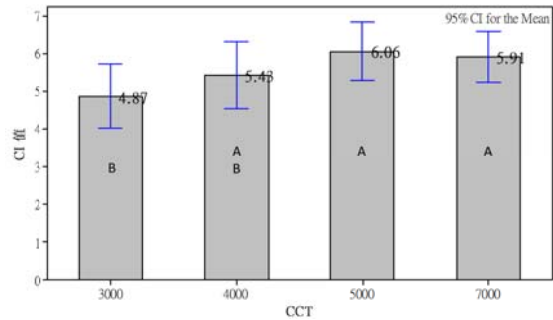


圖 10 訊號重建後四種色溫程度下垂直方向眼睛掃視所求得的 CI 值

4.3 討論

以往複雜度常拿來分析腦波、心電圖等生理現象, 而本研究目的為評估複雜度分析使用在視覺疲勞檢測的可行性, 將複雜度分析應用至眼睛掃視產生視覺疲勞的檢測上。

本研究分別以(1)眩光實驗數據與(2)色溫實驗數據進行複雜度的分析。首先以眩光實驗來做討論, 研究結果發現在不同眩光值所產生的疲勞狀況也有所不同, 從圖 6~圖 10 中皆可明顯的看出當 UGR 為 26 時, 其 CI 值為最低的, 而複雜度在生理訊號方面表現其值越低, 表示身體處於疲憊, 因此 UGR26 時, 受測者的眼睛隨著工作時間增長最感疲勞。此結果與 Chou 等人(2011)的實驗結果相符, 心跳、GSR、眼睛凝視時間與眨眼時間隨著眩光值的增大而增加, 而 CFF 值也有明顯下降趨勢, 顯示眩光值為 26 時, 受測者更容易產生視覺疲勞。

在色溫方面, 本研究結果顯示在 3000K 時 CI 值為最低的, 因此受測者應於色溫為 3000K 時感受最為疲勞此結果與 Lin 等人(2011)在問卷分析結果顯示一致, 然而 Lin 等人(2011)在實驗中, 心跳、GSR、眼睛凝視時間與眨眼時間等衡量指標所呈現的結果是在色溫為 7000K 時的變化來得比其他色溫大, 推測其原因可能為(1)量測指標之心跳、GSR 的感受情形與警覺度方面最有直接關係, 所以 Lin

等人 (2011)的實驗結果為光源色溫在 7000K 之環境予受測者較為機警的感覺，但這是環境給予受測者的感覺，並不為受測者本身的疲憊感；(2)光源種類對於受測者的主觀認知當中差異很小，因此受測者無法在作業中明顯感受色溫不同 (劉彥夫, 2009)故無顯著影響之趨勢。

下一階段將設計能夠驗證本研究需求之實驗，並期望能看出 CI 值隨著時間增長而有下降的趨勢，假若使用複雜度分析評估視覺疲勞為可行的方法，未來可將其撰寫成程式並利用視訊裝置截取眼睛掃視凝視數據並轉換為複雜度判斷視覺是否疲勞，並達到及時提醒使用者眼睛疲勞的作用。

5. 結論

本研究以複雜度分析方法檢測了 Chou 等人 (2011)與 Lin 等人(2011)辦公室人員作業實驗之眼睛掃視數據，從以上的分析與討論之中，歸納出以下幾點：

(一)、以複雜度分析眩光實驗數據，結果與 Chou 等人(2011)之實驗結果相同，為 UGR26 時，受測者感覺最為疲勞。

(二)、以複雜度分析色溫實驗數據，和 Lin 等人 (2011)部分結果不同，其可能原因為 Lin 等人 (2011)之色溫研究實驗本身並無顯著的疲勞現象，只顯示色溫於 7000K 時警覺度較高，但與劉彥夫 (2009)提出當色溫為 3000K時對於大部分受測者在舒適度與辨識程度上是較低的相同。

(三)、從上述資料說明視覺疲勞對於眼睛掃視複雜度，在眩光值的部分與 Chou 等人(2011)的實驗結果符合，色溫的部分也與劉彥夫(2009)所提出的論點相符。本研究結果將有助於未來評估視覺疲勞新方法的建立。

致謝

本研究由國科會專題研究計畫(NSC101-2221-E-155-066)補助支持，特此致謝。

參考文獻

1. 王俊、寧新寶、李錦、馬千里、徐寅林、卞春華，(2007)，心電圖的多尺度熵分析，*生物*

醫學工程學雜誌，24，978-980。

- 紀佳芬和林房儂，(1998)，電腦作業視覺疲勞的瑯測方法，*勞工安全衛生簡訊*，28，5-8。
- 張家銓，(2008)，*以追蹤眼睛狀態為基礎之駕駛者眼部偵測系統*，(碩士論文)，成功大學工程科學系。
- 黃瑄詠，(2008)，*禪坐之腦部非線性動態研究*，(博士論文)，國立交通大學電機與控制工程系所。
- 楊澤法，(2008)，*運用多尺度熵於不同刺激及老化影響下之穩定性研究*，(碩士論文)，元智大學工業工程與管理研究所。
- 劉彥夫，(2009)，*桌上型人工光源之色溫與演色性對視覺績效及視覺疲勞影響之研究*，(碩士論文)，大同大學工業設計研究所。
- Bruhn, J., Ropcke, H., & Hoefl, A. (2000). Approximate entropy as an electroencephalographic measure of anesthetic drug effect during desflurane anesthesia. *Anesthesiology*, 92, 715-726.
- Bullimore, M. A., Howarth, P. A., & Fulton, E. (1990). Assessment of visual performance *Evaluation of human work: A practical ergonomics methodology* (pp. 804-839).
- Chou, C., Lin, R. F., Wang, Y.-T., Chiang, Y.-H., & Hu, H.-L. (2011). *A study of impacts of LED glare on office work*. Paper presented at the The 3rd International Symposium on Digital Manufacturing, Kitakyushu, Japan.
- Costa, M., Goldberger, A. L., & Peng, C. K. (2002). Multiscale Entropy Analysis of Complex Physiologic Time Series. *Physical Review Letters*, 89(6).
- Costa, M., Goldberger, A. L., & Peng, C. K. (2005). Multiscale Entropy Analysis of Biological Signals. *Physical Review Letters*, 71(2).
- Costa, M., Goldberger, A. L., Priplata, A. A., Lipsitz, L. A., Wu, Z., & Peng, C. K. (2007).

- Noise and poise: Enhancement of postural complexity in the elderly with a stochastic-resonance-based therapy. *Europhysics Letters*, 77(6).
13. Costa, M., Hausdorff, J. M., Goldberger, A. L., & Peng, C. K. (2003). Multiscale entropy analysis of human gait dynamics. *Physica A: Statistical Mechanics and its applications*, 330(1-2), 53-60.
14. Haider, M., Kundi, M., & Weissenböck, M. (1980). Worker strain related to VDUs with differently colored characters. In E. Grandjean & E. Vigliani (Eds.), *Ergonomic Aspects of Visual Display Terminals* (pp. 55-64). London: Taylor & Francis.
15. Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., . . . Liu, H. H. (1998). The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings the Royal of Society*, 454, 903-995.
16. Iwasaki, T., Kurimoto, S., & Noro, K. (1989). The changes in colour flicker fusion (CFF) values and accommodation times during experimental repetitive tasks with CRT display screens. *Ergonomics*, 32, 293-305.
17. Iwasaki, T., Tawara, A., & Miyake, N. (2005). Reduction of asthenopia related to accommodative relaxation by means of far point stimuli. *Acta Ophthalmologica Scandinavica*, 83(1), 81-88.
18. Jaschinski-Kurza, W. (1988). Visual strain during VDU work: the effect of viewing distance and dark focus. *Ergonomics*, 31, 1449-1465.
19. Lin, R. F., Chou, C., & Wang, Y.-T. (2011). *Effects of LED color temperature on office workers*. Paper presented at the The 2nd Southeast Asian Network of Ergonomics Societies Conference, Langkawi, Malaysia.
20. Pincus, S. M. (1991). Approximate entropy as a Measure of System Complexity *Proceedings of the National Academy of Science of USA* (Vol. 88, pp. 2297-2301).