

第2章 眼睛的科學

昆蟲、甲殼、脊椎以上的高等動物都有眼睛，眼睛用來感知自己的生存環境，尋覓食物、躲避敵人、繁衍發展。眼睛的視覺功能對我們至關重要。

昆蟲與甲殼類動物有複眼，提供上下左右更廣闊的視野，並可以有效的計算自身與所觀察物體的方位、距離，從而有利於複眼類昆蟲作出更快速的判斷和反應。某些昆蟲的複眼甚至能夠分辨光的偏振。昆蟲的腦容量小，但是複眼占了整個頭部很大的面積。複眼的解析度受到像點的限制，一般來說，其影像解析度比人類的眼睛低。但其暫態的解析度比人類的要高 10 倍。人類的眼睛每秒能分辨 24 幅圖畫，昆蟲的複眼則可達 240 幅左右。複眼的視野接近全方位，這也可以解釋我們徒手抓蜻蜓、蝴蝶時時，無論我們從哪個方向下手，它們都會快一步飛走。

大部分魚類與鳥類的眼睛分別在頭的左右兩側，用來應對廣大生存環境的天敵。但是貓頭鷹與哺乳類動物，眼睛都能往前看，兩眼的視角域交叉才能聚焦，測定物體的距離，建構 3D 的視覺。也因此貓頭鷹能在昏暗的環境中精準的捕獲獵物。

人類的眼睛是很好的照相機，具有望遠、近照、聚焦、廣角等功能。而且視覺可以儲存於記憶，或者將情境聯想推理做出決策。機器人或自動駕駛的汽車，正是類比人類的視覺，以攝像頭感知環境，經過記憶資料庫與程式處理，驅動行動或不行動。

當我們的眼睛主動尋找有用的資訊時，我們的眼睛受體需要持續的聚焦，甚至需要身體配合追蹤移動的目標。根據視覺資訊做出反應是短期記憶和長期記憶相互作用的結果。

2.1 光與色譜

嚴格說來，自然界中並不存在「色彩」，只存在的不同波長的光波。就像三稜鏡能夠折射紅、橙、黃、綠、藍、靛、紫不同顏色的光波，被眼球的視網膜接收，感知到顏色。人類感知紅、橙、黃、綠、藍、靛、紫這個範圍稱為可見光。紅色頻率最低、波長最長；紫色頻率最高、波長最短。波長越長，信號損失衰減小，可以在更遠距離的地方被看見；波長越短，能量愈大，穿透能力越強，可被看見的距離更短，但是貫穿能力強，紫外線可以殺菌，X 光射線還可以貫穿人體，看透器官。

很多鳥類、魚類、爬蟲類、昆蟲類不僅本身色彩鮮豔，也對色彩光波很敏感，甚至可以感知紅外線光、紫外線光。但是大部分的哺乳類動物都對色彩不敏感，或者對紅、綠色盲，據說與哺乳類動物祖先是老鼠，在恐龍時代與隕石撞地球大滅絕，都生活在地下洞穴，晝伏夜出有關。但是人類與猴子例外，為了分辨水果成熟與否，進化能分辨紅、綠色光波。

科學家仔細了解剖眼睛視網膜，發現其中有兩種細胞，視錐細胞(圓椎形)能夠感受紅、黃、藍的光波，但是光線微弱時就無法分辨了。另一種視杆細胞(長杆狀)能夠分辨物體的形狀、輪廓、距離與移動。許多夜行性動物貓頭鷹、貓、貂、狼(犬)、狐狸、刺蝟、鼠類、蝙蝠、蛇、蝦蟹等視錐細胞弱，幾乎不會分辨顏色。但是大多數夜行性動物視杆細胞發達，在夜間視力很好。但是大多數晝行性活動的鳥類與昆蟲，白天對色彩光波接收敏銳，夜晚視杆細胞弱，幾乎不敢活動。

各種動物的視覺接收各不相同，也很有趣，有許多故事可說。但是我們還是回歸主題，人類的視覺與景觀的關係。

有光才能成像，光線充足時，我們很容易辨識彩色世界。日落之後，人工燈光亮度不足，我們也只能辨識物體的輪廓與明暗(白、灰或更灰、更黑)。某些需要夜晚攝錄監視的攝像頭監視器，晚上會投射出紅外線光，使反射回來的影像更清晰，但是也會以黑白的影像呈現。

在非常低的光線下，啟動暗視覺(Scotopic vision)，由視網膜上的視杆細胞感知。而且視杆細胞於 500 nm 的低光波長最敏感，但是無法分辨彩色。在更明亮的光下，啟動亮視覺(Photopic vision)光由負責彩色視覺的視錐細胞感知。視錐細胞對於 555 nm 的波長最敏感。

我們生活的世界所以美麗，因為有燦爛的陽光，日出後 3 小時、日落前 3 小時，光源 45 度投射，有陰有影，甚至有反射，萬物立體感最顯著，物體細節的呈現最清晰，色彩最飽和。陰雨天可能差一些，濃霧、朦朧、月光燭光下，能分辨的色彩、事物就差很多，可能更適合相親約會。我們回顧歐洲繪畫美術發展，南歐的地中海周邊，大部分時候陽光燦爛，充分表達在繪畫藝術上。西北歐、英國等地，緯度較高，大部分時候陽光較溫和，甚至陰雨連綿，這些環境差異是否與文藝復興風格及印象派畫風有關呢？

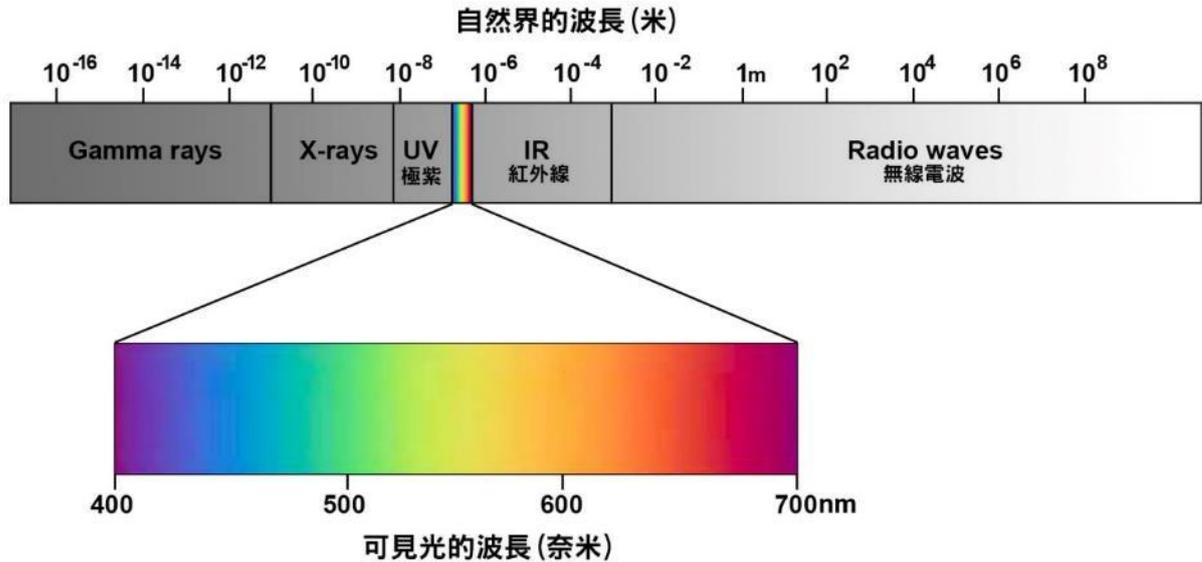


圖 2-1 物理可見光波

人類的視覺感官已經進化到能夠有效接受可見光攝入，激發視網膜受體，對光波頻譜做出反應。理論上人類眼睛對光源的觀察可達無限遠，只要光源夠強。北斗七星距離地球都超過 100 光年，人類仍然看得見。但是觀看地球上的光反射物體，由於大氣中受到水分子的漫射、吸收、衰減，三公里外的大樹或房屋我們就觀看模糊了。如果在空氣稀薄的高山、高原上或乾燥的氣候環境，我們可以看得更遠。

(1) 眼睛的構造

人類的眼睛約略呈球狀，可由周邊肌肉控制，小幅度的轉動眼球。由外而內，分別為眼角膜、瞳孔、透明的水晶體、清澈膠狀的玻璃球體、後側圓凹的視網膜。瞳孔類如照相機的光圈，可以小幅度的縮放調適光線進入眼睛，使落在視網膜上的物體形像既清晰。水晶體、眼房水與玻璃球體類如照相機的鏡片伸縮調焦，攝入光波影像，稱為屈光介質。後側的圓凹視網膜(Retina)就如同照相機感光底片。現代的光學照相機、電子照相機、手機，都是仿照人類的眼睛組合成像。

(2) 眼睛如何感知光

我們用眼睛看到光，這些特殊的生物感測器有很多工作部件。

虹膜根據光線打開和關閉，從最小的 2 mm 到最大的 8 mm。如同單眼照相機的光圈，當光線充足時它會關閉以保護眼睛內部的敏感細胞，而當光線不足時它會打開以允許更多光線進入。

我們的眼睛內部有數百萬個稱為視錐細胞和視杆細胞的微小感測器細胞。錐體在明亮的月光和日光條件下表現最佳，而視杆有助於感知較低的光照水準。

(3) 視錐細胞 (cone cell)

視錐細胞是視網膜上的一種色覺和強光感受細胞，以顯微鏡觀察它，形狀如圓錐形。人類每只眼球視網膜大約 600-700 萬的視錐細胞，大多分佈在視網膜黃斑處，周圍逐漸減少。

(4) 視杆細胞 (rod cell)

視杆細胞是視網膜上與視錐細胞搭配的一種細胞，以顯微鏡觀察它，形狀如長杆狀。主要分佈在視網膜中心周圍，且較視錐細胞對光更敏感，主要分佈在視網膜中央凹周圍，且較視錐細胞對光更敏感，幾乎主要全部用於夜視力，並作為週邊視力的支援。人類視網膜平均有約 1 億 2500 萬個視杆細胞。

視錐細胞是顏色感測器。共有三種類型的顏色敏感錐，每種都帶有吸收特定波長的色彩光波段：445 nm(納米)，對短波藍光敏感，535 nm，對中波綠光敏感，575 nm，對長波紅光敏感。

視覺有能力在不同的光強度範圍 “看到” 景觀，在白天時段視網膜上的視錐細胞可以分辨紅、綠、藍波長，稱為明視覺 (Photoicvision)。單個視錐細胞對三色光波長都很敏感並允許我們從這三種光波信號組合區分出全光譜的百萬種以上的顏色。

在微光的夜晚，若沒有足夠的人工照明，視錐細胞無法發揮功能，就要依靠視杆細胞(rods)分辨物體的形狀輪廓，僅感受到明暗的單色，稱為暗視覺(scotopic vision)。參看圖 2-3。

這些感光細胞在視網膜中分佈並不均勻，在眼球的正後方圓凹面分佈最多，稱為「中央凹(Covea)」，或「黃斑視覺區」。神經束將這些視網膜細胞接受的訊息傳達給大腦解析或記憶。在視神經束與視網膜連接的地方沒有感光細胞，稱為盲點區。參看圖 2-4。

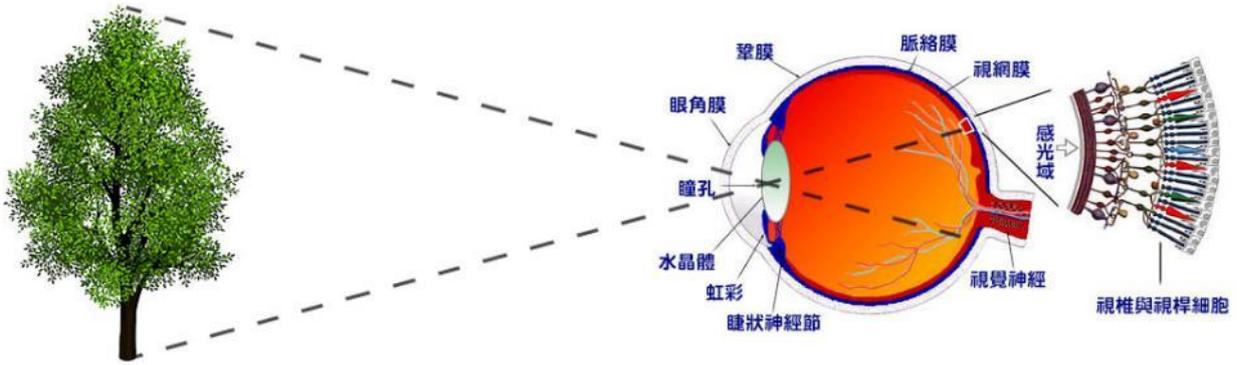
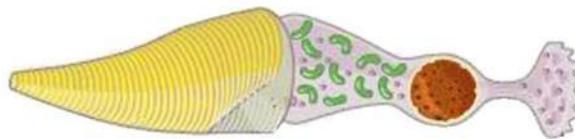


圖 2-2 眼睛的成像

視錐細胞 (感受光的色彩)



視杆細胞 (感受光的強弱)



圖 2-3 視錐細胞與視杆細胞構造

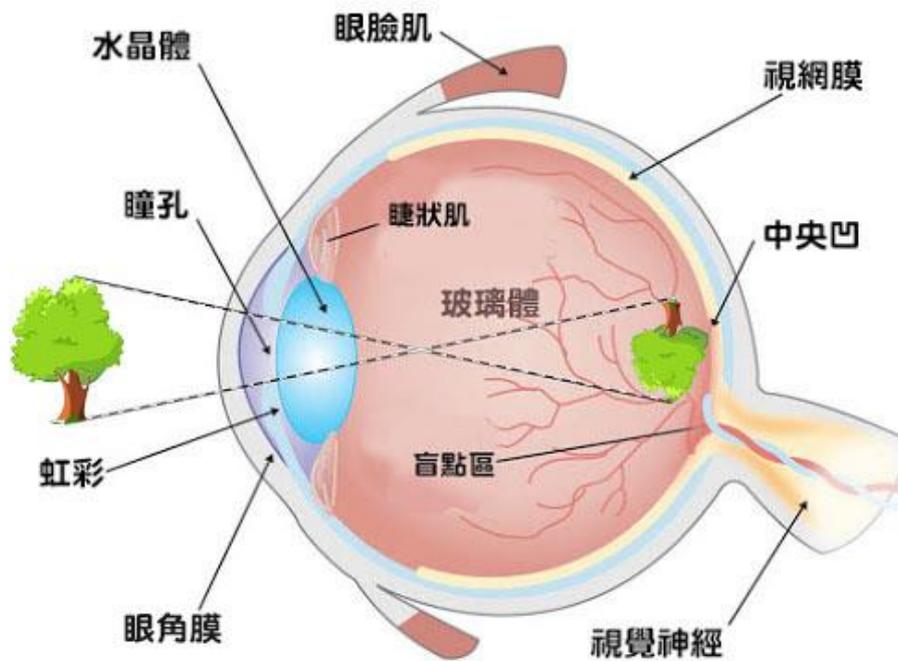


圖 2-4 眼睛構造

2.2 光線與視覺

當我們直視觀看落日、月亮、電燈、火焰，它們是光源，從光源直接照射到眼睛視網膜的入射光稱為照度(Illuminance)，是每單位面積所接收到的光通量，以勒克斯(lux)為單位，晴天太陽約為 10 萬勒克斯，一般客廳照明燈具約為 300 至 400 勒克斯。汽車的近照燈約為 700 勒克斯，遠光燈約為 1200 勒克斯，才能看清楚前方的移動目標。

當點光源向你傳播時，它會散開並覆蓋更大的區域。如同簡報投影機與螢幕距離愈遠，畫面等比例放大，下圖說明瞭這個概念。平方反比定律，描述光的強度與距離的平方成反比。

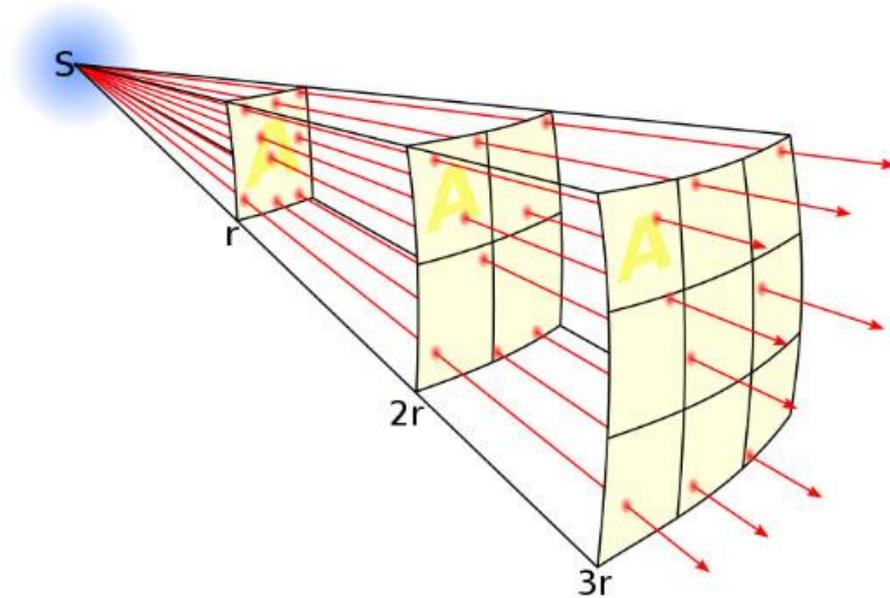


圖 2-5 點光源依據距離放大並且能源衰減(平方反比法則)

我們在景觀中看到的大部分風景都是由地表、植物、水體等表面反射光組成的。反射光的強度稱為亮度，以亮度(luminance 或稱流明度)為單位，國際單位制中規定，「亮度」的單位為 燭光/每平方米 (cd/m^2)。我們也常聽說投影機 1000 流明度(或燭光)才適用於會議簡報，讓幾十位與繪者都能清晰閱讀上面的文字、圖形。

我們觀察景觀，因為太陽光源將直接光束投射到地表的各種物體，不同的物體反射出不同的可見光波。

為甚麼植物是綠色的？

光合作用的樹葉吸收紅光與藍紫光，葉綠素對綠光吸收最少，綠光被反射出來，所以呈現綠色。當秋冬季時，寒冷或乾燥使樹脈輸送養分能力降低，樹葉廢棄物太多，葉綠素會被分解，其他色素(胡蘿蔔素、花青素)就會使葉子變黃或紅。當樹幹或枯葉中的葉綠素、胡蘿蔔素、花青素都很少時，就呈現灰色、褐色。同樣的花朵呈現多種明亮彩色，為了吸引昆蟲在大片綠色植物中找到目標來授粉傳播，還要防止陽光紫外線過度照射。花朵中的花青素、類胡蘿蔔素、類黃酮的數量決定了花朵的色彩

為甚麼湖海是藍色的？

湖泊、海洋等大型水體，吸收了紅色的長光波，留下了藍色的短光波，

因此呈現藍色。靜水域的小湖泊、池塘滋養了大量的綠藻、藍綠藻，因此呈現綠色。少量無雜質的水體看起來就是無色透明的。如果河流、池塘的水體接受了家庭廢水或畜牧、養殖污水，有機物含量過高，大量消耗了水中的溶解氧，有機物便轉入厭氧腐敗狀態，懸浮物使水體變灰、變黑、變臭。因此視覺景觀歡迎青山、清溪、排斥灰蒙建物與灰黑水體。因為很容易聯想到不健康環境。

為甚麼天空與遠山是藍色的？

大氣層中有很多空氣分子，短波的藍色光、紫色光更容易擴散在大氣中，並且距離越遠越易被散射，所以藍光和紫光進入了我們的眼睛，並且眼睛對紫光接收很不敏感，天空與遠山看起來就是藍色的了。如果空氣中的懸浮微粒(PM2.5)很高，讓光線的穿透能力減弱，若逢多雲的陰天，就呈現灰濛濛的景象了。

如何辨識質感

太陽光源投射出是平行、直線的射線光，但是經過大氣層的水分子、雲霧折射形成漫射光，再投射到地表上各種物體表面上就有了點的主光源與面的輔助光源。不同物質各有凹凸不平的不同表面，水面、砂石河床、裸露山壁、稻田、磚牆、屋瓦等，光源投入，又產生多種方向的反射、折射、穿透。我們眼睛的視杆細胞能幫助我們辨識這些粗糙度細節，加上視錐的色彩辨識，從大腦的記憶資料庫中告訴我們，這是溪流、森林、稻田、磚牆、...

但是肉眼的質感辨識距離有限，一般人能夠辨識 3000 米(近景+中景)範圍內的物體，而且還是靠大腦的記憶輔助推測。指認那是高壓電塔、那是混凝土房屋。超過超過 3000 米的物體，就因為空氣中的水分子、或懸浮灰塵粒子吸收短光波，而顯示出灰藍色的遠山或天際線似乎是平面的色塊與輪廓線，失去了立體感。參圖 2-11。

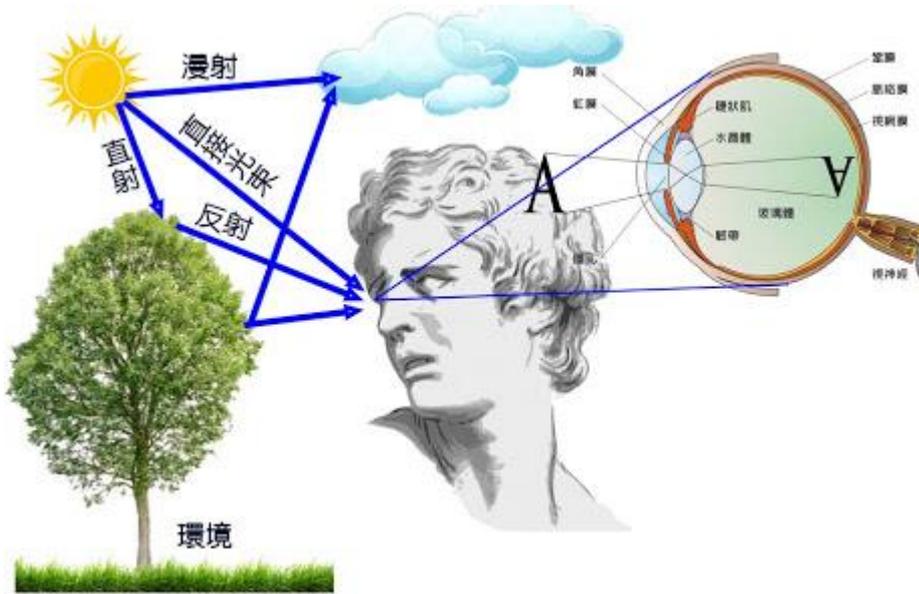


圖 2-6 眼睛觀察物體的質感受到折射與漫射的影響

平行光源投射在物體表面上

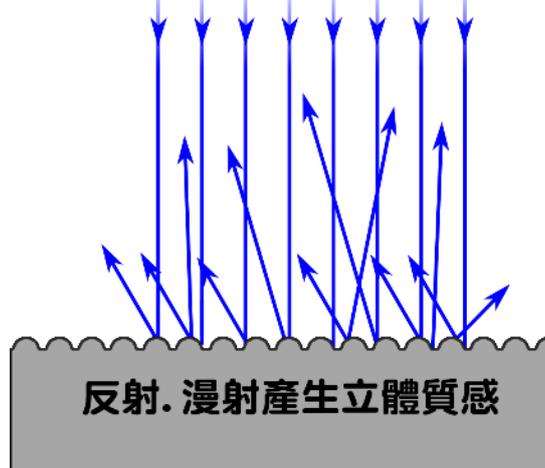


圖 2-7 平行光源落在凹凸不平的物體上產生不規則反射

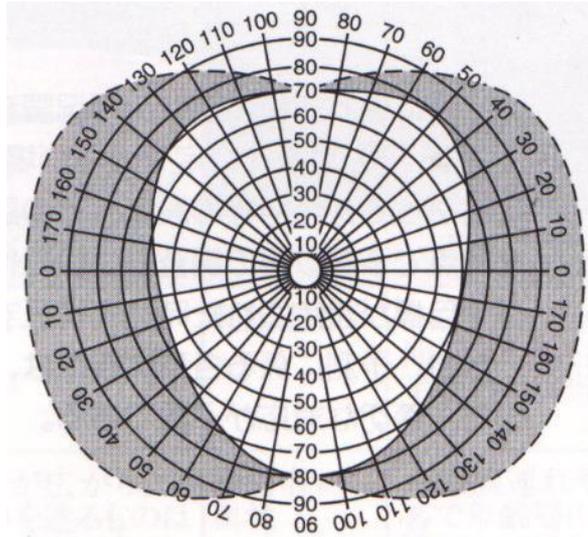


圖 2-8 雙眼視覺視角

2.3 人眼視覺系統 (Human Visual System, HVS)

人眼視覺系統(HVS)是現代電子影像科學的類比研究。推論人類眼睛類似於一個光學系統，但它不是普通意義上的光學系統，還受到神經系統的調節。人眼觀察圖像時可以用以下幾個方面的反應及特性：

(1)從空間頻率域來看，人類眼睛分辨景物的能力是有限的。由於瞳孔有一定的幾何尺寸和一定的光學像差，視覺細胞非常多，卻非無限數量，所以人眼的解析度不可能是無窮盡的，人眼視覺對太高的頻率不敏感，在太強的光照下無法分辨細節。

(2)人眼對於亮度的響應，不是愈亮愈好，亮度需求有個動態範圍。在很亮的環境裡，人眼對灰度誤差不敏感。（*大部分鳥類也是，很亮與很暗的環境下幾乎看不見或不出來活動。）

(3)人眼對於光線明暗對比的敏銳度明顯強於對色彩的分辨感受。

(4)由於人眼受神經系統的調節，人眼視覺系統將對輪廓收受訊號進行強化，會使人眼產生邊緣增強的感覺。

(5)圖像的邊緣訊息對視覺很重要，特別是邊緣位置的資訊。人眼容易感覺到邊緣的位置變化，而對於邊緣的灰度誤差，人眼較不敏感。

(6)人眼的視覺掩蓋效應是一種局部效應，受背景照度、紋理複雜性和信號頻率的影響。視覺的某些部份改變，可能不被人眼察覺。

對人眼給定一個較長時間的光刺激後，其刺激靈敏度對同樣的刺激就會降低，但對其它不同亮度的刺激靈敏變卻不受影響。視覺生理學的這些特徵，也被我們對風景的觀察證實。

一幅解析度低的風景照片，我們可能只能分辨出它的大概輪廓；提高解析度的結果，使我們有可能分辨出它所包含的房屋、樹木、湖泊等內容；進一步提高解析度，使我們能分辨出樹葉的形狀。不同解析度能夠顯現出圖像細節的不同結構。

(7)對於運動圖像，存在一種時間解析度和空間解析度的交換。實際上，生活中也有這種經驗，當快速運動物體從眼前通過時，很難看清其細節，只能看見粗略的輪廓。只有當物體細節大小、細節明暗對比度以及在眼中呈現時間長短都合適時，才能對物體細節有較清楚的感知。

隨著對人眼視覺系統(HVS)生理和心理研究的發展，得知更多景觀接收的物理特性：

人眼視覺系統由眼球、神經系統及大腦視覺中樞三部分構成，當人眼注視景觀場景時，入射光影像首先由瞳孔和水晶體調節、聚焦，使景物在視網膜上成像，然後由視網膜上的神經元將光信號轉化為神經信號並發送到大腦，經過大腦進一步處理後形成對景觀場景的感知。

人眼視覺系統的視覺掩蓋特性：

人眼對單一視覺信號比較容易感知，當幾個視覺信號同時存在時，人眼視覺系統會對其中一個或多個信號的感知能力下降甚至消失，感知臨界值發生改變。

亮度掩蓋：人眼對較亮或者較暗區域感知更弱

紋理掩蓋：人眼對非均勻區域的可見性閾值明顯高於均勻區域

規則圖案(Pattern)掩蓋：人眼對規則物體的分辨力明顯會高於不規則的物體

運動掩蓋：人眼對劇烈運動的場景分辨力會明顯下降

視覺注意，即當人眼注意視覺場景時，人眼會快速將注意力集中在感興趣的視覺內容或者物件上，忽略大腦認為不重要的訊息。