

色彩學的分類及其發展脈絡

The Classification of Color Science
and It's Developmental History

游志雲

國立清華大學工業工程系副教授

The Classification of Color Science and Its Developmental History

Chi-Yuang Yu, Ph.D.

Department of Industrial Engineering, National Tsing Hua University.

Abstract

Color science can be classified into two distinct systems: color ordering system and colorimetric system, because of historical difference in development. The color ordering system is to put the world of colors in order according to perceptual attributes, such as proportion of pigment in mixture, brightness, chromationess and etc. ... The colorimetric system uses tristimulus as a measure of color in simulating our sensation of color.

The development of color ordering systems were almost like random-walk, that is without any contact between workers and without learning from any earlier founders. The first three-dimensional representation of the color system was probably presented by the Swedish physicist Forsius in 1611. In the middle eighteen-century, Tobias Mayer and Johann Lambert attempted to structure colors through a pyramid based on the idea of mixing the three pigment primaries, red, yellow and blue. The first true color ordering system based on visual perception was developed by Philipp Otto Runge in 1810. About the turn of this century. Munsell Color System and Ostwald Color Harmony Manual were established. Munsell Color System was soon become a universal color system, especially in the fields of art and design.

Unlike Color Ordering System, the transition between each stage in the development of Colorimetric System is closely connected. It was the great physicist Sir Isaac Newton who took the first step by introducing the circular arrangement of hues to describe the result of color mixtures. Palmer (1777) and Thomas Young (1802) proposed the ideas of "three retinal receptors for three principle colors". This proof, the trichromatic generation, was undertaken by three major figures in the history of color science, Mermann von Helmholtz, Hermann Grassmann and James Clerk Maxwell in the mid 19 century. Upon the establishment of the trichromatic generation, Arthur Konig established the first color-matching function in 1886. Colorimetric System was then available for scientific and industrial application. In 1931, CIE adopted a new set of colormatching function developed by William David Wright and John Guild Since then, CIE1931 Color System and its Chromaticity Diagram have become a standard internationally. Since 1930s, these two systems have gradually refined themselves by inter-assistance and cross-reference from each other. By the calibration of the CIE Color System, Munsell was able to significantly improve its inconsistency in human perceptual judgement error. On the other hand, based on the perceptual equal spacing of Munsell Colors System, the CIE Color System was able to mathematically transform to several approximately uniform color spaces, such as CIE1976LUV, CIE1976LAB, and OSA UCS.

色彩學的分類及其發展脈絡

游志雲 博士

國立清華大學·工業工程系

摘要

由於發展的脈絡不同，色彩學可以明顯的區分為色彩排列系統(color ordering system)及色彩量測學(Colorimetry)兩類，然則在最近的數十年裡，兩者之間的交流及援引頻仍，互相結合，目標漸漸的融合在一起。色彩排列系統以人眼的直觀，將色彩依不同的感覺屬性，如顏料比例、明暗、鮮艷程度等，排列成一個井然有序的平面或立體。色彩量測學是以三刺激值(X,Y,Z)模擬人眼對色彩的感覺，並以三刺激值構成色彩空間。

色彩排列系統的發展脈絡顯得斷續和分歧。托畢斯(Tobias Mayer, 1723~1762)、梅爾及蘭伯特(Johann Lambert, 1728~1777)首先有系統的量化顏料混合比例，建立一個三維的色彩體系。第一套真正人眼直觀的色彩排列體系是倫齊(Philipp Runge, 1777~1810)的球形色彩立體，可惜它並沒有被廣泛採用而陳跡歷史。在 1890 年，黎濟維(Robert Ridgway)將羽毛的色彩整理成有秩序的色彩體系。受到黎濟維的色彩體系影響，在 1920 年左右，分別發展出奧斯特華德色彩體系(Ostwald color system)與曼塞爾色彩體系(Munsell color system)。奧斯特華德色彩體系是綜合色彩混合與直觀色感建立的；曼塞爾色彩體系是完全以直觀色彩比對建立的。由於曼塞爾體系能夠直接表示人眼的色感，很快的被廣泛應用於美術及設計。

不同於色彩排列體系，色彩量測學的發展則一脈相傳。牛頓(Sir Isaac Newton, 1643~1727)首先將色光排列成環，並進行色光混合。後經湯馬斯楊(Tomas Young, 1779~1829)，赫姆赫茲(Mermann Van Helmholtz, 1821~1897)，馬克斯威爾(James Clerk Maxwell, 1831~1879)建立了三原色通則(trichromatic generalization)，奠定色彩量測的基礎理論。在 1920 年代，基爾特(John Guild, 1889-1979)和萊特(William David Wright, 1906~)完成色彩匹配函數，促成 CIE₁₉₃₁ 色度圖的誕生。由於它能夠精確的標示色彩，因此廣泛應用於科學及工業。

在 1930 年以後，兩類色彩學漸漸的從分立走向整合。曼塞爾的直觀色彩排列，必然會有肉眼上的判斷誤差，在 1943 首先藉著 CIE 的儀器校正成為更精確的色彩體系。而另一方面，

CIE₁₉₃₁ 雖然可以精確的標示色彩，但其色度坐標的均勻程度遠不如曼塞爾色彩空間，亦即相等的坐標差距，並沒有相等的色彩差異感覺。因此，麥克亞當(MacAdam)，裘德(Deane B. Judd)等人嘗試將 CIE₁₉₃₁ 色度圖以數學投影方式轉變成類似曼塞爾的色彩空間，意圖建立一個既能利用儀器精密量測，又符合人眼直觀色彩感覺的色彩體系，如 CIE₁₉₇₆ LUV, CIE₁₉₇₆ LAB 及 OSA UCS 等等。

色彩學的分類

在大約在四百年的色彩學歷史裡，色彩排列系統(Color ordering system)和色彩度量系統(Color metric system)各在不同的理論基礎上發展，也分別在不同的應用領域裡茁壯。色彩排列系統根據人們直觀的視覺，將色彩依不同的屬性，以“感覺等距”的方式來排列並標示色彩，例如曼塞爾色彩體系。由於它是直觀感覺等距，因此廣泛應用於美術與設計。色彩度量系統則利用儀器來度量一個色彩對人們視覺系統所造成的刺激程度，再以這個刺激程度來標示色彩。由於儀器量測比較精確，因此廣泛用於科學，如 CIE 色彩體系。這二個系統雖然各有長處，無可避免的，也有短處。色彩排列系統的短處在於其色彩標示往往有相當程度的人為判斷誤差，並且其柱狀形的色彩體系無可避免的會造成“視覺等距壓縮與膨脹”；而色彩度量系統的缺點在於其色彩度量與人們的直觀色彩感覺沒有關聯性，與感覺等距有嚴重的扭曲。這些缺點是它們向前再發展的瓶頸。為了突破瓶頸，近數十年來，這兩個系統由分立逐漸走向整合，相互交流與援引。色彩排列

系統借助色彩度量系統的儀器來修正視覺誤差，使其色彩的排列及標示更精確滑順；而色彩度量系統擷取色彩排列系統的“感覺等距(equal perception spacing)”性質來作為將它自身轉變成“均勻色彩空間”的參考，使其色彩度量更人性化。這個交流與援引已經為最近的色彩學引出一個新的方向—高級色彩系統(Advanced color metrics)—其目的在於發展一套既有“儀器—精確”的優點又合於人們色彩排列系統“直觀—感覺等距”特性的色彩系統。

色彩排列系統

色彩排列系統是依人們直觀的色彩感覺(Color perception)建立的，又稱之為色彩表相系統(Color appearance system)。這個系統的排列及標示依據：

1. 色彩的感覺屬性作為色彩的維度。
2. 在色彩維度上，色彩的量標(scaling)是“感覺等距”(equal perception spacing)。

我們可以想像這樣的色彩系統就是目前世界上所有色彩的大集合中的一個子集合。它在世

界上所有的色彩中依據感覺等距在色彩維度上取樣色彩。

取樣的基本色彩維度通常為色相維度(hue dimension)、無彩維度(achromaticness)和彩度維度(chromaticness)。色相維度是將色彩的表相歸類於近似於紅、黃、綠、藍，或其中任何結合的視覺屬性。無彩維度則是將所有色彩感覺成份抽離後的明暗感覺屬性。常用的無彩維度有明度(lightness)、亮度(brightness)、暗度(darkness)、白度及黑度(whiteness or blackness)。彩度維度是感覺的色彩鮮艷程度，或者說遠離無彩度的量。常用的彩度維度有彩度(chroma)、純度(purity)、或飽和度(saturation)。一般通用的色彩排列系統都是以三維構成的色彩立體，形式以柱狀形式及球狀形式居多。

色彩排列系統由於採用的色彩維度、維度定位原點、色彩間距、色彩標示方法，以及原色數目的不同，大致可以分為：

1. 根據表相屬性，如色相、明度與彩度作量標(scaling)的色彩體系，例如曼塞爾色彩體系(Munsell Color System) (圖一)。
2. 根據色彩差異作量標，但不分隔為感覺等距的色彩體系，例如自然色彩體系(The Natural Color System, NCS) (圖二)。
3. 根據基本色(elementary color)的近似性作量標，如德國的 DIN 色彩體系 (圖

三)。

4. 根據色彩的視覺對抗性(opponent Color)作量標，例如美國光學學會的 OSA 均勻色彩空間(OSA Uniform Color Space) (圖四)。

色彩度量系統

色彩度量系統是建立在心理物理(psychophysical)的三原色通則(trichromatic generalization)理論基礎上，以色光混合匹配的實驗來度量色彩。心理物理就是以物理量來等同心理的(視覺)感覺的方法，感覺可以像物理量一般的加以數學運算。三原色通則主張人的色彩視覺是由視覺系統中三個互相獨立的色彩感覺機制加成(addition)的結果。反過來說，一個色彩會分別對三個色彩感覺機制造成刺激，這三個刺激量稱為色彩三刺激值(tristimulus)，於是乎，我們就用這三刺激值來作為該色彩的度量。這三刺激值是以色光混合匹配的實驗來量取一個被度量的色彩，稱為色彩刺激(test color stimulus)，可用三個輻射功率經過調整的原色刺激(primary color stimulus)經過適當調整依加色混合(addition mixture)而得到完全匹配，此時，三原色刺激的量就是該被度量色彩的三刺激值(圖五)。

CIE₁₉₃₁ 色彩空間是最基礎的色彩度量體系(圖六)。CIE₁₉₃₁ 色彩空間是以三刺激值 X、Y 和 Z 為色彩維度所構成的三維尤拉幾何空間(三軸互垂直的空間，有別於極坐標式的

柱狀或球狀空間)。三刺激值分別以 X、Y 和 Z 表示人的三個色彩感覺機制中，分別對長波長(紅)、中波長(綠)及短波長(藍)比較敏感的機制。在色彩空間中，三刺激值所表示的向量稱為色價(color valence)。色價就是三原色通則中三個互相獨立的色彩感覺機制加成的結果。

CIE₁₉₃₁ 色度圖 (chromaticity diagram) 是以二維的平面來簡化三維色彩空間的色價，以 (x、y、Y) 來表示 (X、Y、Z) 的色價 (圖六)。首先我們分別用 x、y 和 z 三個值來表示 X、Y、Z 在色價中所佔的比率， $x = X / (X+Y+Z)$ 、 $y = Y / (X+Y+Z)$ 以及 $z = Z / (X+Y+Z)$ 。因為 $x+y+z = 1$ ，因此我們只要用 x 和 y 兩個比率值就能夠清楚的表示一個色價的比率，因為 $z = 1-x-y$ 。例如：x = 0.4，y = 0.4，則 z 一定等於 0.2。色度圖與色彩空間的關係就是三維空間的色價(向量)在二維的單位平面(unit plane)上的投影。另外值得一併說明的是在(x、y、z)的標示中，x 和 y 所表示的只是色彩的色價成份，其亮度的大小以 Y 表示之。這是因為把三維的色價投影成二維的色度，會使得 X、Y、Z 所表示的三維色價喪失了，亦即向量的長度，而這個色價的大小可以用來表示亮度，於是乎，CIE 就很巧妙的把這個亮度指定給 Y(也就是三刺激值中 X 和 Z 兩項只代表色度，而 Y 既代表色度又兼代表亮度)。

色彩學的發展脈絡

色彩學四百年的歷史，其發展脈絡首先由色彩排列擔綱，約晚一百年，色彩度量系統加入色彩學的發展行列。雖然說人類自有歷史以來就和色彩息息相關，天空和雲霧的色彩用來判斷天氣的好壞，果實和肉品的色彩是成熟、新鮮與品質的指標，然而人類對色彩的研究多止於語言文字的描述。真正對色彩作有系統的研究大約始自十六世紀末期。在這個時期，由於三稜鏡的出現，有許多的科學家，如毛勒里卡斯(Maurolycus, 1494~1575)、里·多明尼斯(de Dominis, 1566~1624)及里·可龍蘭(de Kronland, 1559~1667)等人發現太陽光經過三稜鏡的折射會顯現彩虹般的色譜排列。當時，這是個引起好奇及困惑的科學實驗，當然也激起一股研究光的物理和色彩的熱潮。這股熱潮在物理上引發了粒子說和波動說的爭論，而在色彩上使得色彩學開始萌芽。

色彩排列系統首先萌芽。在 1611 年，瑞典的物理學家霍西斯(Forsius, 1611)，首先提出一個色環的排列，在直徑的兩端分別排列黑—白、紅—藍、綠—黃、灰—棕等八對色彩(圖七)。以我們今天的觀點，實在看不出其排列的原則有何比較合理的依據？除了這個色環以外，他同時提出一個球狀的色彩立體，以白色為頂，黑色為底，藍、綠、紅、黃分別排列在不同的經線上。這個立體的排列顯然比較合理，這是色彩排列系統的先驅。

在大約一百年之後，牛頓開啓了色彩度量系統的發展。牛頓以大師的架勢解決了先前諸位物理學家對光的疑惑，證實太陽的白光是由七種不同光譜色光均勻混合而成的，他同時指出物體之所以顯現色彩是因為物體對各個光譜色光的反射量不同的原故。接著他便開始著手色彩混合的研究。首先，在 1704 年，他將七種光譜色光—靛(indigo)、紫、紅、橙、黃、綠、藍，依照音樂八度音的全音程與半音程比例排列成一個色環（圖八）。藉著這個色環，他套用他的萬有引力定律來解釋色彩混合的結果。這個色彩混合的實驗就啓發色彩度量系統的發展。

色彩排列系統的研究接著蓬勃的展開。受到牛頓的影響，黎柏龍(le Blon)在 1731 年首先提出紅、黃、藍為顏料混合的三原色的理論。根據這個理論，托畢斯·梅爾(Tobias Mayer, 1723~1762)及蘭伯特(Johann Heinrich Lambert, 1728~1777)分別建立以顏料混合比例為量標的色彩立體。尤其，蘭伯特的色彩立體是三角錐狀的，其錐底的三角分別為紅、黃、藍三原色。這兩個色彩體系的目的是要作為畫家調色參考用的，是依顏料混合比例建立的。真正的色彩表相排列系統在 1810 年首度出現，是由倫濟(Philipp Otto Runge, 1777~1810)提出的雙錐色彩立體。可惜大概由於他隨即死亡，這個色彩體系沒有引起重視而陳跡歷史。

得自牛頓色彩混合實驗的啓發，顏料三原色與色光三原色遂漸成型。在牛頓開始從事色彩混合後的二十年，黎柏龍首先於 1731 年

提出紅、黃、藍為顏料混合的三原色的原理以後。這個構想觸發柏瑪(Palmer)於 1777 提出紅、黃、藍同樣是色光混合三原色的原理。在 1802 年，湯馬士·楊(Thomas Young, 1773~1829)根據這個原理提出“眼睛視網膜上有三種感光神經，分別對紅、黃、藍比較敏感的構想”。接著，在 1807 年他將之修正為“分別對紅、綠、藍比較敏感的三種感光神經”。由於他戴著大師的光環，因此奠定了色彩度量系統的基礎。這個構想後來就成了楊—赫姆赫茲原理。

在十九世紀初，也就是倫濟和湯馬斯·楊發表偉大貢獻的同時，哥德(Johann Wolfgang Von Goethe, 1749~1832)將色彩學與生理學建立了關係，對色彩學的發展產生深遠的影響。他企圖將顏料三原色（紅、黃、藍）與色彩的生理屬性，如極性或互補性結合在一起。根據色彩殘像的實驗，他的色彩極性觀念主張色彩會相互的激發拮抗色彩，比如黃會激發紫；橙會激發藍；紅會激發綠等等。於是乎，他把紅、橙、黃、綠、藍、紫等六色平均的分配在圓環上(圖九)，直徑的兩端分別為拮抗的色彩配對：橙—藍、紅—綠、黃—藍。這個觀念後來發展成赫林(Hering, 1875)的彩色視覺拮抗理論(opponent theory of color vision)。哥德的色彩生理理論使得十九世紀的色彩學明顯的分為兩個主流：根據色彩表相的色彩排列系統，與根據色光混合的色彩度量系統。

在哥德之後，色彩排列系統的發展大多是色彩表相主義。重要的有柴佛利(chevreul, 1832)的色度環(chromatic circle)及半球色彩立

體(semispheric color solid)是根據互補色的原理構造的。溫特(Wundt)的球型色立體；艾賓豪(Ebbing haus)的兩頭方錐色立體以及赫林的自然色彩系統都是根據色彩拮抗原理建立的。

到了十九世紀中葉，色彩度量系統三原色通則的理論基礎才正式完成，進入成熟的階段。雖然色彩度量系統自 1704 年的牛頓色彩混合實驗開始萌芽，但其發展相當緩慢，即使柏瑪(1777)和湯馬斯·楊(1802, 1807)提出色光三原色和色彩三機制的假說，也僅止於構想的層面。直到十九世紀中葉，經過赫姆赫茲(Hermann von Helmholtz, 1821~1897)，格拉斯曼(Hermann Grassmann, 1809~1877)及馬克斯威爾(James Clerk Maxwell, 1831~1879)等三位大師的努力，三原色通則的理論才正式確立。當時，距牛頓的色彩混合實驗已經有 150 年了。

在 1850 年，赫姆赫茲由於受到湯馬斯·楊的三色彩感覺機制的啓發，他帶著懷疑的眼光，認為每個感覺機制都會對任何光譜色有不同程度的敏感度，因此首先提出了色光混合敏感度曲線的構想(圖十)。基於這個構想，在 1852 年，他分別做了顏色和色光的混合實驗，他終於領悟到顏料的混合是減色混合，而色光的混合是加色混合。雖然在今天這是任何有色學彩概念的人的常識，可是這個領悟就得費上 150 年的時間。其中對色光的混合，他發現只有三個光譜色光並無法混合出所有的色彩；而且在牛頓色環上，只有黃—藍組合可以混

合出白光，而並非所有以直徑相對的任何色光組合均能混合出白光來。他開始對三原色的假說提出質疑。

隔年，1853，針對赫姆赫茲的質疑，格拉斯曼仔細利用向量來分析構成三原色假說的數學充要條件。他提出了著名的格拉斯曼推論：

1. 眼睛只能區別三種的差異或變化(例如，可用色相，亮度及飽和度來表示變化)。
2. 三個刺激的混合，如果其中一個不斷的變化(而其餘兩個固定)，則混合的色彩亦不斷的變化。
3. 同樣色彩的刺激(就是，同色相、同亮度、和同飽和度)混合之後產生相同的視覺效果和其光譜組成無關。

為了要構成色光混合匹配的物理相等性，他假設性的定義了三個互為獨立的色彩感覺的心理量—色相(hue)，亮度(brightness)和飽和度(saturation)。這個構想是色彩度量系統發展上的關鍵，偉大的創舉。他同時指出，在允許“外在混合”的情形下，任何一對的光譜色光都能夠先行混合，其結果再和另一個光譜色光混合而得到白色。所謂“外在混合”是如果被度量的色彩無法用三個光譜光混合匹配的話，例如可能因為被度量色彩的飽和度太高的關係，則可將三個光譜色中的一個先行和被度量的色彩混合，使其飽和度降低(desaturated)，而後再用另外二個光譜色混合匹配。

馬克斯威爾研讀了赫姆赫茲及格拉斯曼的研究之後，他利用非常簡單的“色盤(color wheel)”及“色彩箱(color box)”進行色彩心理量的混合實驗。他，時年 24 歲的學生，以其過人的天資，在 1855 年提出這樣的看法：

我所採用的原理假設有三種色彩感覺機制的存在，其結合就產生色彩。因此，我們就不必侷限於那三個標準的原色光會產生這些色彩感覺。湯馬斯·楊將之定為紅、綠、紫，然而任何三個色光都可以，只要它們能依適當的比例混合出白光。

色彩是三種色彩感覺的混合形成的，因此我們只須關注的是三種色彩感覺，而無須假設任何特定的三原色光，同時受到赫姆赫茲色光匹配函數、構想的啓發，他認為任何一個色光不會單獨的影響一個色彩感覺機制，然而會對三個同時產生不同程度的影響。至此，三原色假說的疑惑被解決了，基礎理論只待更數學化的証實。在 1857 年，他提出色彩三角形的構想，後人稱之為馬克斯威爾色彩三角形（圖十一）。它是一個正三角形，其三角分別為紅、綠、藍三原色，三角形內的位置就是這三個原色混合的色域，重心的位置是白色。三角形的外面是一個圓，由白色向外輻射在圓周上標註該輻射線上所有色彩的基本光譜色（或其混合）。這個三角形就是 CIE₁₉₃₁ 色度圖的前身。他同時利用這個三角形，仔細的探討色光混合匹配的數學關係，他用數學式來表示色彩感覺的混合，並證實色光混合能夠用向量加以運算。

這個三原色通則被後來的學者寫成下列的敘述：

具有三個色彩感覺機制的眼睛，在適當的光適應之後，獨立的依不同的色彩敏感度函數，以線性連續的法則衡量入射的光線，這三個色彩感覺融合成一個整體的感覺效果—稱之為色價（Erwin Schrödinger, 1887~1961）。

三原色通則的理論已經正式確立了，等待的是開花結果—色光混合匹配函數曲線的建立。色光混合匹配函數曲線就是三個色彩感覺機制，分別對光譜色的敏感度的曲線，我們現在稱之為“標準觀看人”。前面提及，在 1850 年赫姆赫茲就提出了一個假設性的色光混合匹配函數曲線（圖十）。他認為這個曲線的建立可以根據色光加色法，利用三原色光來匹配所有的光譜色。這個構想，後來得到馬克斯威爾色光匹配函數曲線的佐証（圖十）。因此他和他的學生柯尼格（Arthur König, 1856~1901）共同設計了一組光譜色色光混合的儀器。後來由柯尼格加以完成。這個曲線一直被延用到 1931 年 CIE₁₉₃₁ 色彩體系問世。

我們不禁感嘆，為何這樣一個純粹建立在視覺生理與心理方面的研究在色彩度量系統上會扮演如此重大的角色。這就是牛頓所說的：任何色光都是由可見光範圍內一些不同波長的光譜色光的加總結果，並且任何色光混合後的色彩就是其所有光譜色組成分量的加總。這個意思就是如果知曉色彩刺激的分光曲線，以及光譜色的色彩方程式，則我們就能夠

計算該刺激的色彩。

到了二十世紀初，色彩度量系統已經達到相當完美的階段，於是乎，CIE在1931年公佈了標準的CIE₁₉₃₁色彩度量體系。在色彩度量系統開花結果以後，一方面由於科學儀器的推陳出新，一方面由於色彩度量的精確需求逐漸提高，於是色彩學家想利用較精確的儀器來制定比較標準的色光混合匹配函數曲線。在本世紀初，先後發明了電燈和光譜分析儀，電燈能夠產生較穩定的光源，而光譜分析儀能夠精確的分析一個色光的所有波長的光譜色的能量組成。然而計算色彩所使用的色光匹配函數曲線幾乎完全一致的還沿用柯尼格的曲線。須知柯尼格當初建立這個函數曲線的光源是本生燈，其準確性應可以加以改進。在1928年左右，基爾特(John Guild, 1889~1979)和萊特(William David Wright, 1906~)同時進行重建色光匹配函數曲線的研究。在1931年，CIE(Commission Internationale de l'Éclairage)同時討論他們兩人量測的結果，委員會認為兩人所量測的結果非常一致，於是就整合兩人的結果，制定為標準的色光混合匹配函數曲線，亦即所謂的CIE₁₉₃₁的標準觀看人(standard observer)(圖十)。這個標準觀看人並且與CIE₁₉₂₄的亮度敏感度曲線V(λ)結合。在1931年公佈之後，很快的就成為通行全世界的色彩度量系統。

正在色彩度量系統開花結果之際，色彩排列系統也有了新的發展。在1890年，美國的鳥類學家黎濟准(Robert Ridgeway)，為了要

分類鳥類的羽毛，建立了一套色彩排列系統，受到相當程度的重視。不久之後，在1905年，美國的美術教師曼塞爾(Albert H. Munsell, 1858-1918)為了教導色彩學的目的提出了曼塞爾色彩體系(Munsell Color System)，這個色彩體系立即引起美術界和設計界的注意，很快的變成適用於全世界的色彩體系。稍後，德國的奧斯特華德(Wilhelm Ostwald, 1853~1932)也建了一套色彩體系—稱之為色彩調合手冊(Color Harmony Manual)，其目的在於協助設計師解決色彩調合的問題。

在這三個色彩體系中，最具有色彩表相性質的首推曼塞爾色彩體系。身為小學藝術教師，曼塞爾的原始構想是發展一套色彩標示系統以作為色彩教學的工具。他將色彩的屬性定義為色相(hue)，明度(value)和彩度(chroma)。一開始，曼塞爾就同時以直觀方法及心理物理量測技術與肉眼直觀並進的方式來進行色彩量測。他一方面用熟練的藝術家做直觀的色彩判斷，一方面用他自行發明的測光表(photometer)和馬克斯威爾的色盤當作測量儀器。他用測光表來控制明度標示，並且用色盤的混合來標示色相和彩度的間隔。

曼塞爾色彩體系是以色相、明度及彩度等三個維度構成的柱狀色彩立體。色相環的十個基本色相為紅(R)、黃紅(YR)、黃(Y)、綠黃(GY)、綠(G)、藍綠(BG)、藍(B)、紫藍(PB)、紫(P)、及紅紫(RP)。每對相鄰色相之間又分為10個階段。明度的標示由0到10，0為極黑，10為極白，然而在一般的色彩原料或物

體上，其明度值介於 0.5 到 9.5 之間。彩度以灰色為 0，而且依色相的不同，最高的彩度約在 12~15 之間。

1. 曼塞爾色彩體系的沿革可分為四個階段：
2. “一個色彩標示(A Color Notation)”—曼塞爾體系的概念架構於 1905 提出。
3. “曼塞爾色彩體系圖譜(Atlas of the Munsell Color System)”—第一個實例色彩樣本於 1915 年出版。
4. “曼塞爾色彩書(Munsell Book of Color)”於 1929 年出版。
5. “新標示曼塞爾系統(The Munsell Renotation System)”於 1943 年出版。其中“新標示”三個字於 1957 年取消。

曼塞爾色彩系統為全世界應用最廣泛的色彩體系。這個系統推出不久，隨即受到美國藝術界與設計界的廣泛採用，並很快速推廣到全世界。在今天，幾乎全世界各地的中小學美術課本，以及美術設計相關的課程都以它為教材，並且也經常被應用於科學及工程，比如最近的電腦的彩色螢幕、印表機多常以它作為色彩標示系統。特別是它在 1943 年經過美國光學學會利用儀器校正之後，被美國國家標準(American National Standard Institute, ANSI)及美國材料測試協會(American Society of Testing Material, ASTM)正式採用色採標準。日本的 Chroma Cosmos 5000 以及英國色彩標準亦以

它作為基礎建立的。

高級色彩體系-新的發展方向

色彩排列系統與色彩度量系統雖然各有長處，無可避免的，也有短處。色彩排列系統在於其色彩標示往往有相當程度的人們直觀判斷誤差，並且柱狀系類的色彩立體無可避免的會造成“視覺等距的壓縮與膨脹”；而色彩度量系統的缺點在於其色彩度量與人們直觀的色彩屬性沒有直接的相關性，且在色彩空間中與色度圖上有明顯的“視覺等距的扭曲”。

首先，我們以曼塞爾色彩體系來作為實例來說明色彩排列系統的肉眼直觀的判斷誤差。曼塞爾的色相維度，明度維度與彩度維度上的視覺等距其實都不相等（圖十二）。例如一個明度標示格為 40 倍的 jnds，而彩度只有 28 jnds，而色相則更是隨其彩度高度而有不同倍數的 jnds。即使在同一維度上，視覺等距還是有肉眼判斷的誤差，就以明度維度為例吧！在無彩度的情形下，肉眼判斷會因彩度的干擾而產生相同分歧的判斷誤差。這些肉眼判斷的誤差後來往往經過美國光學學會利用 CIE 系統中的色彩純度（purity）與輝度指數（luminance factor）以迴歸的方式加以修正改進，解決了部份誤差的問題。

柱狀系的色彩立體無可避免的會選視覺等距的壓縮與膨脹。曼塞爾體系一個色相單位是間隔 3.6° 。在一個同彩下的色相環，每一組相鄰的兩色相之間都表示相等的色相差異。然而隨著彩度的不同，每個相等色彩差異所

代表的恰可分辨差異的倍數是不相等的，在彩度為 1 時，只有 1 倍，在彩度為 5 時是 13.2 倍而彩度為 10 時已經上達百倍以上。這種現象稱之為“視覺等距的壓縮與膨脹”，這是採行柱狀或環狀色彩立體無可避免的缺點。

接著，CIE₁₉₃₁ 色彩度量系統色彩度量與人們直觀色彩感覺屬性沒有關聯性，且其視覺等距有嚴重的扭曲現象（圖十三）。CIE₁₉₃₁ 色彩系統的標示分別使用(X、Y、Z)與(x,y,Y)，前者表示三刺激值後者表示三刺激值的比例與亮度。雖然說這些標示能夠很精確的表示色彩，然而人們卻無法直接由其標示馬上感覺到色彩的本身。例如，大多數的人無法直接由下列的幾組標示如(x = 0.1, y = 0.3) (x = 0.2, y = 0.3) (x = 0.3, y = 0.3) (x = 0.4, y = 0.3) (x = 0.5, y = 0.3) (x = 0.6, y = 0.3)，立刻感覺到其色彩由青綠轉藍變白，帶黃，粉紅而最後變成正紅。視覺等距的扭曲現象可以用麥克亞當橢圓(MacAdam Ellipse)加以說明(圖十三)。圖中，每個橢圓中心到其邊界的距離表示恰可分辨差異的十倍。事實上，橢圓本身就已經說明其視覺等距是不均勻的，在長軸方向與短軸方向的 jnd 大小不一致；同時橢圓的大小也因在色度圖上區域的不同而差別極大，藍色最小，紅色次之，而綠色區域最大，這個現象我們可以在 CIE₁₉₃₁ 色度圖上，紅色、藍色與綠色面積的大小，體會這個現象的原由。

為了要改進這兩個色彩體系的缺失，於是乎引發了再一波的色彩體系的研究——有人稱之為高級色彩體系（advanced color system

）。在二十世紀，色彩的標示與度量逐漸臻於成熟之後，特別是自 1931 公佈了 CIE₁₉₃₁ 色彩體系之後，在工業應用上馬上發生許多問題。因為在工業上買賣雙方必須要約定商品與樣品間的色彩誤差可容許範圍。例如一個印刷廠向油墨廠訂購紅、綠、藍油墨各一批，其樣本的色度坐標分別為紅(x = 0.60, y = 0.30)，綠(x = 0.10, y = 0.70)，藍(x = 0.20, y = 0.10)。在視覺等距嚴重扭曲的色度圍上，雙方必須對紅、綠、藍三色分別訂定不同數值的誤差範圍，例如紅色的誤差為 $x = \pm 0.02$ ， $y = \pm 0.025$ ；綠色 $x = \pm 0.05$ ， $y = \pm 0.10$ ；而藍色 $x = \pm 0.01$ ， $y = \pm 0.015$ ，往往費時費力，造成爭議。因此就引發了高級色彩體系的研究。

高級色彩體系的目的是在於發展一套既有“儀器—精確”的優點又合於人們視覺“直觀—感覺等距”特性的色彩系統。為了達成這個目的，比較有效的發展策略有二，一是以 CIE₁₉₃₁ 色彩體系為基礎，二是以曼塞爾色彩體系為基礎。CIE₁₉₃₁ 色彩體系的優點在於它可用儀器量測和可以數學運算。度量可以數學運算的意思是其色彩空間的坐標可以用線性或非線性的投影轉換，將其空間的坐標標示作適當的變換。簡單的說，如果在平面坐標原點上有一個圓，如果將其 X 軸的比率放大為 2，則圓會變換成一個橢圓，反之，可以將橢圓變圓。由於曼塞爾色彩體系具有視覺等距的優點，因此只要慢慢調整投影轉換的係數，使之逼近於曼塞爾色彩體系，則就可以達成視覺等距的目標。在這個方法的研究上有 CIE₁₉₆₀ UCS，CIE₁₉₇₆ LUV 及 CIE₁₉₇₆ LAB 等近似均勻的色

彩空間。而曼塞爾色彩體系的優點在於其空間已經相當的視覺等距。然則美中不足的地方在於其色彩空間是建立在柱狀坐標空間上，因此會導致視覺等距壓縮與膨脹的缺點，因此工作的第一步驟是將其空間變換成尤拉坐標，而後再和 CIE 色彩空間建立數學轉換關係。在這個方法的研究上有美國光學學會的 OSA 均勻色彩空間。

CIE₁₉₆₀ UCS, CIE₁₉₇₆ LUV 近似均勻色彩空間

CIE₁₉₆₀ UCS，CIE₁₉₇₆ LUV 及 CIE₁₉₇₆ LAB 的發展過程百家爭鳴。首先裘得(Deane B. Judd, 1900~1972)，在 1935 利用投影轉換企圖在色度色標圖上達成比較均勻的色度等距，其目的是為了標示工業應用上的容許色彩誤差(Judd and Wyszecki, 1975)。在大約稍晚的同時，總共約有十組以上的均勻色彩體系被提出。CIE 委員會在 1960 採用了麥克亞當的色彩空間，當作 CIE₁₉₆₀ UCS 的標準。原因是他的轉換係數為整數，比較容易運算。後來許多學者認為 1960 UCS 色度坐標圖的用途只限於色度而已，然而大多數的色彩容許誤差還牽涉到明度的容許誤差，因此必須將二維的色度圖擴展到三維的色彩空間。雖然色彩空間轉換的研究非常的多，但是 CIE 委員會直到 1976 年才正式將 CIE₁₉₇₆ LUV 和 CIE₁₉₇₆ LAB 採用為標準(圖十四)。這兩個系統都提供色彩差異公式(color-difference equations)，其 ΔE^*_{Lab} 及 ΔE^*_{Luv} 的差異值所代表的是在直角坐標色彩空間中兩個色彩之間的直線距離。

曼塞爾色彩空間是以上這些色彩系統發展上的比較標準。例如 CIE₁₉₇₆ LUV 與 CIE₁₉₇₆ LAB 明度維度 L^* (lightness dimension, L^*)是亮度指數(luminance factor)的立方根，就是以曼塞爾明度(Value)作為參考標準定訂的。而在同明度的色度圖，將數學轉換的結果重疊在曼塞爾的色相—彩度圖比對，逐漸的修正其轉換系數。

OSA 近似均勻色彩空間

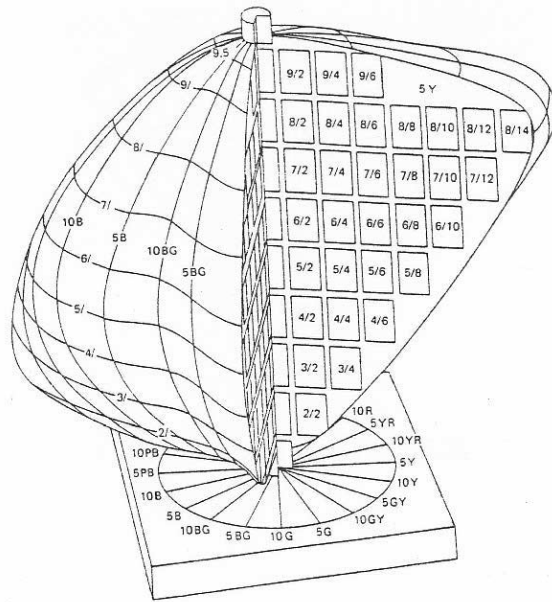
OSA 近似均勻色彩空間的目的是重新建立一套尤拉坐標的均勻色彩空間。由於曼塞爾色彩體系的維度為色相、明度和彩度，這三個維度無可避免的導致柱狀的色彩空間，而柱狀的色彩空間會產生視覺等距的壓縮與膨脹，也因此會使得色彩差異—亦即空間上兩個色彩間的距離—無法正確的代表“恰可分辨色彩差異”的倍數。因此雖然 OSA 近似均勻色彩空間的目的是要達成像曼塞爾色彩體系的視覺等距，但並非修改曼塞爾體系，而是重新制定一個新的“尤拉坐標曼塞爾色彩體系”。

OSA 近似均勻色彩空間的發展過程分成三個階段—決定色彩空間的排列形式，檢驗色彩差異公式，以及製作實際色彩樣本。OSA 色彩空間採用正十四面體菱形晶格(rhombohedral lattice)的排列—簡單的比喻就是把許多球以最緊密的方式結合在一起，其球心所形成的立體網格，網格上的每一個都被 12 個色彩所包圍(圖十五)。檢驗色差異公式是以 OSA 菱形網格的色彩標示的 jnd 倍來評估

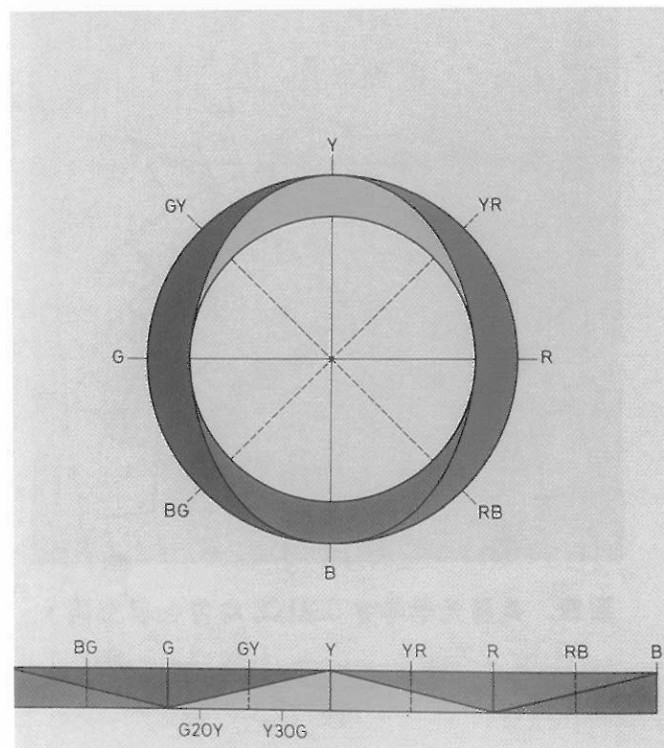
各種 CIE 色彩差異公式的吻合程度。最後 OSA 委員會根據前面二階段的研究結果製作了一個 550 個色彩樣本的色彩立體— OSA 近似均勻的色彩空間。

Reference

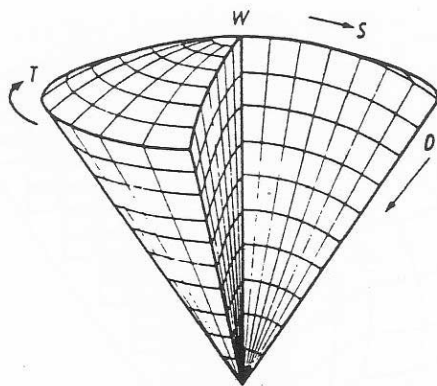
1. MacAdams, D.L. (1970), "Sources of Color Science," Cambridge, MA: MIT Press.
2. Judd, E.B and G. Wyszecki, "Color in Business, Science and Industry," New York NY: John Wiley & Sons.
3. Gouras, P. "The History of Color Vision in The Perception of Color," Ed. P. Gouras. Boston MA: CRC Press.
4. Derefeldt. G. "The Appearance Systems in The Perception of Color," Ed. P. Gouras. Boston MA: CRC Press.
5. Richter, M. "The Development of Color Metrics. Color research and application," Vol. 9. No. 2. Summer 1984.



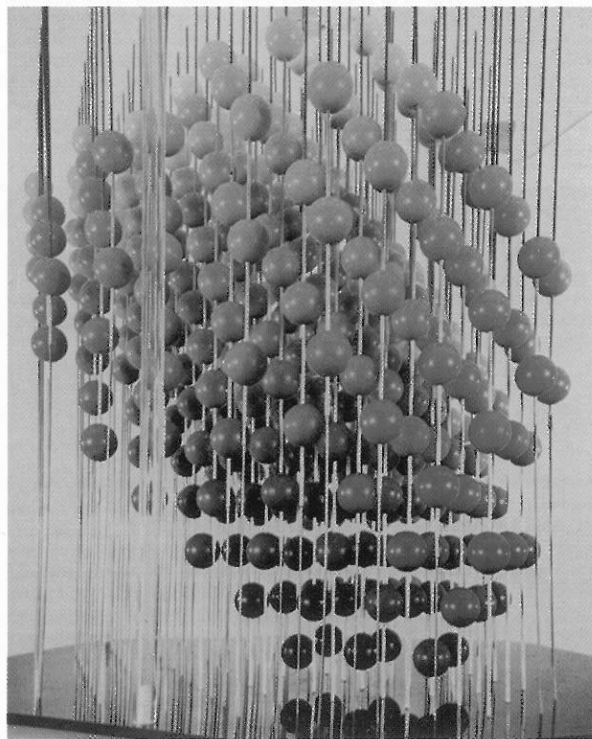
圖一. 曼塞爾色彩體系。



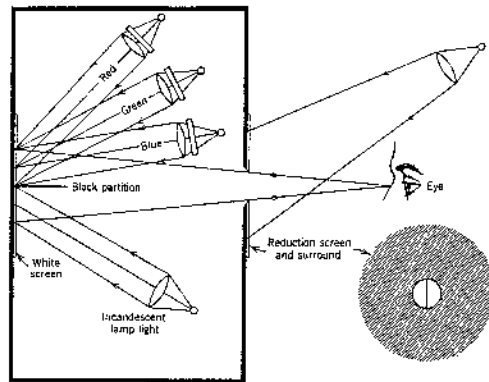
圖二. 自然色彩體系。



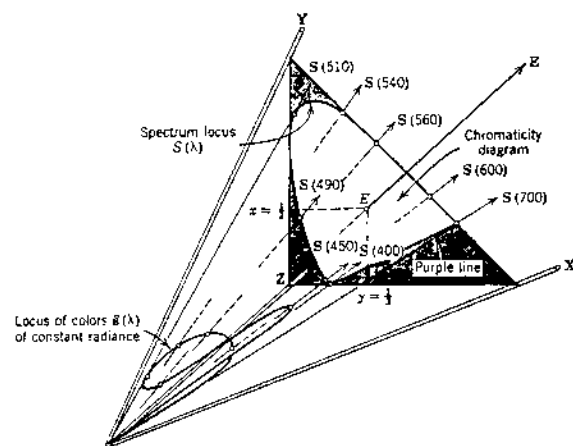
圖三. 德國的 DIN 色彩體系。



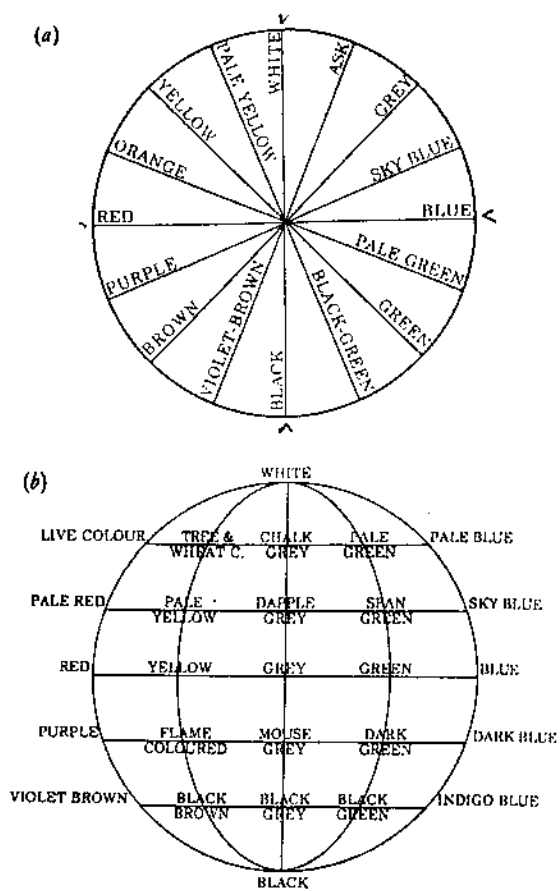
圖四. 美國光學學會 OSAUCS 均勻色彩空間。



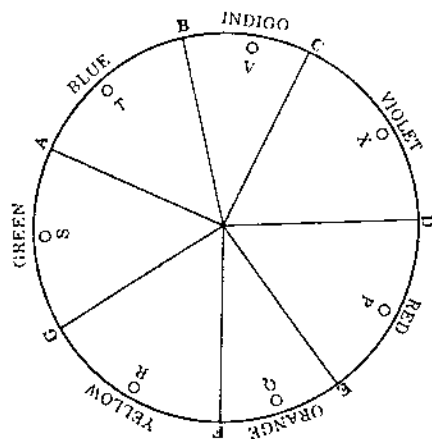
圖五. 色光混合匹配實驗的概念圖。



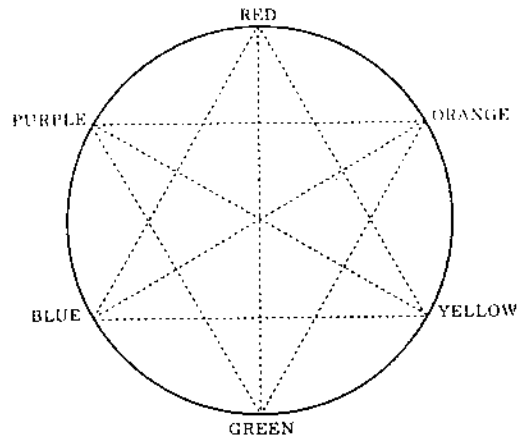
圖六. CIE₁₉₃₁ 色彩空間與 CIE₁₉₃₁ 色度圖。



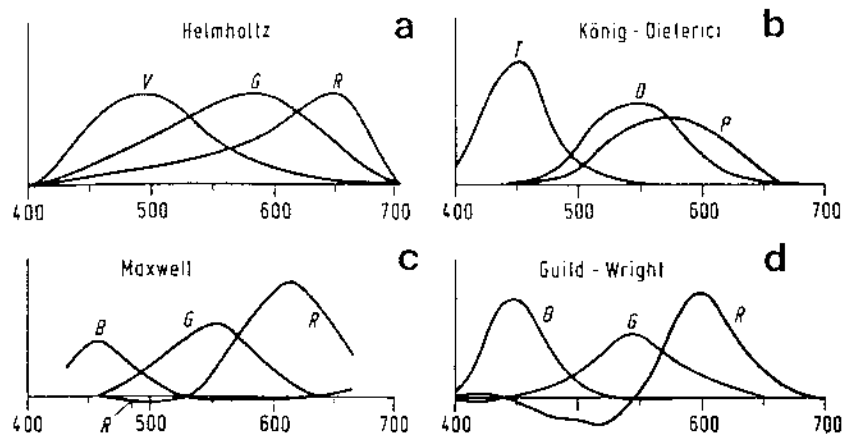
圖七. 霍西斯的色環和球狀色彩體系。



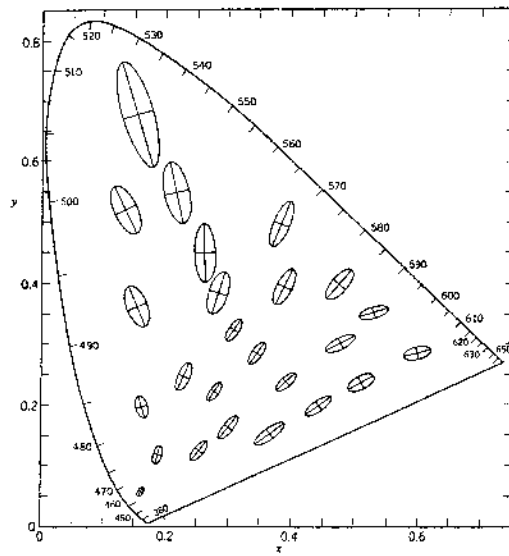
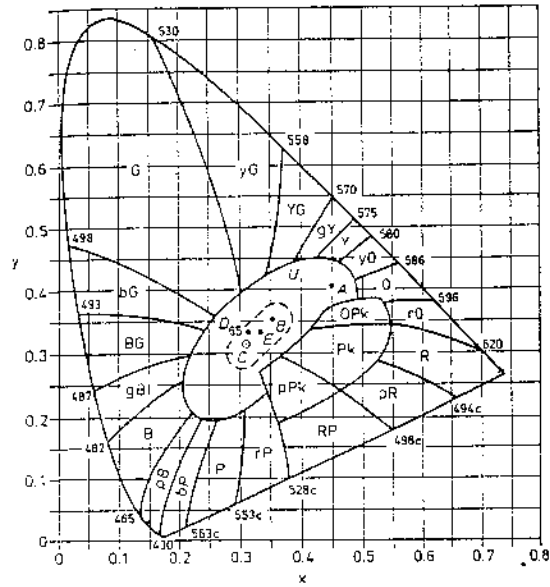
圖八. 牛頓色環。



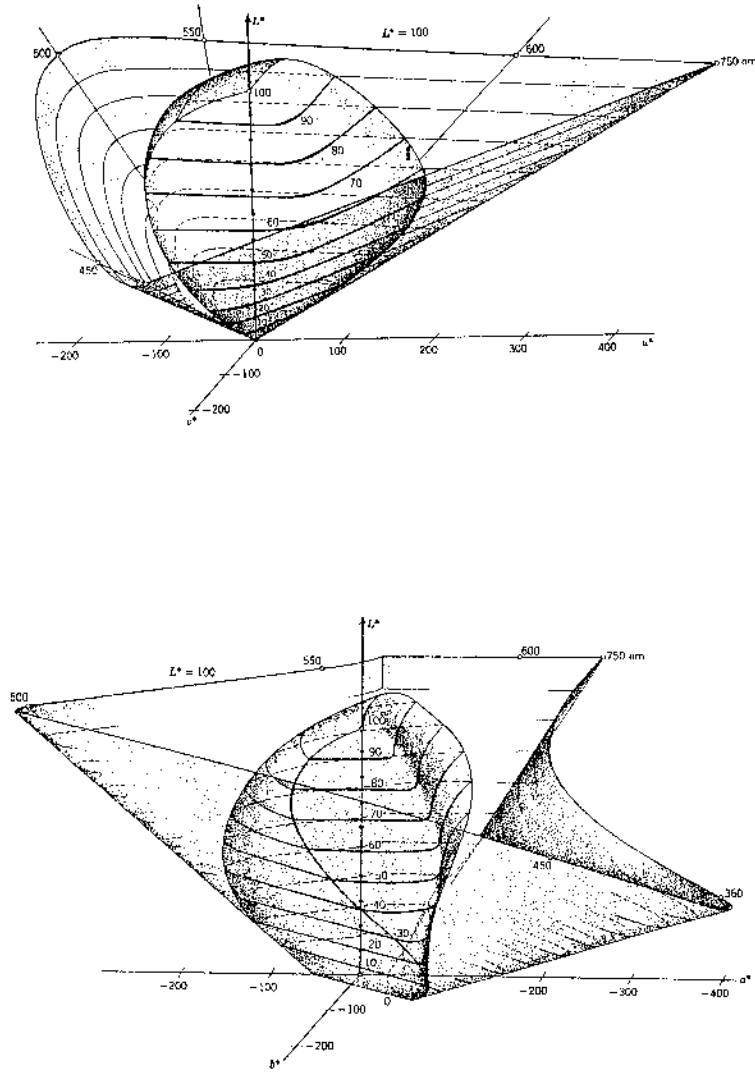
圖九. 哥德的色環。



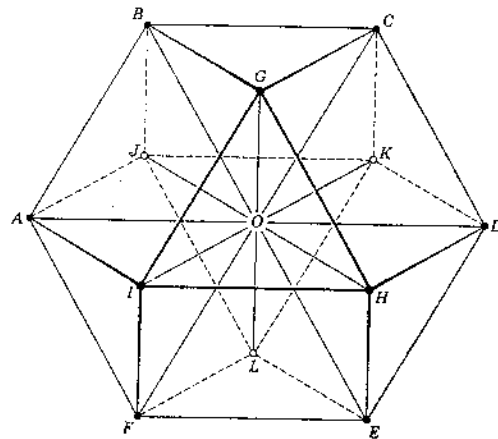
圖十. 赫姆赫茲, 馬克斯威爾, 柯尼爾以及 CIE₁₉₃₁ 色光混合匹配函數曲線。



圖十三. CIE₁₉₃₁ 色彩度量系統的(a)色彩度量與人們直觀色彩感覺屬性沒有關聯性(b)且其
 視覺等距有嚴重扭曲的現象—麥克亞當橢圓。



圖十四. CIE₁₉₇₆ LUV 與 CIE₁₉₇₆ LAB 色彩體系。



圖十五. 美國光學學會 OSAUCS 均勻色彩空間。