



國立臺北科技大學

光電工程學系

專題論文

隱形眼鏡設計理念及研究



專題生：劉奎均

指導教授：林世穆 光學博士

中華民國 103 年 6 月

國立臺北科技大學 專 題 論 文
光 電 工 程 學 系 編 號：100650453

隱形眼鏡設計理念及研究



專 題 生：劉奎均





國立臺北科技大學

光電工程學系

專題論文

隱形眼鏡設計理念及研究



專題生：劉奎均

指導教授：林世穆 光學博士

中華民國 103 年 6 月

摘 要

論文名稱：隱形眼鏡設計理念及研究

校所別：國立台北科技大學光電工程學系

專題生：劉奎均

指導教授：林世穆 博士

眼球是人類最敏感的器官，為避免因屈光異常對我們感官的影響，我們建立了一組系統，用來模擬人眼屈光的異常並使用隱形眼鏡矯正的方式使其恢復屈光正常的情形。

本專題旨在探討隱形眼鏡設計理念及研究，從一開始介紹眼睛的各個細微結構參數到隱形眼鏡結構材質及設計模擬。研究方法利用 OSLO 光學設計程式模擬整個光學系統及使用 Tracepro 光學設計程式進行 3D 的光線追跡直觀的以圖像呈現像散的情形

隨著技術的進步以及人類注意外在的天性，隱形眼鏡已成為了演藝人員必備的裝飾。並因為其設計即製造困難，隱形眼鏡產業也成為了高獲利的熱門產業，也成為了現今熱門的研究。

誌 謝

很高興能順利完成這份專題，除了我一個人的努力，也有許許多多的人在這兩學期來提供的幫助與支持。

首先感謝指導教授林世穆光學博士引領我進入光學的領域，並在研究方法上給予細心的指導，使我學會使用各種的光學軟體及了解光學的基本概念，並建立良好的光學基礎；也謝謝家人在生活上的照顧及支持，讓我可以專心於學業。

另外我也要感謝研究室裡的花頌揚學長，在我不會的知識上提供建議及教導，並時常在晚上留下來與我研究光學系統的模擬。還有同實驗室的專題生們彼此間的討論及互相的鼓勵也讓我受益良多。

在此由衷的感謝大家，祝大家有美好的未來。

目錄

摘要.....	I
誌謝.....	II
目錄.....	III
一、 緒論.....	1
二、 眼睛的生理結構.....	2
三、 隱形眼鏡的基本介紹.....	9
四、 散光隱形眼鏡的基本結構.....	13
五、 光學系統模擬.....	15
六、 散光眼鏡產品實物設計.....	36
七、 結論.....	39
八、 參考資料.....	40

一、緒論

1.1 引言

人體，是一個神奇的生物組織，可以有著各種感官。如物體的形狀、顏色、聲音、溫度、味道…等等，而這些感覺分別為視覺、嗅覺、聽覺、觸覺和味覺，即大家所稱之為的五感。而這些感覺又各自對應於專屬的感受器，分別是眼、鼻、耳、皮膚和舌，其中最重要的就是眼睛，人假使看不見行動就有如瞎子摸象般。眼睛，是人類的靈魂之窗。然而由於電腦 3C 與電視娛樂產業的發達，以至於過多的學童太早使用眼睛，因此產生一連串視力不良的問題，這不僅僅是國家，更是世界性的問題。上述視力不良的症狀簡單來說就是像差的產生，光線打向遠方的物體，其反射光經過角膜、房水、晶狀體以及玻璃體的折射，準確地落在視網膜上，眼睛所得到的資訊便是清楚的影像。但是如果這些構造的匹配出現了問題或是存在既有的缺陷，成像時就會有像差的產生，眼睛所得到的資訊便是模糊的影像。

1.2 研究動機

眼睛如果存在像差的話，便會影響成像品質，這些惱人的像差包括了球差、慧差、場曲、像散和畸變。雖然部分的像差目前已經可以透過配戴眼鏡的方式給予矯正，如近視(Myopia)、遠視(Hyperopia)、散光(Astigmatism).. 等等。然而更高階的像差如球差 (spherical aberration) 、慧差 (coma) 等等，可能就必須進行屈光手術來予以修正，不單單只是配戴眼鏡能解決的。

然而現今的社會中眼鏡已經不單純只為了改善視力，隨著技術的進步以及人類注意外在的天性。逐漸開始發展了隱形眼鏡的技術。然而隱形眼鏡因為直接接觸在角膜上，使得整體的設計與一般的眼鏡截然不同。引此利用 OSLO 進行隱形眼鏡的光學模擬，及 Tracepro 進行特殊隱形眼鏡的 3D 立體模型，製作出工程圖使理論與商品予以結合。

二、眼睛的生理結構

2.1 眼球生理學

眼球本身就是一個精密的光學系統。每一層介質都有著不同的折射率以及曲率半徑，同時也都具有不同的作用。光線經角膜、前房、水晶體、玻璃體折射後抵達視網膜成像。由於物體的反射光，包括了物體本身的顏色、形狀，在眼球接收到後，傳遞至腦部，如果沒有光線的照明，眼球就接收不到資訊。所以，眼球是一個光的感受器。正常人的眼球構造，如圖 2.1 所示

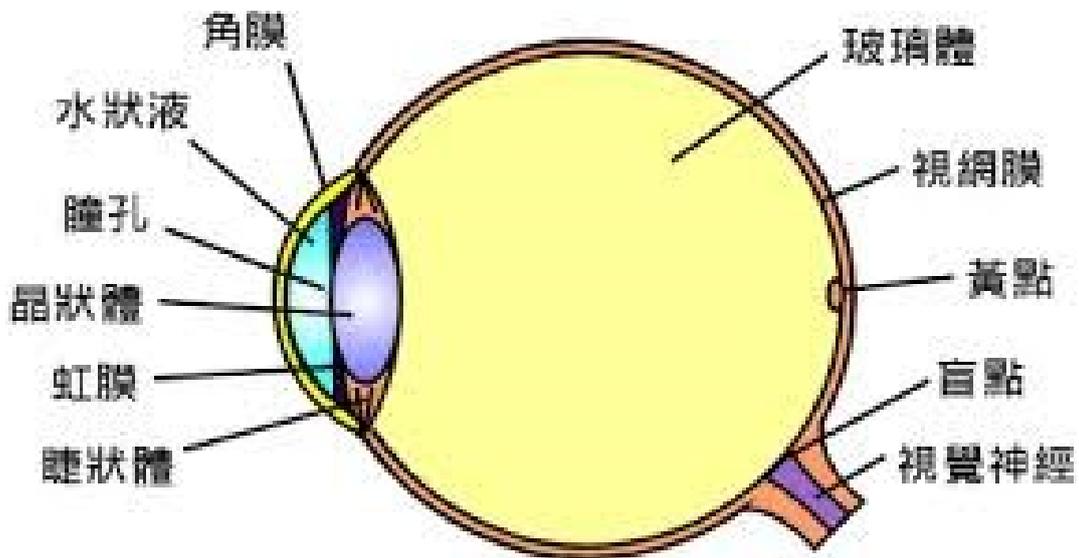


圖 2.1 正常人的眼球構造

2.1.1 瞳孔(pupil)

正常人瞳孔直徑平均為 4.5 mm，瞳孔直徑大小會受到下述幾個因素而變化其大小：

(1)光線明亮度：

瞳孔直徑大小與光線明亮度成反比，瞳孔在暗室可放大到 8 mm，而在最亮時可縮小到 1~2mm。當瞳孔受到光線刺激時，它縮小的反應速度很快，但相反的由亮到暗，它放大的反應速度就很慢，有時甚至要幾分鐘才能完成。

(2)年紀的關係：

瞳孔直徑隨著年紀增長而變小，而感光也較遲鈍。

(3)受藥物而改變：

散瞳劑會使瞳孔放大，反之；縮瞳劑會使瞳孔縮小。

2.1.2 角膜(cornea)

角膜(Cornea)，位於眼球前表面六分之一，有保護眼球內容物的作用，同時具有 43.0D 屈光度，在眼球中具有最大的曲光作用，佔整個眼球光線折射的 70%，為一透明無血管分布之組織，平均直徑約為 11.0 mm ~ 11.5 mm；折射率約 1.377，前表面屈光度為 48.8D，後表面屈光度為-5.8D；前表面曲率半徑為 7.8mm，後表面曲率半徑為 6.8mm，中央厚度為 0.52 mm，且年紀愈大，角膜愈厚，愈平。可將之視為一凹透鏡，假若角膜各方向曲率不一，將會造成散光。

2.1.3 水晶體(lens)

水晶體(Lens)，無血管，富有彈性，位於虹膜之後，玻璃體之前，為一具有雙凸透鏡形狀之透明體，由晶狀體懸韌帶與睫狀體聯系。藉由睫狀肌帶動可以使其厚度增加或減少，使影像得以聚焦於視網膜上，折射率約 1.4085，前表面曲率半徑 10 mm，後表面曲率半徑 6 mm；晶狀體直徑為 9~10mm，厚度約 4~5 mm。它是眼球屈光間質的重要組成部分，屈光指數為 1.41。前表面的屈光力約為 +7.52D，後面為 +12.08D，總屈光力為 19.11D。其營養來自房水。主要功能為屈光功能、調節功能及可濾除部分紫外線，保護視網膜。

2.1.4 虹膜(Iris)

虹膜(Iris)，位於角膜和水晶體間，上有兩種排列方向不同的平滑肌，可調整瞳孔(Pupil)大小以控制進入眼睛的光量。

2.1.5 玻璃體(Vitreous humor)

玻璃體(Vitreous humor)，為無色透明的膠質體(gel-like)，充滿於玻璃體腔內。主要成分為水，佔 99%。玻璃體充滿眼球後 4/5 的空腔內。折射率 1.336。無血管，代謝緩慢，不能再生，其營養來自於脈絡膜和房水。主要功能為對視網膜和眼球壁起支持作用。

2.1.6 視網膜(Retina)

視網膜(Retina)，位於眼球壁之內層，除血管外，基本上是透明的，由無數的細胞，色素層及神經纖維層組成。視網膜最後一層為光感受細胞，分別為錐狀細胞(cones)及桿狀細胞(rods)，錐狀細胞約 500 萬個，幾乎分布在眼球中心窩，掌管色彩視覺，具 3 種不同感光色素，分別對紅、藍、綠感應。由圖 2.2 白色線可知，紅色錐細胞感應 475nm 至 700nm 波長的紅色光譜，而在 564nm 左右波長感應最強，吸收最多紅色光；綠色錐細胞感應 435nm 至 635nm 波長之綠色光，而以 534nm 左右波長感光最強；藍色錐細胞對 400nm 至 550nm 波長的藍色光感應最強，而以 420nm 左右波長感應最強；桿狀細胞約 10 億個，為圖 2.2 中黑線部分，掌管眼球的暗視視覺。

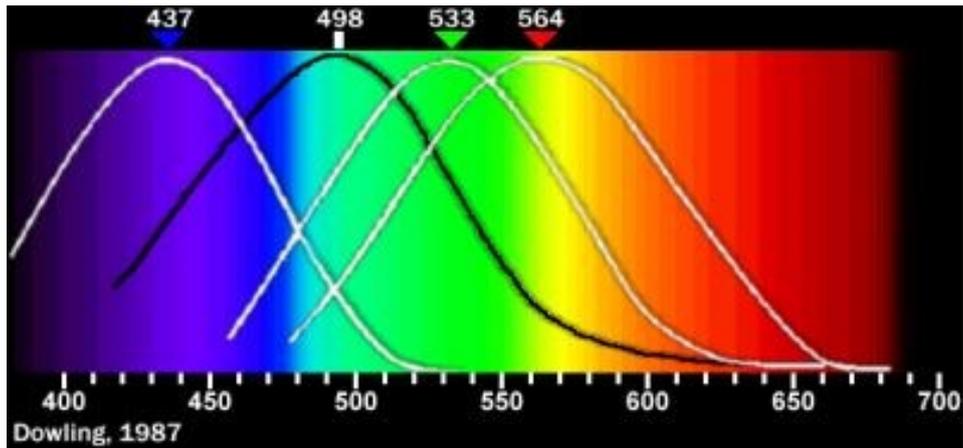


圖 2.2 錐狀及桿狀吸收光譜

2.2 人眼數值模型

人類歷史上最早上的人眼模型是由高斯的學生 Listing 在 1851 年提出的近軸眼模型。Listing 假定眼球有一凸出的表面介於空氣和眼內液兩個介質之間，眼內液的折射率 and 水的折射率相當。後來被進一步簡化為單個折射球面的簡單眼，眼內充滿折射率為 1.33 的均勻介質。

而現今最廣泛流傳的是由 Allvar Gullstrand 所提出的眼睛模型，Allvar Gullstrand 是一位二十世紀初瑞典眼科專家。1903 年時，他對眼睛成像的解剖學結構進行了精細研究，因而提出 Gullstrand 眼睛模型。如表 2.1 上他將眼球分成 5 個部位並研究出各個部位的折射率、厚度、曲率半徑等等。從表一可知眼睛的屈光力主要來至角膜及水晶體。由於他在眼屈光學等領域的巨大貢獻，也使得他獲得了 1911 年度諾貝爾生理學與醫學獎。

表 2.1 Gullstrand 眼睛模型參數

部位	項目	數值
角膜	曲率半徑	7.8mm(前角膜面)
		6.8mm(後角膜面)
	折射率	1.376
	直徑	直徑 11~12
	厚度	0.8
水晶體	曲率半徑	10.1(晶體前面)
		-6.1(晶體後面)
	折射率	1.42
	直徑	9mm
	厚度	4mm
前室	深徑	3mm
	折射率	1.336
玻璃體(後室)	深徑	17.2mm
	折射率	1.336
視網膜	曲率半徑	12.5

2.3 眼球屈光異常

眼球的屈光系統和感光系統，有如照相機的底片與鏡頭。角膜、前室、玻璃體構成屈光系統，而視網膜構成感光系統。眼睛要看清楚物體，則物所發出或反射的光需恰好聚焦在視網膜上。若能恰好能聚焦在視網膜上，物體的像便很清晰。若眼睛的屈光力及眼球前後軸長度批配，使平行光恰好聚焦在視網膜上，我們稱此眼為正視眼(圖 2.3 A)，即屈光正常；若眼睛的屈光力及眼球前後軸長度無法

批配，使平行光無法聚焦於視網膜上，無論在視網膜前方或後方，我們都將其稱為非正視眼，即屈光異常。非正視眼包含近視眼(圖 2.3 B)、遠視眼(圖 2.3 C)、散光又稱亂視眼(圖 2.3 D)。

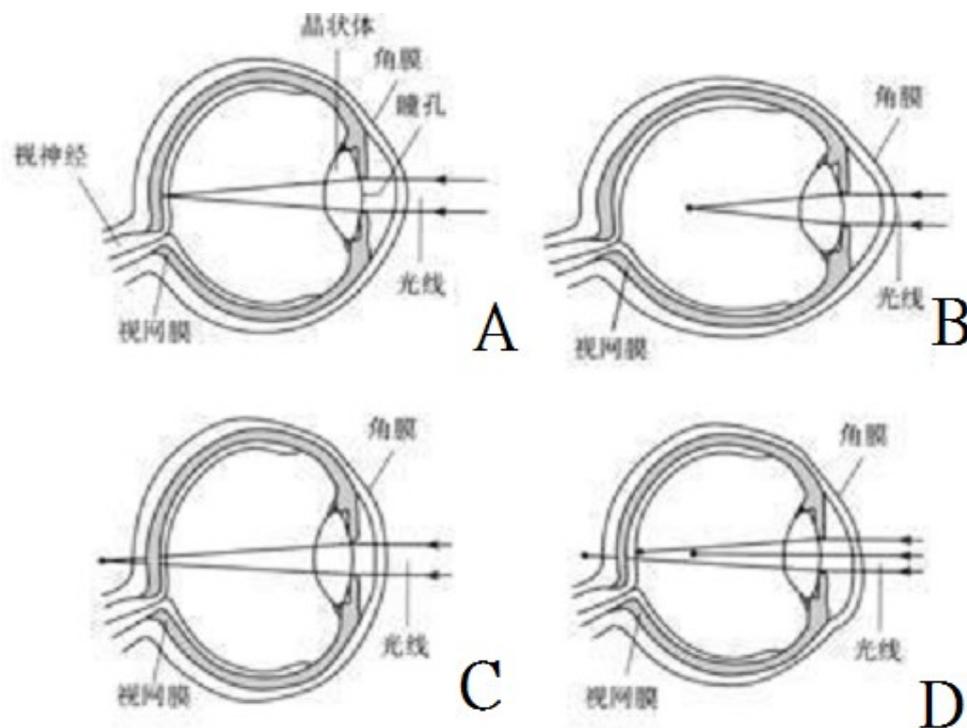


圖 2.3 正視眼及非正視眼示意圖

(1) 近視眼：

近視眼主要成因有下列幾種。眼軸過長，稱為軸性近視眼(Axial Myopia)；眼球屈光系統過強稱為折射性近視眼(Refractive Myopia)；眼球屈光系統介質折射率改變，稱為折射率性近視眼(Index Myopia)。一般認為是因為遺傳或環境因素所引起的。

(2) 遠視眼：

遠視眼主要成因有下列幾種。眼軸過短、眼球屈光系統過弱、眼球發育不良。遠視眼看近物須運用大量調節力，因此看近物常伴隨頭痛，眼睛痠痛等等，因盡可能矯正充分避免視力疲勞。

(3) 散光

散光主要是只眼球屈光系統個經線的屈光能力不同造成平行光入眼睛後無法在視網膜成單一焦點。可以看到圖 2.4 在 Y 方向的屈光能力較強，X 方向的屈光能力較弱造成 Y 放像焦點較為前面，而兩焦點之間的距離稱為焦格，焦格長短與散光度數成正比。若能加上透鏡使焦隔為零並落在視網膜上則為散光的光學矯正。

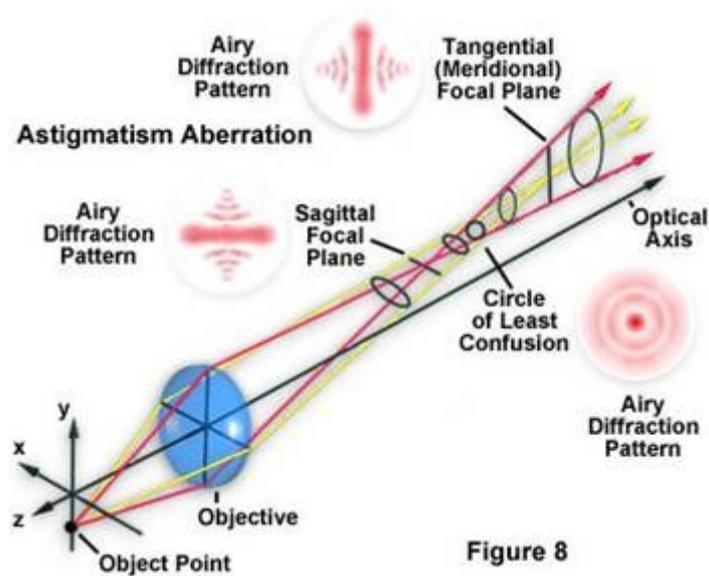


圖 2.4 散光的異常屈光

三、隱形眼鏡的基本介紹

3.1 隱形眼鏡起源

隱形眼鏡的發展是在最近一百多年興起，但早在西元 1508 年，達文西就已經提出把眼鏡直接待在眼球上的想法。西元 1887 年，一位技巧熟練的玻璃製造技師-繆勒，幫罹一位患換復發性角膜潰爛的病人製造玻璃殼，即眼角膜隱形眼鏡，這是歷史上第一個硬式隱形眼鏡。也使隱形眼鏡正式進入發展期。

3.2 隱形眼鏡依功能及用途分類

自第一副硬式隱形眼鏡問世以來，便開啟了隱形眼鏡(Contact Lenses)多姿多彩的新時代，其主要功能與傳統眼鏡相同為視力矯正，包括：近視、遠視、散光、老花、像差等。隨著醫學與視光學等科技發展，各種功能的隱形眼鏡也不斷推陳出新，隱形眼鏡依其功能及用途可區分為：

1. 屈光異常之矯正或輔助老花眼用的隱形眼鏡

眼球之屈光異常，包括常見之近視眼、亂視眼、遠視眼等，其光學矯正用的隱形眼鏡，包括球面鏡片、散光片、雙光鏡片及漸進多焦點鏡片等。

2. 化妝用彩色隱形眼鏡

一般的彩色接觸鏡片被追求時髦及表現個人特色風格的年輕族群拿來作化妝打扮用，稱為化妝用隱形眼鏡。

3. 附加虹彩的隱形眼鏡

先天性無虹膜畸形(aniri-dia)或後天性無虹膜及因外傷引起或虹膜缺損症，其症狀為怕光和視力不良，這種隱形眼鏡可預防頭昏眼花及增加視力。

4. 角膜塑型鏡片(Ortho-K lens)

角膜塑型鏡片是供非侵入性角膜塑型術使用的鏡片，其功用為視力矯正及治療。

5. 繃帶用隱形眼鏡(Bandage lens)

此種鏡片是眼球手術後，作為遮蓋眼角膜外科傷口之保護性醫療用途鏡片。在歐洲常被應用於狗、貓、馬等動物接受角膜切除術後的眼球上。

7. 人工水晶體(Intraocular lens , IOL)

當眼球屈光狀態接近兩隻眼其中的一隻，接受白內障手術，將造成兩眼高度的屈光參差(Aniso-metroia)問題。醫生常在白內障手術中，同時植入人工晶體來替代原來的水晶體的屈光作用；而人工晶體也是一種接觸鏡片。

3.3 隱形眼鏡的材質

3.3.1 理想隱形眼鏡材質

理想的隱形眼鏡材質必須具備某些特性，讓隱形眼鏡在配戴時能發揮它的光學矯正功效，並且對戴鏡者安全又舒適，其理想材質特性包括：a. 比重小使配戴時輕鬆舒適。b. 熱傳導性良好才不致過熱而引發不舒適。c. 親水性愈好，眼球的淚液更換愈佳，而角膜的氧氣供應就更理想。d. 吸水後的變形可能性愈低愈理想。e. 隱形眼鏡的主要功能是眼球屈光偏差的光學矯正，故透光性愈好的材料愈好。f. 折射率愈大，鏡片的厚度愈厚。g. 機械性的強度：隱形眼鏡材料的機械性強度要夠，才有良好的抗扯力。h. 透氣性：隱形眼鏡材質對氧和二氧化碳等氣體的透過性，即透氣性。透氣性愈大對眼角膜的生理健康愈理想。而理想的隱形眼鏡材質應具備化學穩定性，不會和各種藥劑、溶媒、菌類發生化學變化，而且淚液成份和藥物引起的污染很少，又易於洗滌乾淨。因隱形眼鏡被戴在人體重要的視覺器官上，故其材料應具備絕對的安全健康性。安全健康性包括材質對人體的無毒性(non-toxic)和相容性(compatibility)及材質本身的無活性(inertness)(註

不易與其他物質起化學作用)和抑菌性。此外，其溶出物愈少愈佳，並且可適應各種隱形眼鏡藥水或清潔保養方式。最後是理想的隱形眼鏡材料應是價格低廉，容易加工和生產的材料，且鏡片容易被消費者操作處理，包括裝戴、卸下和容易清洗保養。

3.3.2 目前隱形眼鏡的材質

依透氣性分為傳統硬式隱形眼鏡和高透氧硬式隱形眼鏡，傳統硬式的材質為 PMMA，是由甲基丙烯酸甲基酯聚合而成。折射率 1.49。高透氧硬式隱形眼鏡是在 PMMA 中加入了氟膠或矽膠，可以使硬式透氣性增加。材料種類分為：醋酸丁酸纖維素 (cellulose acetate butyrate, CAB)：矽氧烷甲基丙烯酸酯 (siloxanyl methacrylate copolymers, SiMA)：氟矽丙烯酸酯 (fluorosilicone acrylates, FSA)：氟多聚體 (fluoropolymers)。表 3.1 列出加了矽膠的壓克力材質。

表 3.1 矽膠的壓克力材質數值

材質	折射率	製造商	透氧性	濕潤角	比重
amsilfocon	1.475	Rand Scientific	45	17.0°	1.077
itafocon A	1.471	Polymer Technology Corporation	12	20.0°	1.13
itafocon B	1.469		19	17.0°	1.10
kolfocon A	1.467	Paragon Vision Sciences	14	25°	1.13
kolfocon A	1.469	Lagado Corporation	18	<25°	1.126
kolfocon B	1.467		32	<25°	1.101
pasifocon A	1.473	Paragon Vision Sciences	16	23.1°	1.12
pasifocon C	1.467		50	26.0°	1.07
silafacon A	1.479	Ciba Vision Corporation	12	19.0°	1.13
sterafocon A	1.47	Optical Polymer Research	31	<25°	1.086
telefocon A	1.471	Permeable Technologies	22	31.0°	1.126
telefocon B	1.471		43.5	31.0°	1.126

3.4 隱形眼鏡的結構與名稱

隱形眼鏡，作為如普通眼鏡一樣的矯正視力用的光學器具，卻比一般眼鏡由鏡架、鏡片組合成的結構單純。正因組合間單隱形眼鏡的良窳，除了取決於材質及製造方法外，可說是隱形眼鏡的結構設計取決大部分。換言之，隱形眼鏡的鏡片設計和結構，對於整體隱形眼鏡的光學矯正性及舒適度極為重要。以下介紹為隱形眼鏡各部分結構及相關名稱或專業術語。

3.4.1 前弧(Front Curve)

前弧視鏡片的前表面的曲線，在一般隱形眼鏡設計上前弧的曲率半徑為主要影響進片度數原因。

3.4.2 基弧(Base curve)

基弧為鏡片後方中央部分的弧度，又稱中央弧(The central Posterior Curve，CPC)，或稱主基弧(The Primary Base Curve)。在一般狀況下無特殊需求時，基弧曲率會與角膜前表面曲率半徑一致。基弧有兩種不同的量度表示：

- (1) 曲率半徑(radius of curvature, r)單位為 mm
- (2) 屈光力(power)，單位為焦度(Diopters, D)

3.4.3 光學區(Optic Zone)

光學區，指的是鏡片的光學部分，含有矯正屈光力(The Refractive Power)，位在鏡片的中心區，在此區為視覺影像品質良好且為主要的光學結構設計部分。

3.4.4 鏡片直徑(Lense Diameter)

隱形眼鏡的鏡片直徑，即隱形眼鏡的尺寸大小，又稱弦直徑(Chord Diameter)是鏡片邊緣到相對邊緣的寬度。

3.4.5 中心厚度(The Central Thickness)

隱形眼鏡的中心厚度，係指鏡片在光學區中心的厚度，有就試鏡片幾盒中心觸的前表面與後表面的的距離。隱形眼鏡的中心厚度與鏡片的正負度數有關。在負鏡片時，度數越高則中心厚度越薄；正鏡片，則反之度數越高則中心厚度越厚。

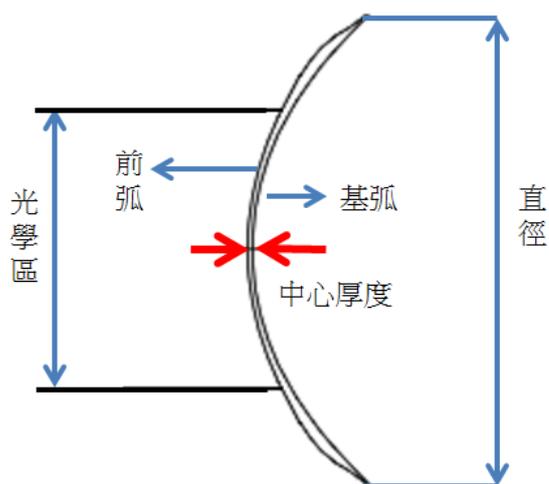


圖 3.1 隱形眼鏡結構與名稱示意圖

四、散光隱形眼鏡的基本結構

4.1 散光隱形眼鏡的基本結構

規則性散光可以使用隱形眼鏡或一般眼鏡進行矯正。一般矯正視力我們常用球面鏡片，而矯正閃光鏡片時最簡單的就是使用柱狀鏡。柱狀鏡是它住面各經線方向的弧度曲線的曲率半鏡是不同的，而球面則相同。散光鏡片的最短和最長曲率半徑的兩個經線我們稱為主經線，彼此相差 90° 。

散光鏡片的結構設計基本可分為下列幾種：

(1)前弧球面+基弧柱面(front spherical+back toric)

此型為將鏡片的前弧製作成球面結構，而把基弧製作成柱面結構。稱為背面散光鏡片。背面散光鏡片很適合矯正因角膜非球面所造成的散光，因為角膜前表面能與鏡片厚表面交合良好，有助於鏡片裝用的穩定性。

(2)前弧柱面+基弧柱面球面(front toric +back spherical)

此型為將鏡片的前弧製作成柱面結構，而把基弧製作成球面結構。稱為前面散光鏡片。通常用於因水晶體發生散光的眼睛上。

4.2 散光隱形眼鏡的穩定設計

(1)垂重式鏡片(Ballasted lens)

其橫切面形有一較重底部；當鏡片裝用時，此較重底部自然朝下，鏡片的方向得以固定住。如圖 4.1 從側視圖可以看出鏡片下端明顯較厚，可以提供重量及停止散光鏡片旋轉。

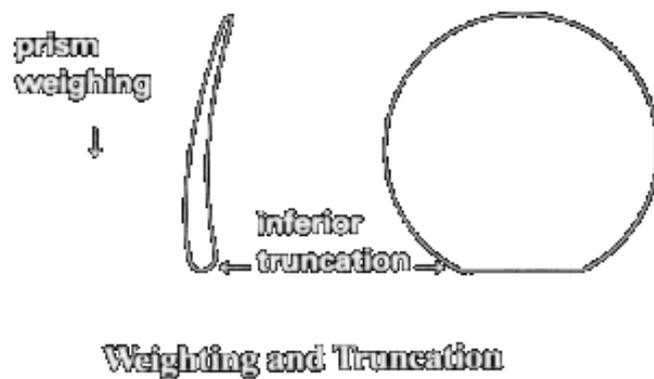
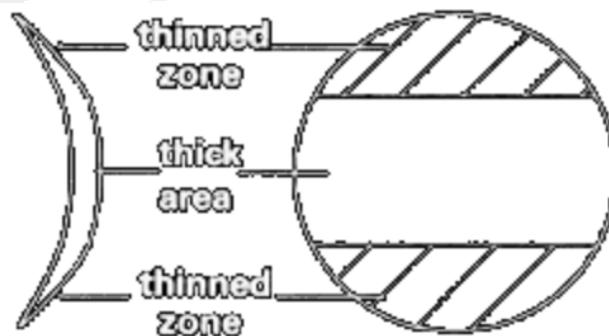


圖 4.1 垂重式鏡片

(2)上下削薄式(Double Slab off)

上下削薄式又稱動態穩定設計(Dynamic Stabilization)是一種把鏡片上下削薄，而由眼睛上下眼瞼擠壓，鏡片較厚的中間部分自然被推到無壓力的眼睛兩側，被消薄的部分自然停留在上下眼瞼。雖然其穩定性不如垂重性但穿戴較為舒適常用於隱形眼鏡的設計上面。



Stabilisation Zones

圖 4.2 上下削薄式散光鏡片結構設計

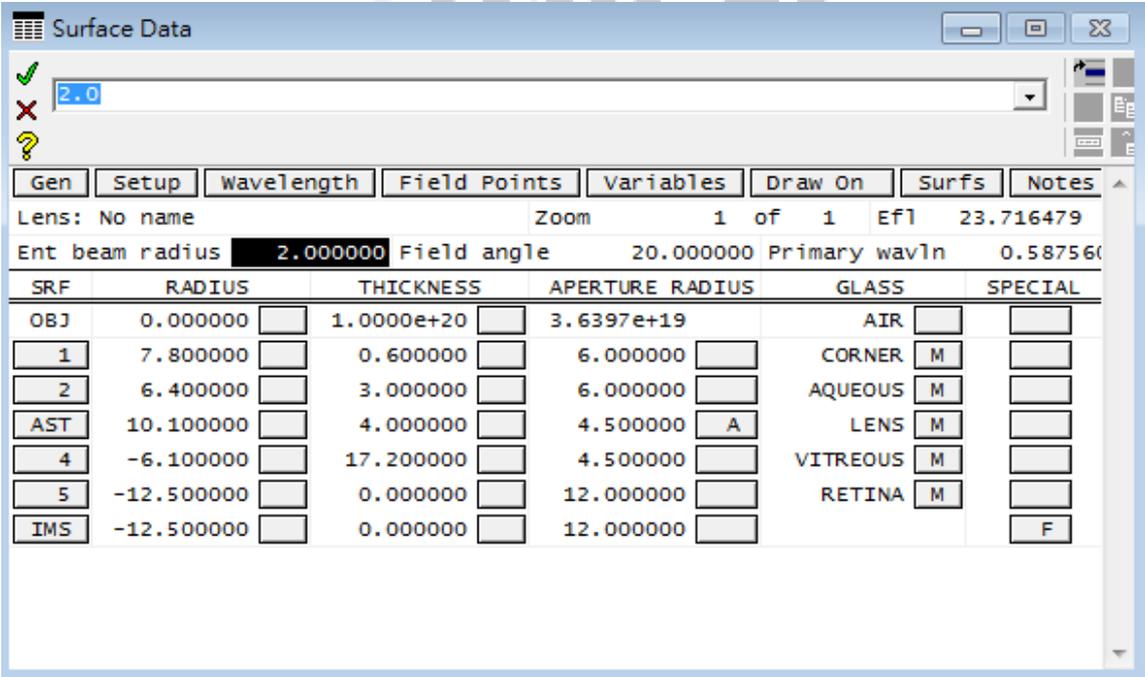
五、光學系統模擬

5.1 眼睛系統模擬

5.1.1 Allvar Gullstrand 模型基本架構

目標:使用 OSLO 製造 Allvar Gullstrand 所提出的眼睛模型。

首先將表 5.1 中的 Allvar Gullstrand 參數建於 OSLO 程式中如圖 5.1 所示。我們將入射光寬度(Ent beam radius)設為 2mm 為人眼一般情況瞳孔直徑的一半。瞳孔在強光時最小孔徑為 1mm；在昏暗環境中最大可到 8mm。在輸入完數據後可利用 Draw on 功能畫出光線追跡圖如圖 5.2。在圖 5.2 中可以看見平行光線並未準確落在最後面的視網膜上，造成有離焦的情況發生。這是由於 Allvar Gullstrand 模型過於簡易的緣故，因此我們需要再進行更進一步的優化。將其焦點正確的調整到視網膜上。



SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0000e+20	3.6397e+19	AIR	
1	7.800000	0.600000	6.000000	CORNER	M
2	6.400000	3.000000	6.000000	AQUEOUS	M
AST	10.100000	4.000000	4.500000	LENS	M
4	-6.100000	17.200000	4.500000	VITREOUS	M
5	-12.500000	0.000000	12.000000	RETINA	M
IMS	-12.500000	0.000000	12.000000		F

圖 5.1 正視眼眼睛模型參數

4.85

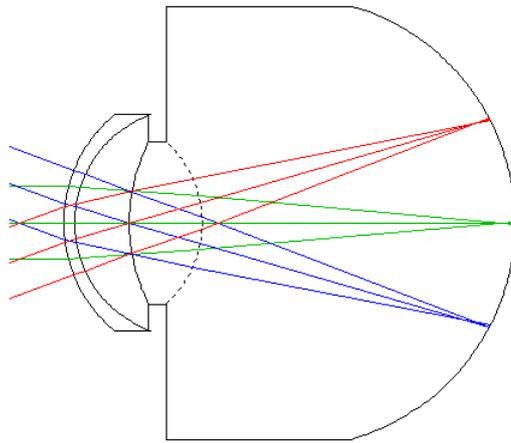


圖 5.2 正視眼眼睛模型參數

表 5.1 眼睛模型參數

部位	項目	數值
角膜	曲率半徑	7.8mm(前角膜面)
		6.8mm(後角膜面)
	折射率	1.376
	直徑	直徑 11~12
	厚度	0.8
水晶體	曲率半徑	10.1(晶體前面)
		-6.1(晶體後面)
	折射率	1.42
	直徑	9mm
	厚度	4mm
前室	深徑	3mm
	折射率	1.336
玻璃體(後室)	深徑	17.2mm
	折射率	1.336
視網膜	曲率半徑	12.5

5.1.2 Allvar Gullstrand 模型優化

在 5.1.1 建立模型時，我們是最簡易的球面來架構眼睛模型事實上並不是每個面都是球面。因此在開始系統優化前我們先將水晶體的後表面輸入它的非球面係數(conic constant)輸入-4.5 使它形成雙曲面，藉由更改曲面行式使模擬更接近現實情況。接著將水晶體的前後表面曲率設為變數(Variable)，使用 OSLO 的 GENII Ray Aberration 對系統進行進一步優化。可以得到圖 5.3 的光線追跡圖，由此圖我們可以清楚的可見平行光入射眼睛後，光線已經能恰好聚焦在視網膜上。因此基本的眼睛模型已經建構完成。

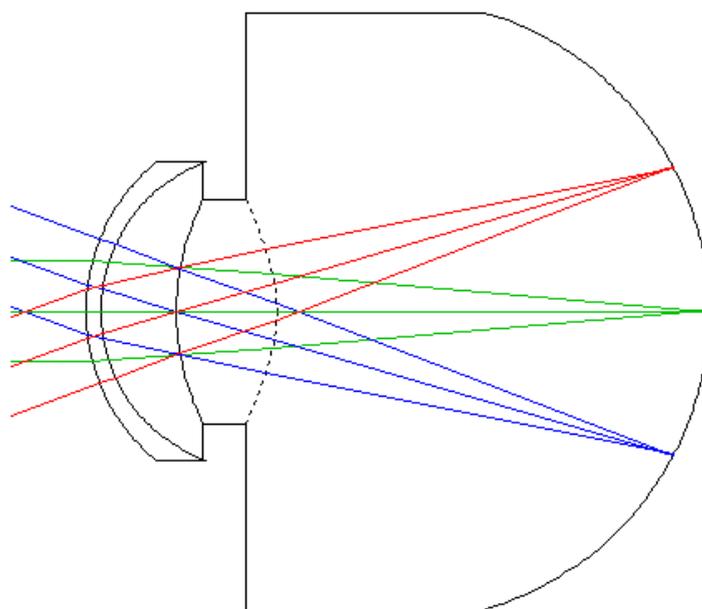


圖 5.3 優化後正視眼模型

5.1.3 眼球模型 3D 模擬

在 5.1.2 中，我們已經模擬好 2D 的眼睛模型，接下來我們可以將眼睛模型利用 TracePro 進行模擬，進而可以做出 3D 的光線追跡圖型。我們使用插入透鏡的方式將先前在 OSLO 做好的數值輸入 TracePro 中來架構角膜、水晶體、前後室。使用球狀挖空的方式來製作視網膜。我們可以得到圖 5.4 的光線追跡圖。圖 5.5 為各個視角的 3D 人眼模型。

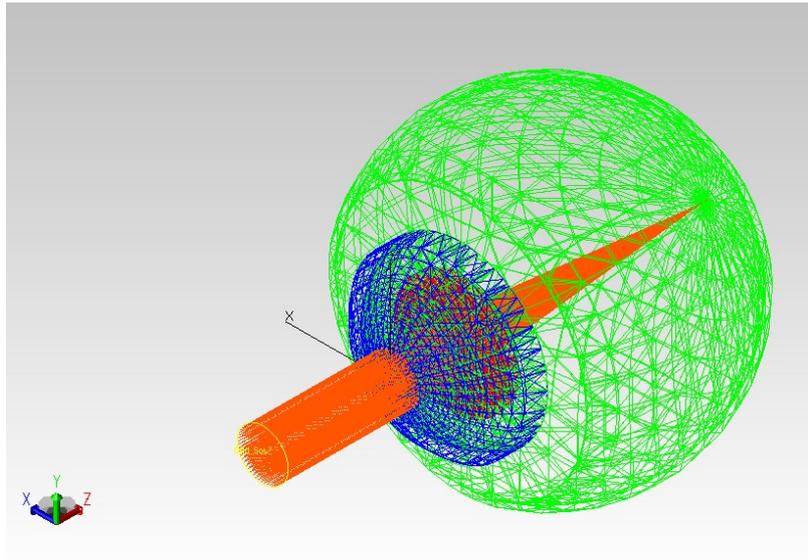


圖 5.4 人眼模型 3D 追跡圖

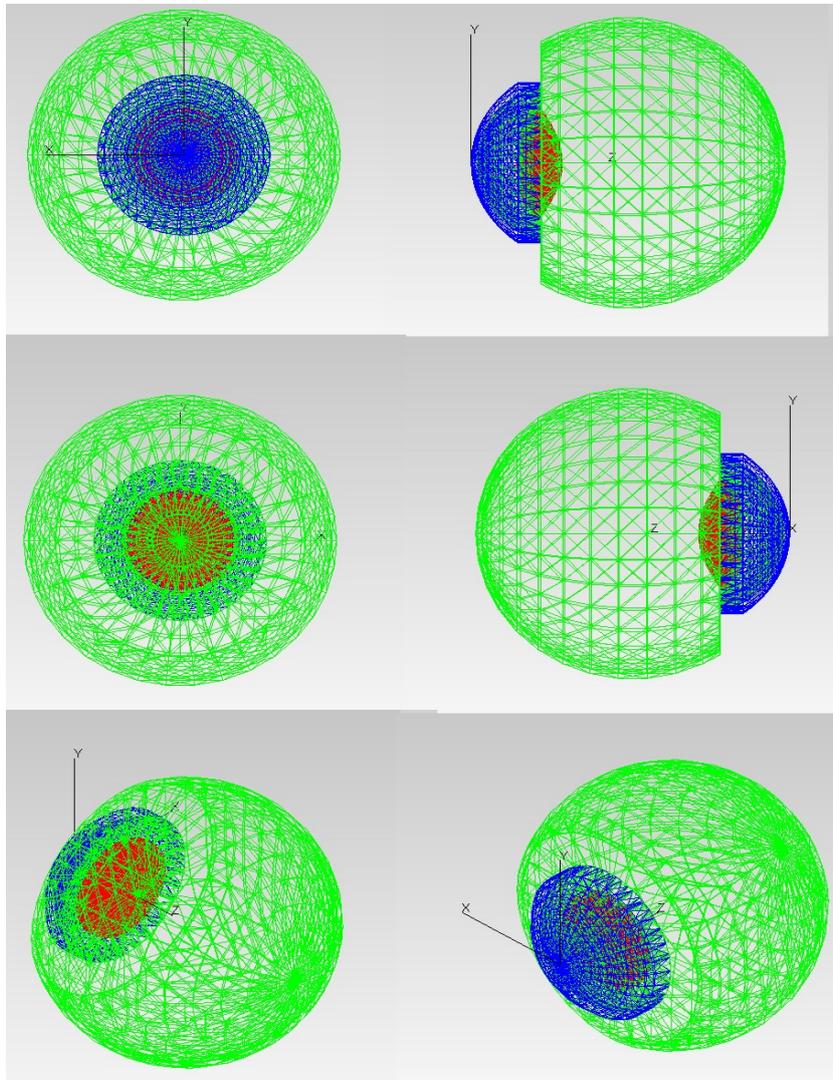


圖 5.5 各視角之人眼模型

5.2 近視之眼睛及隱形眼鏡模擬

5.2.1 近視眼模擬背景

在口語中，我們常用近視 100 度、200 度等來形容眼睛的屈光情形。而在專業上我們常用焦度(D)來表示，轉換方式如公式(5-1)。一般來說近視 100 度指的是在眼睛前方距離 1.2 公分處放入一個焦度負 1D 之透鏡能恰好矯正眼睛的屈光異常。因此在此節我們採用在眼鏡前加入透鏡的方式調整水晶體曲率使其聚焦在視網膜上，再將眼睛前的透鏡刪除來達到模擬近視眼的效果。

$$\text{焦度(D)} * 100 = \text{眼睛度數} \quad (5-1)$$

5.2.2 OSLO 近視眼模擬

在章節 5.1 中我們使用 OSLO 模擬正視眼，因此在本章節中我們利用修改正視眼的水晶體曲率來完成目標。

目標:近視 100 度之眼睛模擬

首先我們先製作焦度負 1D 之透鏡。負 1D 透鏡我們可利用焦度與焦距轉換(5-2)及造鏡者公式(5-3)計算出其前後曲率。其中 D 為屈光力、f 為焦距、n 為折射率、R1 及 R2 分別為前後表面曲率。在進行優化為調達成負 1D 透鏡。

$$D = \frac{1}{f(m)} \quad (5-2)$$

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \times \left(\frac{1}{R1} - \frac{1}{R2} \right) \quad (5-3)$$

計算負 1D 透鏡曲率:假設透鏡為曲率相同的雙凹透鏡材質為折射率 1.5 之玻璃

$$-1 = \frac{1}{f(m)}$$

$$f(\text{mm}) = -1000$$

$$-\frac{1}{1000} = (1.5 - 1) \times \left(\frac{1}{R1} - \frac{1}{R2} \right)$$

$$R1 = -1000 ; R2 = 1000$$

開啟 OSLO，輸入算出的 R1 及 R2 將鏡片的厚度設定為 5 毫米，材質選為 BK7。將兩面的曲率設為變數進行優化使透鏡 EFL 變為 -1000。數值如圖(5.6)。

The screenshot shows the 'Surface Data' window in OSLO. The lens is named 'No name' and has a focal length (Efl) of -1.0000e+03. The primary wavelength is 0.58756. The lens has four surfaces: OBJ, AST, 2, and IMS. The radii of curvature for surfaces AST and 2 are set to -1.0336e+03 and 1.0353e+03 respectively, and are marked as variables (V). The thickness of the lens is 5.000000 mm. The materials are AIR for OBJ and 2, and BK7 for AST. The aperture radius is 3.203093 mm. The field angle is 20.000000 degrees. The beam radius is 2.000000 mm. The zoom is 1 of 1.

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0000e+20	3.6397e+19	AIR	
AST	-1.0336e+03	5.000000	2.000000	BK7	C
2	1.0353e+03	0.000000	3.203093	AIR	
IMS	0.000000	0.000000	12.000000		F

圖 5.6 負 1D 透鏡參數

將此透鏡插入 5.1 的正視眼，可以看到焦點落到視網膜後面。再來將眼睛的水晶體曲率設為變數使用 GENII Ray Aberration 對系統優化使光線聚焦到視網膜上在將透鏡拆掉，我們可以看到光線聚焦在視網膜前。圖 5.7 中可以看到有些微離焦的狀況發生。這樣就達成設定目標製作出近視 100 度的非正視眼。

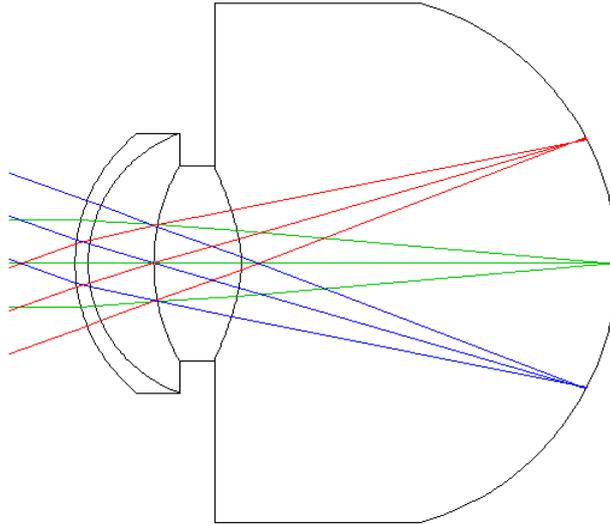


圖 5.7 近視 100 度眼球模擬

5.2.3 近視眼曲率與焦度分析

利用章節 5.2.2 的方法我們可以在製作出中(500 度)、高(1000 度)近視度的眼球如圖 5.8 及 5.9。從圖中可以看到隨著近數度數的增加水晶體的曲率也變得越來越小，使的水晶體整體變的越來越向外凸出，我們利用 OSLO 將模擬出各近視度的水晶體曲率記錄於表(5.2) 因此在這章節我們利用計算水晶體的曲率改變來分析眼球屈光力的變化與近視度數進行分析。

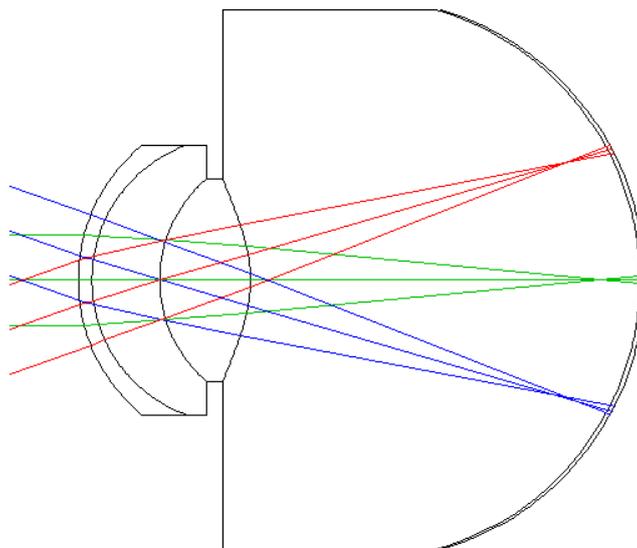


圖 5.8 近視 500 度眼球模擬

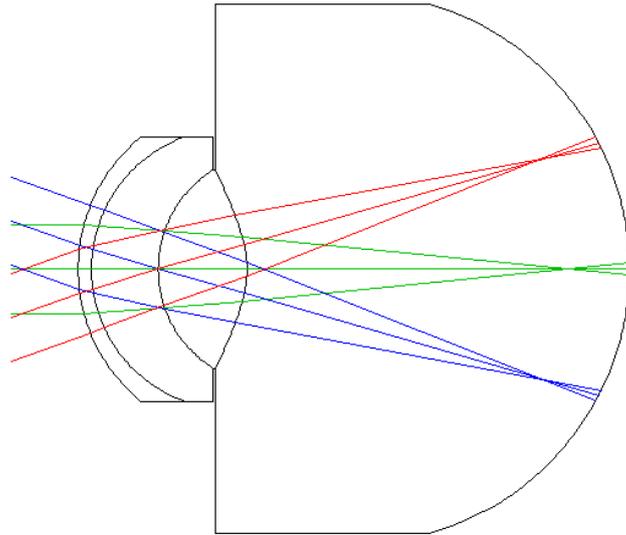


圖 5.9 近視 1000 度眼球模擬

表 5.2 各度數水晶體曲率

近視度數	水晶體前表面 R	水晶體後表面 R
0	10.2	-6.1
100	9.28	-6.1
200	8.43	-6.1
300	7.735	-6.1
400	7.16	-6.1
500	5.94	-6.1
600	6.23	-6.1
700	5.92	-6
800	5.34	-6
900	5.25	-5.2
1000	5.33	-4.7

眼球整體的屈光力(power)取決於各個面的屈光力相加。屈光力的計算可以依照面屈光力的公式(5-4)， n_1 為前介質折射率、 n_2 為後介質折射率、R 曲率，因此可以算出各個面的屈光力，並將其加總就能計算整體眼睛屈光。

$$\text{屈光力(power)} = \frac{(n_2 - n_1)}{R} \quad (5-4)$$

眼睛的屈光力主要來源為四個面所造成的，角膜前表面、角膜後表面、水晶體前表面、水晶體後表面。我們將變因設為水晶體前後表面曲率，因此在計算整體屈光前要先計算角膜屈光力。

角膜前屈光力

$$\text{前角膜屈光力} = \frac{1.376-1}{7.8} = 48.2\text{D}$$

角膜後屈光力

$$\text{後角膜屈光力} = \frac{1.336-1.376}{6.8} = -5.88\text{D}$$

因此角膜整體的屈光力為 42.32D

接下來我們利用表 5.2 數據將水晶體各個面的屈光力算出，並將其製作於表 5.3 之中。

表 5.3 近視度數與屈光力

近視度數	水晶體前屈光力	水晶體後屈光力	水晶體總屈光力	眼睛整體屈光力
0	6.862745098	11.47540984	18.33815493	60.638155
100	7.543103448	11.47540984	19.01851328	61.318513
200	8.303677343	11.47540984	19.77908718	62.079087
300	9.049773756	11.47540984	20.52518359	62.825184
400	9.776536313	11.47540984	21.25194615	63.551946
500	11.78451178	11.47540984	23.25992162	65.559922
600	11.23595506	11.47540984	22.71136489	65.011365
700	11.82432432	11.66666667	23.49099099	65.790991
800	13.10861423	11.66666667	24.7752809	67.075281
900	13.33333333	13.46153846	26.79487179	69.094872
1000	13.13320826	14.89361702	28.02682528	70.326825

從表 5.3 中可以看出整體的屈光力隨著近視度數增加而增加可以看出大約成線性的增加。

5.2.4 鏡架眼鏡與隱形眼鏡度數轉換

隱形眼鏡並不像一般的鏡架眼鏡一樣離眼睛有一段距離，而是直接貼於角膜前面因此在度數上會有一些差距。因此我們需要將鏡架眼鏡的度數轉換成隱形眼鏡度數。我們可利用公式 5-5 近行度數轉換，其中 d 為鏡片到眼睛的距離一般來說為 12 毫米。轉換結果如表 5.3 所示。

$$\text{隱形眼鏡度數} = \frac{\text{鏡架度數}}{1-d \times \text{鏡架度數}} \quad (5-5)$$

從表 5.3 中我們可以發現在高度近視時鏡架眼鏡跟隱形眼鏡的度數差較為明顯且一般度數設計時是以每 25 度為一個間距，因此在小於 300 度時並不會特別近行度數的轉換。由於此度數轉換，在進行隱形眼鏡設計時，曲面曲率的部份就能先大約的計算出大小，方便後續的設計。

表 5.4 鏡架度數與隱形眼鏡轉換

近視度數	鏡架度數(D)	隱形眼鏡度數(D)
100	-1	-0.988142292
200	-2	-1.953125
300	-3	-2.895752896
400	-4	-3.816793893
500	-5	-4.716981132
600	-6	-5.597014925
700	-7	-6.457564576
800	-8	-7.299270073
900	-9	-8.122743682
1000	-10	-8.928571429

5.2.5 近視隱形眼鏡 OSLO 模擬

目標：製作矯正近視 500 度之隱形眼鏡

隱形眼鏡的後曲率須與角膜前表面貼合因此曲率半徑固定為 7.8 毫米，度數的增減主要靠著更改前曲率半徑來改變。我們假設其厚度為 0.2 毫米並使用 PMMA 材料來製作隱形眼鏡其折射率為 1.49。我們在近視 500 度之眼球前插入前表面

設為變數後表面為 7.8 毫米的隱形眼鏡在進行優化可以得到前曲率半徑。如圖 5.9 可以得到其前曲率半徑為 8.42 毫米及光線追跡圖圖 5.10。

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0000e+20	3.6397e+19	AIR	
1	8.423999	0.200000	6.000000	PMMA	M
2	7.800000	0.600000	6.000000	CORNER	M
3	6.400000	3.000000	6.000000	AQUEOUS	M
AST	5.949669	4.000000	4.500000	LENS	M
5	-6.100000	17.200000	4.500000	VITREOUS	M, A
6	-12.500000	0.000000	12.000000	RETINA	M
IMS	-12.500000	0.000000	12.000000		F

圖 5.9 隱形眼鏡及近視 500 度眼睛模擬係數

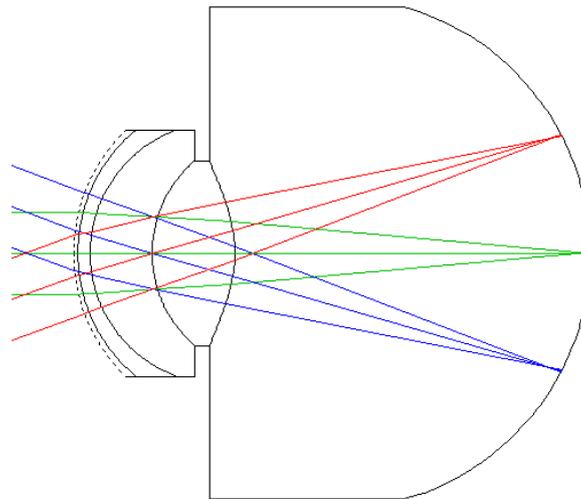


圖 5.10 隱形眼鏡及近視 500 度眼睛光線追跡

在實際上隱形眼鏡在配戴時並不會像模擬時一樣直接與角膜密合在中間的部分會有淚液層因此為了讓度數的誤差更小，我們在角膜與隱形眼鏡後表面在插入一個厚度 0.5 毫米的淚液層在進行進一步曲率的修正。修正後的係數如圖 5.11 光線追跡圖為圖 5.12。

Surface Data

Command: |

Gen Setup Wavelength Field Points Variables Draw On Surfs Notes

Lens: No name Zoom 1 of 1 Efl 23.467380

Ent beam radius 2.000000 Field angle 20.000000 Primary wavln 0.587560

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0000e+20	3.6397e+19	AIR	
1	8.335764	0.200000	6.000000	PMMA	M
2	7.800000	0.600000	6.000000	WATER	C
3	7.800000	0.600000	6.000000	CORNER	M
4	6.400000	3.000000	6.000000	AQUEOUS	M
AST	10.100000	4.000000	4.500000	LENS	M
6	-4.108258	17.200000	4.500000	VITREOUS	M A
7	-12.500000	0.100000	12.000000	RETINA	M
IMS	-12.500000	0.000000	12.000000		F

圖 5.11 淚液修正後隱形眼鏡及近視 500 度眼睛模擬係數

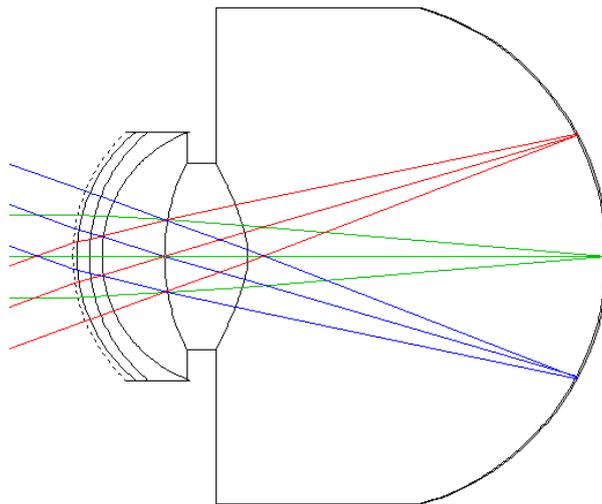


圖 5.12 淚液修正後隱形眼鏡及近視 500 度眼睛光線追跡

一般情形下在輸出工程圖時機器只能精細到小數點後兩位，因此我們將曲率半徑四捨五入後就能輸出工程圖圖 5.13。

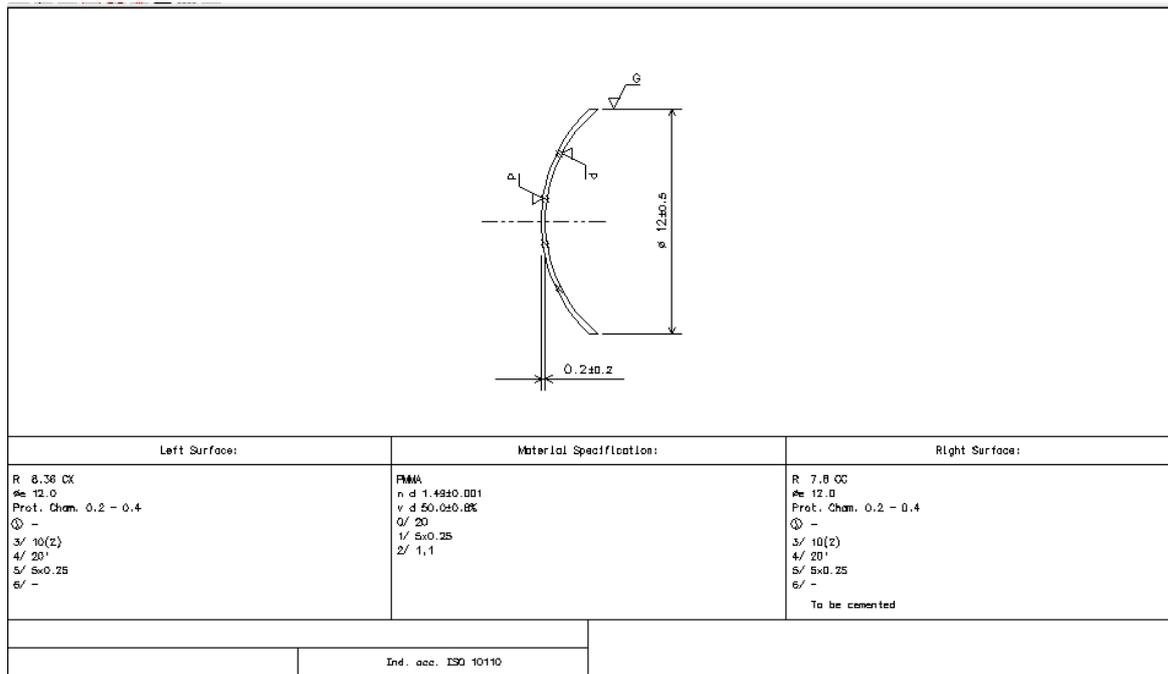


圖 5.13 近視隱形眼鏡工程圖

5.3 遠視之眼睛及隱形眼鏡模擬

5.3.1 遠視眼模擬背景

遠視眼與章節 5.2 中近視眼的模擬方法大同小異，為一的差別在於遠視是需要透過正透鏡鏡行矯正，而水晶體得曲率半徑會隨度數增大而增加。然而隨著曲率半徑的增加水晶體的曲面越趨於直線。

5.3.2 OSLO 遠視眼球模擬

目標：製作遠視 200 度之眼睛

首先我們先製作焦度正 2D 之透鏡。使用與上一節相同的方式我們可以算出正 2D 透鏡其焦距為 500 毫米。若其為 BK7 所製成之曲率相同的雙凸透鏡則曲率半徑為 500 毫米。假設其厚度為 5 毫米，近行優化曲率修正其數據如圖 5.14。

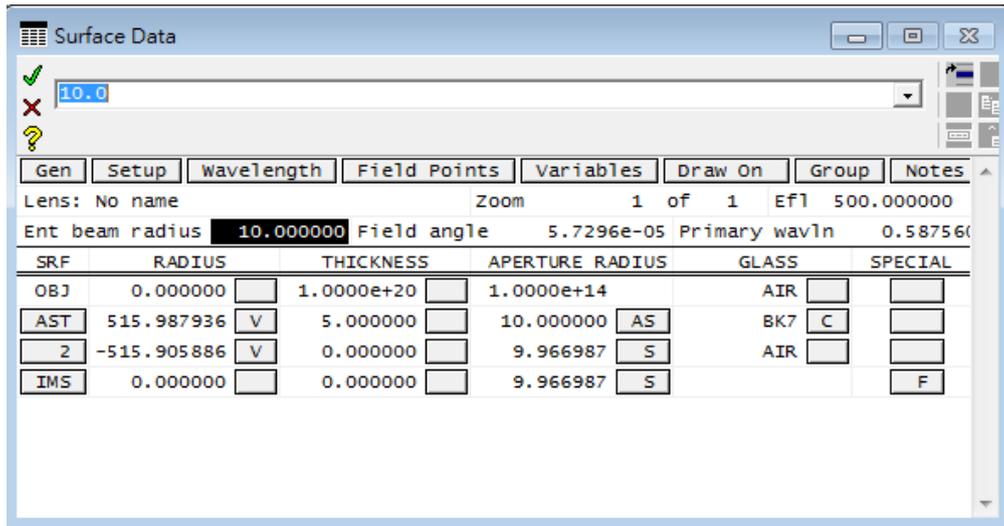


圖 5.14 焦距 500 毫米之雙凸透鏡

將此透鏡插入的正視眼，可以看到焦點落到視網膜前面。再來將眼睛的水晶體曲率設為變數使用 GENII Ray Aberration 對系統優化使光線聚焦到視網膜上。在將透鏡拆掉，我們可以看到光線聚焦在視網膜後。圖 5.15 中可以看出有些微離焦的狀況發生。這樣就達成設定目標製作出遠視 200 度的非正視眼。

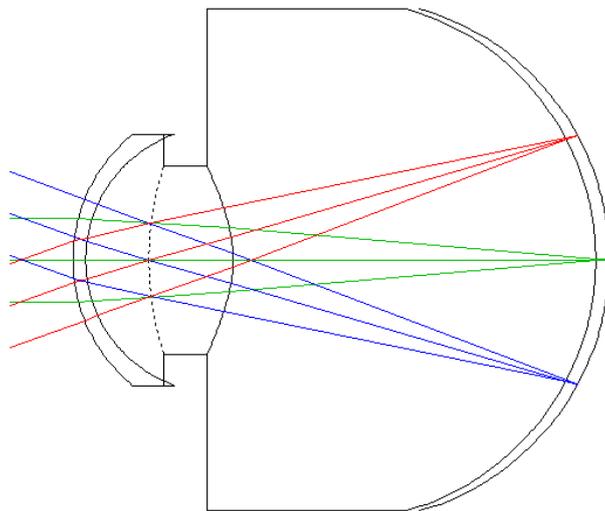
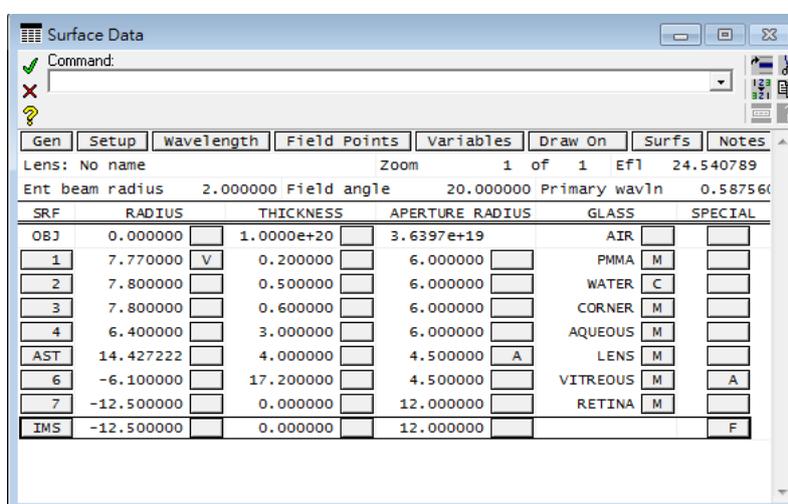


圖 5.15 遠視 200 度眼球模擬

5.3.3 遠視隱形眼鏡 OSLO 模擬

目標:製作矯遠視 200 度之隱形眼鏡

同近視眼隱形眼鏡設計，隱形眼鏡的後曲率須與角膜前表面貼合因此曲率半徑固定為 7.8 毫米，度數的增減主要靠著更改前曲率半徑來改變。我們假設其厚度為 0.2 毫米並使用 PMMA 材料來製作隱形眼鏡其折射率為 1.49。我們在遠視 500 度之眼球前插入前表面設為變數後表面為 7.8 毫米的隱形眼鏡並在其中間設定厚度 0.5 毫米的淚液層。GENII Ray Aberration 對系統優化使光線聚焦到視網膜上，修正後的係數如圖 5.16 光線追跡圖為圖 5.17



SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0000e+20	3.6397e+19	AIR	
1	7.770000	0.200000	6.000000	PMMA	M
2	7.800000	0.500000	6.000000	WATER	C
3	7.800000	0.600000	6.000000	CORNER	M
4	6.400000	3.000000	6.000000	AQUEOUS	M
AST	14.427222	4.000000	4.500000	LENS	M
6	-6.100000	17.200000	4.500000	VITREOUS	M
7	-12.500000	0.000000	12.000000	RETINA	M
IMS	-12.500000	0.000000	12.000000		F

圖 5.16 淚液修正後隱形眼鏡及遠視 200 度眼睛模擬係數

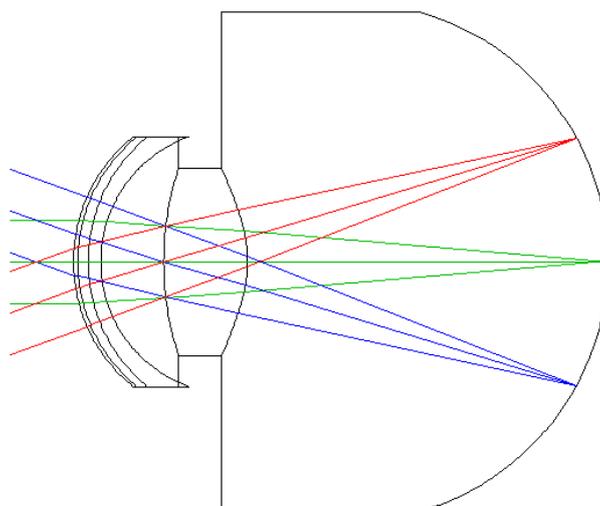


圖 5.17 淚液修正後隱形眼鏡及遠視 200 度眼睛光線追跡

將曲率半徑四捨五入後就能輸出工程圖圖 5.18

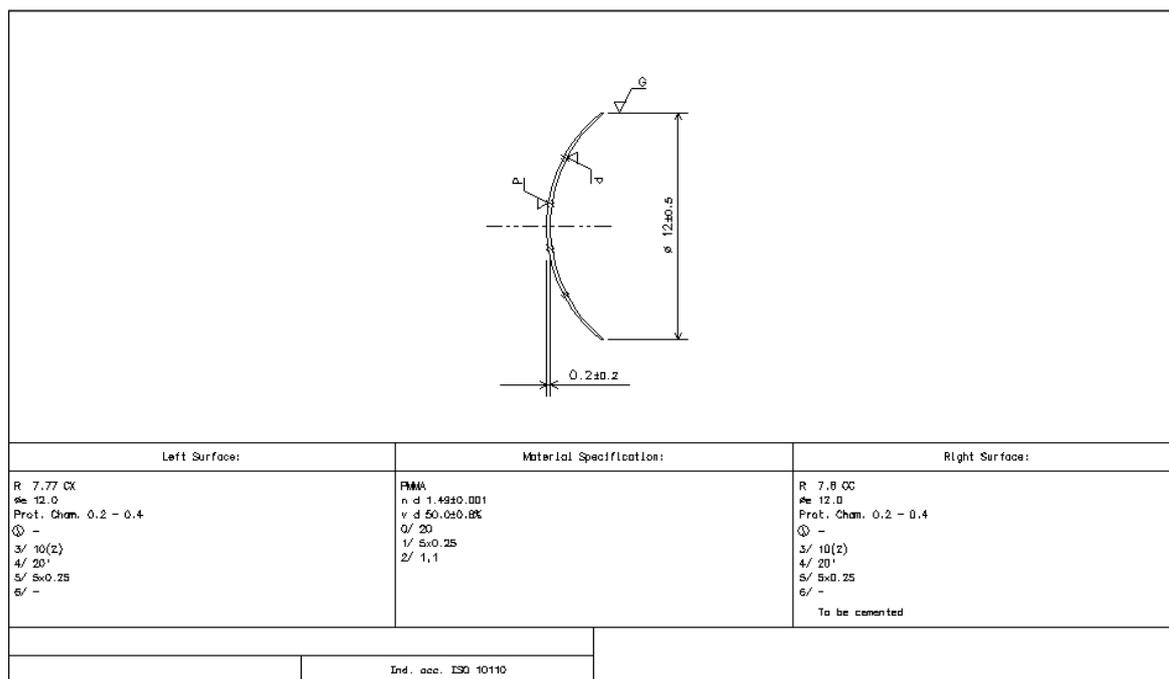


圖 5.18 遠視隱形眼鏡工程圖

5.4 散光隱形眼鏡模擬

5.4.1 散光眼鏡光學區建立

利用 TracePro 建立最常見的背面散光鏡片，背面散光鏡片是由前球面後柱面的方式所製成。我們可以用球面及柱面屈光力相加來算出此透鏡的散光度數及屈光力，但為了散光更為明顯我們在此章節使用較誇張的方式來呈現散光隱形眼鏡。

首先我們先插入一個前球面後柱面的透鏡如圖 5.19 所示，很明顯的這個透鏡由於曲率及大小的關西且形狀並非圓形不可能直接穿帶於眼睛上。

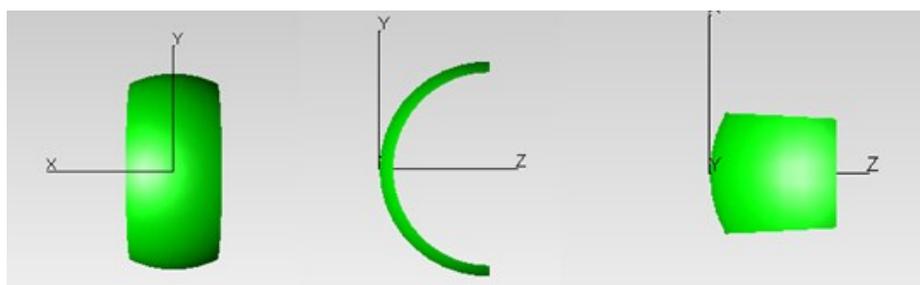


圖 5.19 前球面後柱面的透鏡各視角塗彩

為了製作出光學區我們使用圖 5.19 的透鏡與圓球近行布林運算切出中間的部分來當作光學區如圖 5.20 為布林運算後形成區域的各個視角，可以看出已經相當接近隱形眼鏡的形狀了。而散光眼鏡的光學區域也完成了。

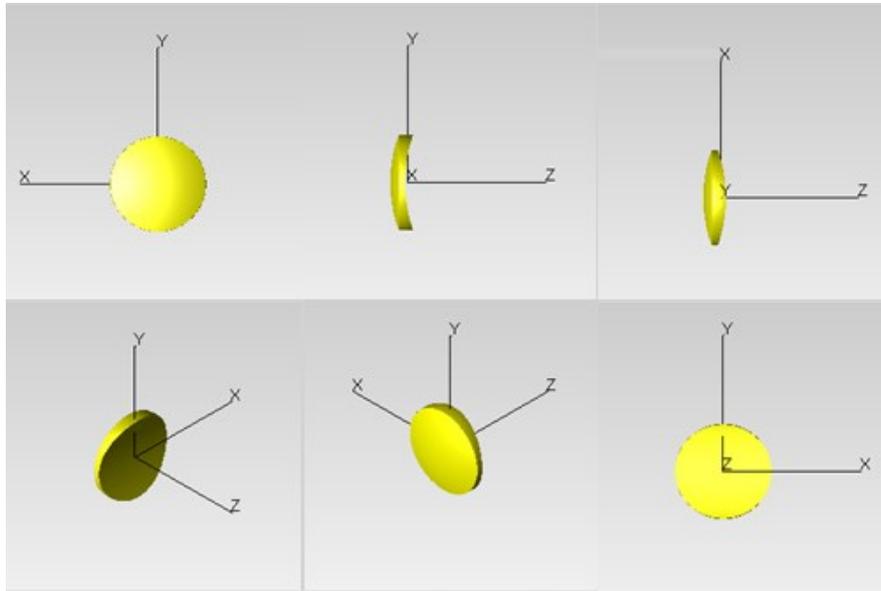


圖 5.20 布林運算後的光學區塗彩

5.4.2 散光隱形眼鏡建立

從隱形眼鏡的結構中我們知道後曲率半徑要與角膜貼合，因此要大致相同。而為了做出散光透鏡我們修改了後曲率因此可能會造成穿戴的不適。所以我們要在光學區域外的邊緣做出曲率 7.8 毫米的球狀透鏡貼合眼睛。先製作出圓球再利用布林運算製作出隱形眼鏡邊緣的外環如圖 5.21。

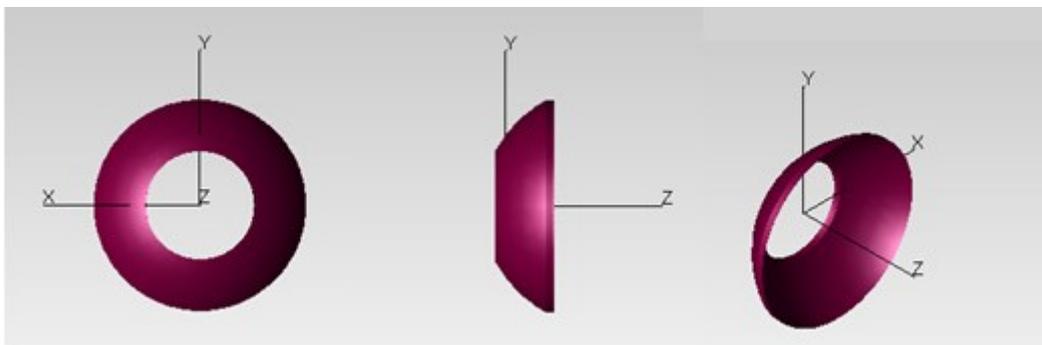


圖 5.21 隱形眼鏡外環塗彩

在將光學區與外環結合形成隱形眼鏡，如圖 5.22 為隱形眼鏡的框架線及其各視角圖。

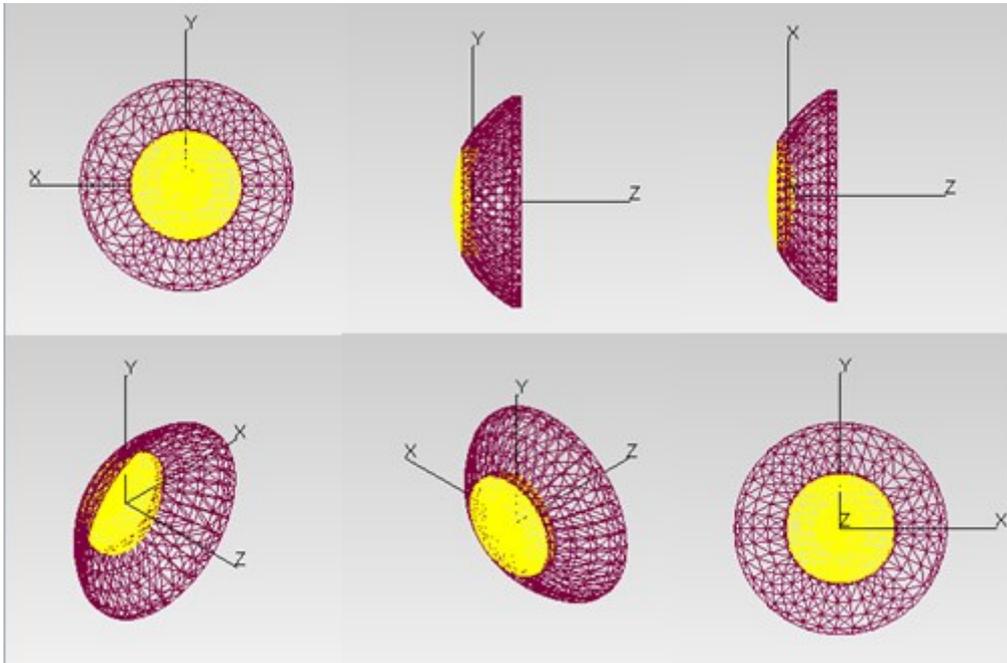


圖 5.22 散光隱形眼鏡的框架線

5.4.2 散光隱形眼鏡光線追跡

在前面的章節我們使用了 TracPro 進行正視眼模擬及散光隱形眼鏡的模擬，在這章節我們將散光隱形眼鏡裝在正視眼上來觀察它對眼睛的屈光力影響進而能從 3D 光線追跡了解散光情形。

首先我們先將隱形眼鏡放置於眼球前中心距離預留 0.5 毫米，在眼睛及隱形眼鏡中間利用布林運算做出淚液層在將三者結合如圖 5.23。

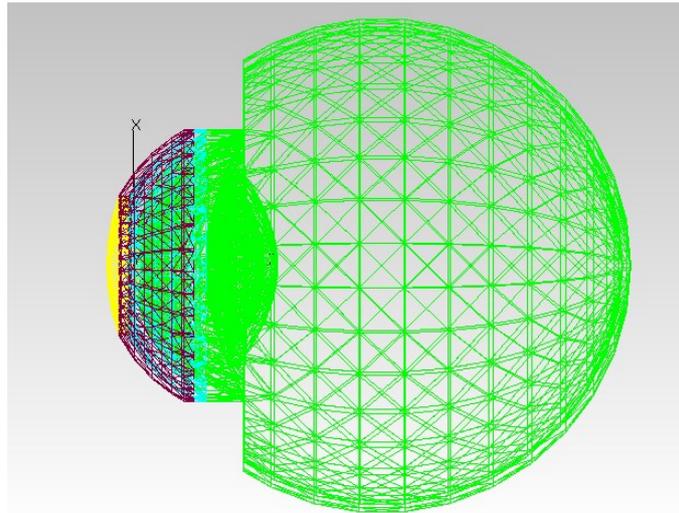


圖 5.23 正視眼與散光鏡片

我們在眼睛前面放入平行光光源觀察他光線追跡情形。比較圖 5.24 及 5.25 可發現戴上散光隱形眼鏡後，整個系統的 X 軸及 Y 軸的焦點並不是在同一個地方。Y 軸焦點落於視網膜後方，而 X 軸焦點落於視網膜前方。從這兩張光線追跡圖可以看出系統不同軸度的焦點位置不同，而這就是散光。也因此可以證實此隱形眼鏡有矯正散光的功能，若恰好放在散光度相同的非正視眼上就能矯正其散光的現象。

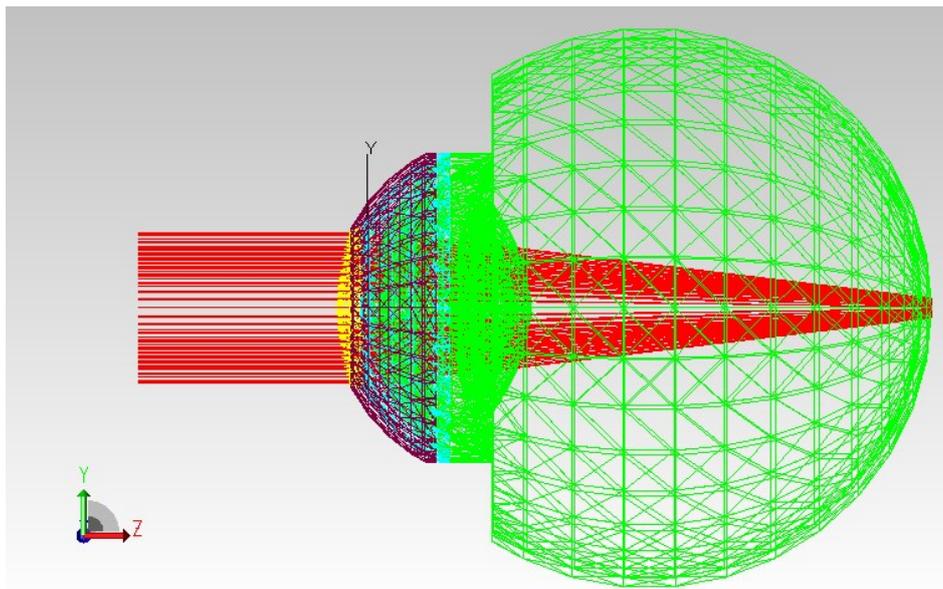


圖 5.24 正視眼與散光鏡片 Y 軸光線追跡

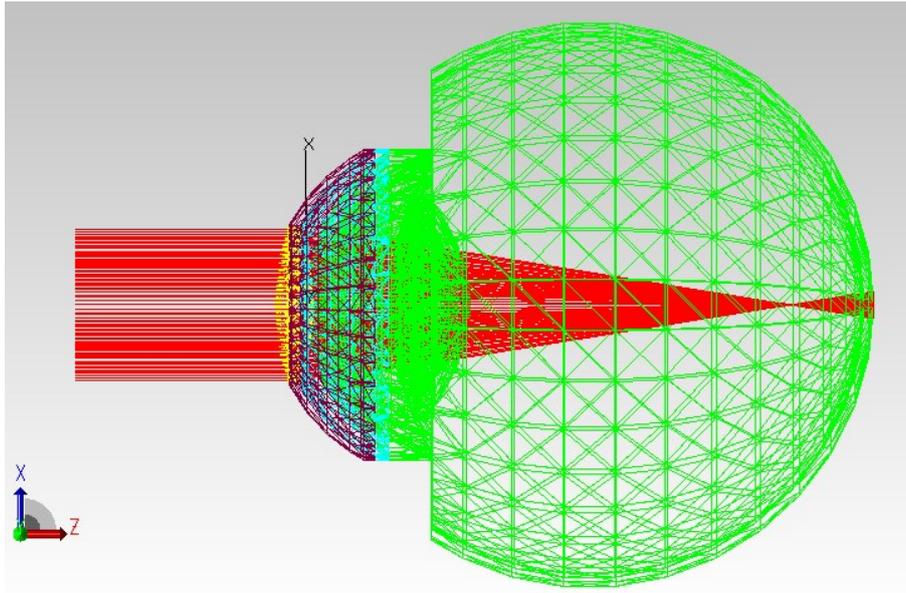


圖 5.25 正視眼與散光鏡片 X 軸光線追跡

在圖 5.26 中我們可以從側視角光線追跡圖可以看見因為散光的鏡片的關西
 整體光束完全無法有焦點，而在 X 及 Y 軸焦點間會有最小散焦圓斑也就是散光影
 像最清晰的地方。

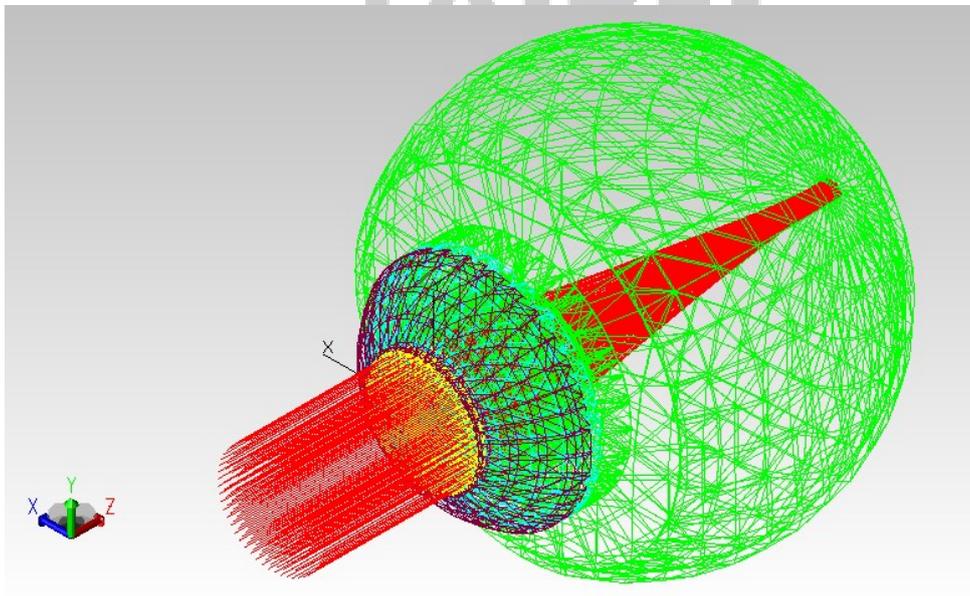


圖 5.26 正視眼與散光鏡片側視光線追跡

六、散光眼鏡產品實物設計

6.1 散光眼鏡產品實物設計

在實物上設計隱形眼鏡度數並不會使用光學模擬來進行設計。因為度數與曲率半徑間有者固定的關係會使用表格將度數對照曲率，加快設計的速度。表 6.1 為近視度數與前弧曲率值之關係。

表 6.1 近視度數與前弧曲率關係

近視度數	前弧 R 值
-1.00	7.638
-1.25	7.712
-1.50	7.735
-1.75	7.802
-2.00	7.809
-2.25	7.851
-2.50	7.901
-2.75	7.927
-3.00	7.978
-3.25	8.061
-3.50	8.078
-3.75	8.117
-4.00	8.115
-4.25	8.186
-4.50	8.199
-4.75	8.265
-5.00	8.332
-5.25	8.323
-5.50	8.420
-5.75	8.466
-6.00	8.608
-6.50	8.664
-7.00	8.771
-7.50	8.879

而在基弧的設計上為了穿戴上的舒適度也不會直接使用柱面結構。而是使用改良的橢圓球結構，藉由 X 軸及 Y 軸橢圓球曲率不一樣進而達到矯正散光的目的，原理與柱狀透鏡相同。在設計上面在基弧上設計一散光基弧為橢圓球長軸，而散光度數則利用橢圓球短軸來造成。如圖表 6.2 中假設散光基弧曲率半徑固定為 7.45 毫米，可利用下表散光度數對映短軸曲率半徑來快速製作後散光面。

表 6.2 散光度數與基弧關係

散光基弧	散光度數	R 值
-7.45	-0.75	7.309
	-1.00	7.268
	-1.25	7.215
	-1.50	7.185
	-1.75	7.121
	-2.00	7.063
	-2.25	7.035
	-2.50	7.022

6.2 快速產品設計

目標:設計近視 300 散光 150 度進片

利用查表的方式我們可以得到前曲率 7.978 毫米、基弧曲率為 7.45 毫米、散光弧為 7.185 毫米。我們將這些數直輸入 ProE，快速繪圖，在進行邊緣優化及上下削薄即可完成。如圖 6.1 所示。

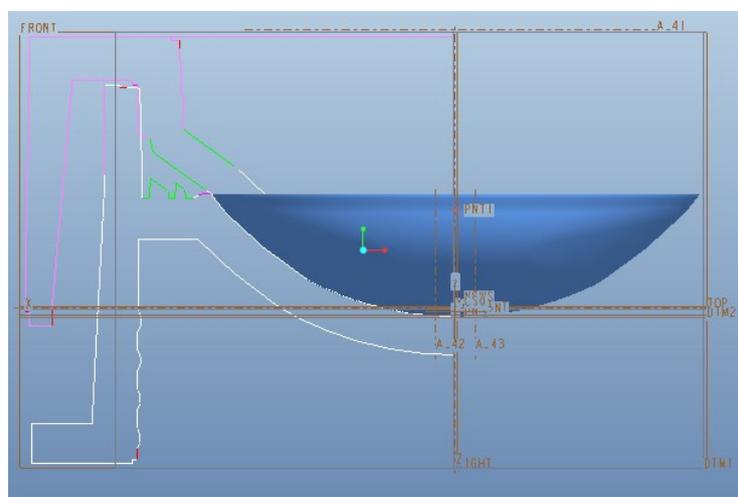


圖 6.1 ProE 快速製作隱形眼鏡模型

我們可以利用 ProE 輸出工程圖如圖 6.2。圖 6.3 為 3D 圖與透視圖從 6.3 中可看見隱形眼鏡的切消即是動態穩定設計。

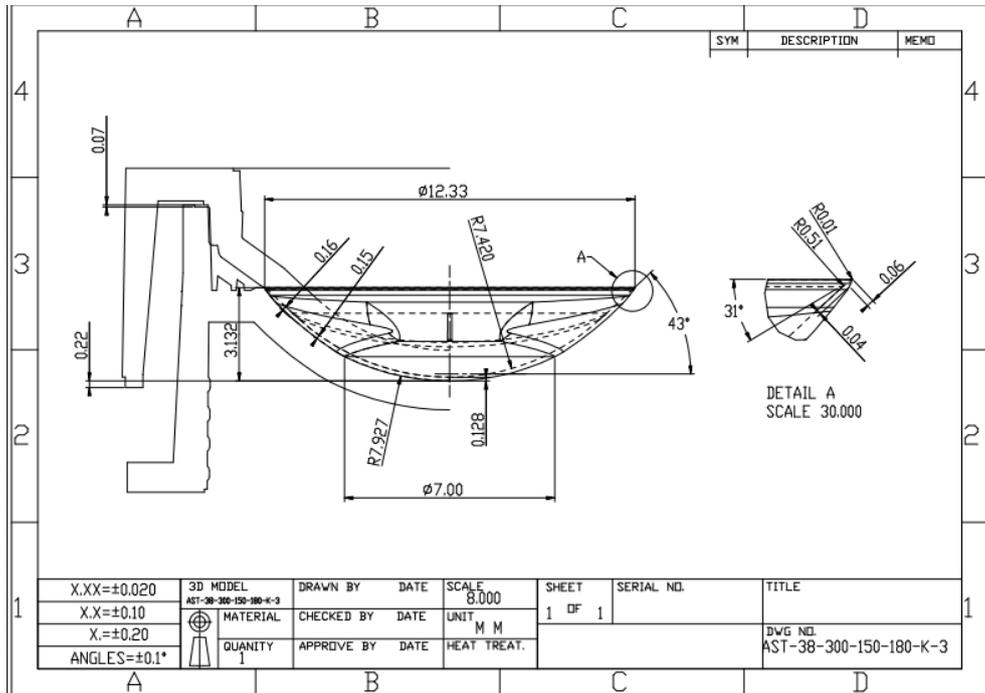


圖 6.2 散光隱形眼鏡工程圖

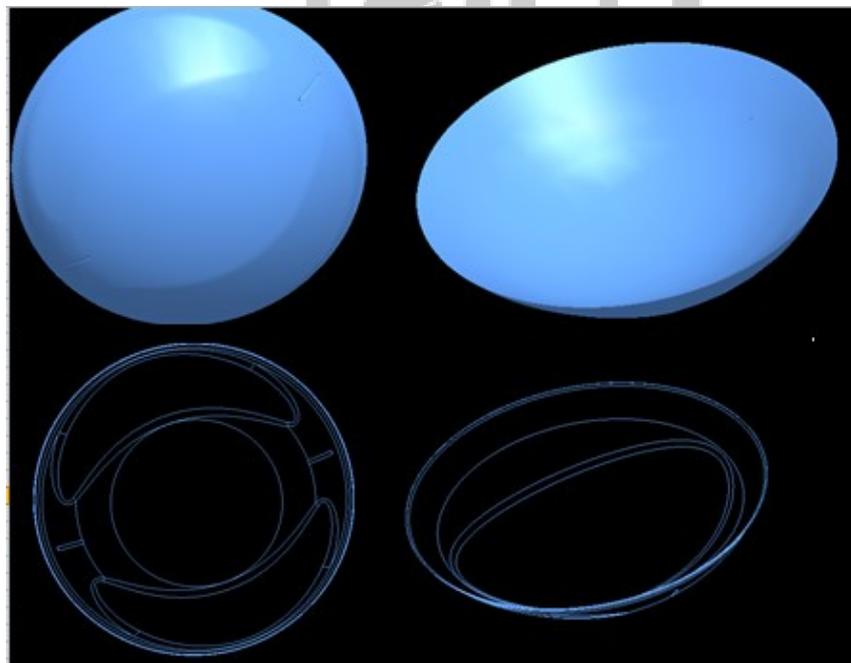


圖 6.3 3D 圖與透是圖

七、結論

全世界至少有 1.3 億隱形眼鏡配戴人口，並仍持續成長中，根據 Contact Lens Spectrum 資料所示，2000 年全球隱形眼鏡市場為 30 億美元，2008 年已成長至 55.5 億美元，2009 年已成長至 57.5 億美元，至 2012 年預估將成長至 72.92 億美元。仍呈現穩定成長趨勢，成為近年產業成長主力。

而在隱形眼鏡的產業裡多數人都是不得其門而入，隱形眼鏡的設計不外乎是光學系統的設計理念。先今要設計一個光學系統，不再是一件麻煩費工夫的事，有這許許多多的光學模擬軟體能過快速的模擬設計光學系統。但一個好的光學設計往往是經驗的傳承及累積，若沒有好的基礎有再好的光學軟體也是無法設計出好的光學系統。

因此有基本的設計理念，能快速地將光學系統的雛型定下來。搭配實務經驗就能快速的優化改善作出一個好的光學系統。

八、參考資料

- [1] 隱形眼鏡光學上冊 作者:王滿堂
- [2] 隱形眼鏡光學下冊 作者:王滿堂
- [3] Contact Lens Optics and Lens Design by W. A. Douthwaite
- [4] Optical Design for Visual Systems by Bruce H. Walker
- [5] Handbook of Optics: Vision and Vision Optics by Michael Bass
- [6] 維基百科

